

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TİCARİ LEVHALARIN MEKANİK KARAKTERİZASYONU VE
BÜKME DAVRANIŞLARINA LEVHA KALINLIĞININ ETKİSİ

ÇAĞLAR ALTUĞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2017

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TİCARİ LEVHALARIN MEKANİK
KARAKTERİZASYONU VE BÜKME
DAVRANIŞLARINA LEVHA
KALINLIĞININ ETKİSİ

ÇAĞLAR ALTUĞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. YAHYA KEMAL TÜR

GEBZE
2017

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**MECHANICAL CHARACTERIZATION OF
COMMERCIAL SHEETS AND THE EFFECT
OF SHEET THICKNESS ON BENDING
BEHAVIORS**

ÇAĞLAR ALTUĞ
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE**
DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
ASSOC.PROF.DR. YAHYA KEMAL TÜR

GEBZE
2017

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 22/06/2017 tarih ve 2017/34 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 19/07/2017 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Çağlar Altuğ'nun tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Yahya Kemal TÜR

ÜYE

: Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Ali Fethi OKYAR

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Doç. Dr. Arif Çağdaş AYDINOĞLU
Gebze Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, bükme işlemi için endüstride sıklıkla kullanılan DKP, Galvaniz ve Paslanmaz çelik levhaların mekanik özelliklerini ortaya koyarak, bükme davranışları üzerine levha kalınlığı ve mekanik özellik etkilerinin incelenmesidir. Bu sebeple levha numuneler ilk olarak çekme testine tabii tutulmuş ve daha sonra levha kalınlığı, malzeme çeşidi ve hadde yönü dışındaki parametreler sabit tutularak havada bükme işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ile malzemeler mekanik özellikleri açısından yorumlanmış, bükme işlemi sırasındaki davranışları geri ve ileri yaylanma hareketleri göz önüne alınarak incelenmiştir.

Tez çalışması oluşturulurken, ilk olarak ticari levhalar ve bükme işlemleri hakkında genel bilgi verilmiştir. Daha sonra gerçekleştirilen çekme testi ve bükme deney metotları açıklanmış, Solidworks programı ile oluşturulan katı modelin sonlu elemanlar analizi Ansys Workbench paket programı ile yapılmıştır.

Sonuç olarak levha kalınlığının bükme davranışına etki eden en önemli faktör olduğu ortaya koyulmuştur. Artan kalınlık ile geri yaylanma miktarının azaldığı ancak artan mekanik değerler ile birlikte ise geri yaylanma miktarının arttığı yapılan deneyler ile tespit edilmiş ve sonlu elemanlar analizi çalışmalarıyla desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Havada Bükme, Ticari Levhalar, Geri ve İleri Yaylanma, Mekanik Özellikler, Levha Kalınlığı, Ansys Workbench.

SUMMARY

The purpose of this work is to demonstrate the mechanical properties of DKP, Galvanized and Stainless steel sheets, which are frequently used in the bending industry, to examine the effects of sheet thickness and mechanical properties on bending behaviors. In this case, the sheet specimens were subjected to the tensile test and then air bending was performed while keeping the parameters other than sheet thickness and materials types constant. The materials were evaluated mechanically and the effects of springback-forward movements on bending with considering the obtained data.

In the first part of this thesis, a general information about commercial sheets and bending was given. Then, the methods of tensile tests and bending experiments were explained, and springback-forward values calculated via using finite element analysis on Ansys Workbench with the solid model that was created on Solidworks.

As a result, sheet thickness was found to be the most important factor on bending behavior. It was determined that, springback decreased with increasing sheet thickness, on the other hand, springback increased with increasing mechanical values. This was supported with finite element analysis.

Key Words: Air Bending, Commercial Sheets, Springback-forward, Mechanical Properties, Sheet Thickness, Ansys Workbench.

TEŞEKKÜR

Başta, çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, değerli zamanını benden esirgemeyen danışmanım Sayın Yahya Kemal TÜR'e, analiz çalışmalarımdeki katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. Ahmet Zafer Şenalp'e ve Araş. Gör. Gökçe AKGÜN'e, deney malzemelerinin tedarik edilmesinde ve deneylerin gerçekleştirilmesinde bana destek veren Tekso Teknik Soğutma San. ve Tic. A. Ş. ailesine, deney numunelerinin ölçülmesinde benden desteğini esirgemeyen Elsel Gaz Armatürleri San. ve Tic. A. Ş. ailesine ve Tuncer SEZ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Her koşulda beni destekleyen, en zor anlarımda yanımda olan, sevgili eşim Dilara ALTUĞ'a şükranlarımı sunmak isterim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLOLAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	4
2. TİCARİ LEVHALAR	6
3. BÜKME	9
3.1. Bükme İşlemi	9
3.2. Bükme İşlem Çeşitleri	10
3.2.1. V Bükme	12
3.2.2. Kenar Bükme	14
3.3.3. Serbest (Havada) Bükme	16
3.3. Bükme Mekanığı	16
3.3.1. Bükme Geometrisi ve Düzlemsel Gerinim	17
3.3.2. Bükme İşleminde Malzeme Modelleri	19
3.3.2.1. Elastik-Mükemmel Plastik Bükme Modeli	20
3.3.2.2. Deformasyonla Sertleşen Malzeme Bükme Modeli	22
3.4. Bükme İşlemi Açınım Hesaplama	23
3.5. Bükme İşleminde Geri ve İleri Yaylanma Hareketleri	24
3.5.1. Malzeme Özellikleri	26
3.5.2. Malzeme Kalınlığı	27
3.5.3. Malzeme Hadde Yönü	28
3.5.4. Bükme Kuvveti	30
3.5.5. Zımbanın Levha Üzerinde Bekleme Süresi	30
3.5.6. Bükme Açısı	31

3.5.7. Zimba Uç Radyüsü	31
3.5.8. Kalıp Boşluğu	32
3.5.9. Bauschinger Etkisi	33
3.5.10. Tane Boyutu	34
3.5.11. Artık Gerilimler	36
3.5.12. Pekleşme Üsteli	36
3.5.13. Proses Parametreleri	37
4. MATERYAL VE METOT	39
4.1. Deney Malzemeleri	39
4.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması	40
4.3. Deneysel Çalışmada Kullanılan Makine ve Cihazlar	40
4.3.1. Kesme Tezgahı (Giyotin Makası)	40
4.3.2. Bükme Tezgahı (Abkant Pres)	41
4.3.3. Ölçme Cihazı	42
4.4. Deney Numunelerinin Mekanik Karakterizasyonu	43
4.5. Metot	45
4.6. Analiz Çalışmaları	46
5. DENEYSEL SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME	50
5.1. Çekme Testleri	50
5.2. Bükme Testleri	55
5.3. Deney ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	69
6. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER	72
6.1. Öneriler	74
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	81
EKLER	82

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
α	: Büküm açısı
α_d	: Dişi kalıp açısı
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	: Asal gerinim
ϵ_a	: Merkezdeki gerinim
ϵ_b	: Bükme sırasındaki gerinim
ρ	: Tarafsız eksen yarıçapı
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	: Asal gerilim
σ_f	: Akış gerilimi
σ_u	: Çekme mukavemeti
σ_y	: Akma mukavemeti
$\bar{\sigma}$	: Eşdeğer gerilim
$\bar{\epsilon}$	: Eşdeğer gerinim
A_1	: Kenar bükme metodu zımba radyüsü
A_2	: Kenar bükme metodu kalıp radyüsü
AHSS	: Yüksek mukavemetli çelik
b	: Levha genişliği
BA	: Açınım hesabı toplanacak büküm payı (bend allowance)
BD	: Açınım hesabı çıkarılacak büküm payı (bend deduction)
C	: Zımba-kalıp arası boşluk
c	: t/w oranına bağlı bir katsayı
CNC	: Bilgisayarlı nümerik kontrol
DIN	: Alman Standardizasyon Enstitüsü
E'	: Düzlemsel gerinim elastik modülü
El	: Uzama
EN	: Avrupa Standardı
GEF	: Geri esneme faktörü
I	: Atalet momenti
K	: Mukavemet katsayısı
K'	: Düzlemsel gerinim mukavemet katsayısı

kN	: Kilonewton
l_0	: İlk boy
l_s	: Son boy
M	: Moment
mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
n	: Pekleşme üsteli
OSSB	: Dış mesafe (outside setback)
P_b	: V bükme metodu kuvveti
P_e	: V bükme metodu son kuvveti
P_w	: Kenar bükme metodu bükme kuvveti
R	: Büküm yarıçapı
R_d	: Dişi kalıp kavis yarıçapı
S	: Düzlemsel gerinim akma dayanımı
s	: Saniye
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
S_y	: y uzaklıktaki akma dayanımı
t	: Levha Kalınlığı
UHSS	: Ultra yüksek mukavemetli çelik
w	: Kalıp ağız açıklığı
X	: Geri esneme faktörü (K – faktörü)
y	: Tarafsız eksen den uzaklık
y_e	: Tarafsız eksen den elastik sınıra uzaklık

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: Bükme işlemi ile oluşan gerilmeler.	9
3.2: Bükme işlem çeşitleri – 1.	10
3.3 Bükme işlem çeşitleri – 2.	11
3.4: Bükme işlem çeşitleri – 3.	11
3.5: V bükme aşamaları.	13
3.6: c katsayı diyagramı.	14
3.7: Kenar bükme.	14
3.8: Kenar bükme kuvvet hesap verileri.	15
3.9: Serbest bükme.	16
3.10: Bükme bölgesi geometrileri.	17
3.11: Varsayılan gerinim.	18
3.12: Birim genişlikteki levha.	19
3.13: Elastik-mükemmel plastik bükme modeli gerilim dağılımı.	21
3.14: Elastik-mükemmel plastik bükme modeli moment-eğrilik grafiği.	21
3.15: Deformasyonla sertleşen malzeme bükme modeli gerilim dağılımı.	22
3.16: Deformasyonla sertleşen malzeme bükme modeli gerilim dağılımı moment-eğrilik grafiği.	23
3.17: Büküm işleminde açınım hesaplamaları.	23
3.18: Bükme işleminde a) geri ve b) ileri yaylanma hareketleri.	25
3.19: Gerilme-gerinim eğrisi.	26
3.20: Malzeme mukavemeti-geri yaylanma ilişkisi.	27
3.21: Hadde yönü ve haddeye paralel bükme geometrileri.	29
3.22: Konkav ve konveks bükme.	29
3.23: Kenar bükmede kalıp boşluğu.	32
3.24: Bauschinger etkisi ve histerisiz döngüsü.	33
3.25: Pirinç malzemede geri yaylanmaya tane boyutu etkisi.	34
3.26: Tane boyutunun geri yaylanmaya etkisi.	35
4.1: Deney numuneleri.	40
4.2: Giyotin makas.	41
4.3: Bükme işleminin gerçekleştirildiği abkant makinesi.	41

4.4:	Profil projeksiyon cihazı.	42
4.5:	Lazer kesim makinesi.	43
4.6:	Çekme deney numunesi.	43
4.7:	Çekme deney numunesi ölçüleri.	44
4.8:	Çekme test düzeneği.	44
4.9:	Galvaniz malzeme bükme deney numune örnekleri a) 90° b) 120° bükme.	45
4.10:	Ansys programı arayüzü.	46
4.11:	Solidworks programında oluşturulan katı model.	47
4.12:	Analiz modeli genel görünüş.	47
4.13:	Ağ örülmüş model.	48
5.1:	1. Çekme testi sonucu levhaların gerilme-gerinim diyagramları.	52
5.2:	2. Çekme testi sonucu levhaların gerilme-gerinim diyagramları.	53
5.3:	Çekme testi öncesi ve boyun verme noktasına kadar yüklenen numune boyları.	55
5.4:	Hadde yönüne paralel kesilmiş galvaniz levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının karşılaştırılması.	56
5.5:	Hadde yönüne dik kesilmiş galvaniz levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının karşılaştırılması.	57
5.6:	2,5 mm kalınlıktaki hadde yönüne paralel kesilmiş levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının karşılaştırılması.	58
5.7:	2,5 mm kalınlıktaki hadde yönüne dik kesilmiş levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının karşılaştırılması.	59
5.8:	2,5 mm kalınlıktaki hadde yönüne paralel kesilmiş levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının akma mukavemetlerine göre oranı.	60
5.9:	2,5 mm kalınlıktaki hadde yönüne dik kesilmiş levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının akma mukavemetlerine göre oranı.	61
5.10:	2,5 mm kalınlıktaki hadde yönüne paralel kesilmiş levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının mukavemet katsayılarına oranı.	62
5.11:	2,5 mm kalınlıktaki hadde yönüne dik kesilmiş levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının mukavemet katsayılarına oranı.	63
5.12:	2,5 mm kalınlıktaki hadde yönüne paralel kesilmiş levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının pekleşme üsteline oranı.	64

5.13:	2,5 mm kalınlıktaki hadde yönüne dik kesilmiş levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının pekleşme üsteline oranı.	64
5.14:	Galvaniz levhaların hadde yönüne göre geri yaylanma miktarları.	65
5.15:	DKP levhaların hadde yönüne göre geri yaylanma miktarları.	66
5.16:	Paslanmaz levhaların hadde yönüne göre geri yaylanma miktarları.	66
5.17:	Galvaniz levhaların bükme açısına göre geri yaylanma miktarları.	67
5.18:	DKP levhaların bükme açısına göre geri yaylanma miktarları.	68
5.19:	Paslanmaz levhaların bükme açısına göre geri yaylanma miktarları.	68
5.20:	Bükme işlemi simülasyonu.	69
5.21:	Galvaniz levhalar analiz sonuçları.	70
5.22:	2,5 mm kalınlıktaki levhaların analiz sonuçları.	71

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: 304 ve 304L kalite paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri.	6
2.2: 316 kalite paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri.	6
2.3: 430 kalite paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri.	7
2.4: DKP çeliklerin mekanik özellikleri.	7
2.5: Galvanize çeliklerin mekanik özellikleri.	7
2.6: Tez çalışmasında kullanılan levhaların maliyetleri.	7
4.1: DKP sac kimyasal kompozisyonu.	39
4.2: Galvaniz sac kimyasal kompozisyonu.	39
4.3: Paslanmaz sac kimyasal kompozisyonu.	39
4.4: Mekanik özellikler.	39
4.5: Abkant tezgahının genel özellikleri.	42
5.1: 1. çekme testi sonucu levhaların çekme mukavemetleri.	51
5.2: 1. çekme testi sonucu levhaların akma mukavemetleri.	51
5.3: 2. çekme testi sonucu levhaların çekme mukavemetleri.	53
5.4: 2. çekme testi sonucu levhaların akma mukavemetleri.	53
5.5: 2. çekme testi sonucu hesaplanan mukavemet katsayıları.	54
5.6: 2. çekme testi sonucu hesaplanan pekleşme üstelleri.	54
5.7: Sonlu elemanlar analizi sonucu geri yaylanma miktarları.	70

1. GİRİŞ

Günümüz modern toplumunda artan tüketim talebini karşılamak için rekabete dayalı endüstriyel ortamda maksimum verim ve kapasiteyle ürün imalatı zorunluluk halini almıştır. İmal edilen ürün adedinin yanı sıra, düşük maliyet – yüksek kalite ile ürün imalatı işletmeler için çok büyük bir önem kazanmıştır.

Günlük hayatımızda karşılaştığımız ürünler içerisindeki şekillendirilmiş levha malzemeler oldukça büyük bir yer kaplamaktadır. Endüstri içerisinde tüm taşıtlarda (kara, hava, deniz ve uzay), beyaz eşyalarda, soğutmalı teşhir kabinlerinde, mutfak eşyalarında, savunma, inşaat ve enerji sektöründe, elektronik ürünlerde, medikal ürünlerde, imalat sektöründe kullanılan makinelerde ve daha birçok uygulamalarda levha kullanımı karşımıza çıkmaktadır. Örneğin market alışverişimizi yaparken, soğutulmuş veya donmuş ürünleri aldığımız bir teşhir kabininin direkt olarak üzerine ürün koyulan ve tüketiciye ilk görünen raf gibi malzemelerinin dışında, taban ve tavan bölümlerinde, yan kısımlarında, iç kısımlarında, kısaca kabinin tüm bölümlerinde şekillendirilmiş levha kullanılmaktadır. Levhaların endüstri içerisinde yaygın olarak kullanımındaki en önemli etkenlerden bazıları ucuz ve kolay işlenebilmeleri, şekillendirilebilmeleri, alternatiflerine göre daha dayanımlı olmalarıdır.

Levha şekillendirme işlemlerinin en önemli uygulama alanlarından biri bükme işlemidir. Bükme işlemi en basit anlamda, belirli bir şekle sahip, sabit bir kalıp (dişi kalıp) üzerine yerleştirilen levhanın belirli bir bölgesine, belirli bir şekle sahip, hareketli zımba (erkek kalıp) tarafından uygulanan kuvvet sonucunda oluşan deformasyon ile birlikte levhaya belirli bir açıda şekil verme işlemidir.

Endüstride bükme işlemi genellikle abkant makinelerinde yapılmaktadır. Özellikle, birbirinden farklı malzemeler ile, birden çok çeşitte, yüksek adette ürün yapan işletmelerde, bükme işlemi sırasında malzeme özelliklerine, levha hadde yönüne, levha kalınlıkları gibi parametreler göz önünde bulundurularak erkek ve dişi kalıp değişimi yapılması büyük bir zaman kaybına yol açacağından aynı kalıp üzerinde çeşitli bükme işlemleri gerçekleştirme eğilimi yüksektir. Bu durumda, gerçekleştirilen ürün ile istenilen ürünün ölçüleri arasında farklar doğmaktadır.

Literatürdeki bükmeyi etkileyen parametreler ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, çalışmalar sırasında yapılan deneyler veya analizlerin geri ve ileri yaylanma

hareketlerine olan etkileri incelenerek, bükmeye olan etkileri bu hareketler üzerinden yorumlanmaktadır. Geri ve ileri yaylanma hareketleri, malzemeye şekil vermek için uygulanan yük üzerinden kaldırıldığında malzemenin istenilen üründen farklı bir ölçüde elde edilmesi ile kendini göstermektedir.

Tekiner yapmış olduğu çalışmada, 0,5 – 0,75 – 1 mm kalınlıklara sahip 6 farklı malzemenin 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°'lik kalıplarda V bükümünü gerçekleştirmiştir. Bu bükümler sırasında 4 farklı metot kullanmış ve sonuçları, kullanılan malzemeyi – levha kalınlığını – kullanılan metodu göz önüne alarak, bükme sonrası numunelerin geri yaylanma miktarlarını grafiksel ve fonksiyonel olarak ortaya koymuştur [1]. Tekaslan ve arkadaşları, benzer bir çalışmada 0,5 mm kalınlığa sahip aynı malzeme cinsindeki levha numunelerin bükümünü gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışma sonucu, geri yaylanma miktarının, malzeme ve kalıp parametrelerine bağlı olarak değiştiği ortaya koyulmuştur. Ayrıca, zımbanın bükme sonucu levha üzerinde bekletilmesinin geri yaylanma miktarını azalttığını belirtmişlerdir [2].

Gautam ve arkadaşları, soğuk haddelenmiş yassı çelikler için yapmış oldukları sonlu elemanlar yöntemi (SEY) analizlerinde, 2 mm'den 4 mm'ye kadar olan levha kalınlıklarında geri yaylanma hareketini incelemişlerdir. Levha kalınlığı 3 mm'ye doğru geri yaylanmanın giderek azaldığını, 3,2 mm'de ise büyük bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu durumu malzemenin plastik bölge artışından dolayı olduğunu belirtmişlerdir [3]. Fei ve Hodgson yapmış oldukları çalışmada, 3 farklı kalınlığa sahip TRIP (transformation induced plasticity) çelik levhanın, V kalıp içerisinde havada bükme işlemi ile deneysel çalışmalar ve sonlu SEY kullanarak nümerik sonuçların karşılaştırmasını yapmışlardır. Sonuç olarak, levha kalınlığının geri yaylanma üzerine olan etkilerini grafiksel olarak ortaya koymuşlardır. Havada bükme işleminde sürtünme katsayısının zımba kuvvetini etkilediğini ancak, geri yaylanma miktarına etkisinin olmadığını belirtmişlerdir [4]. Panthi ve arkadaşları, oval zımba ucuna sahip bükme işlemi için genel bir SEY uygulamışlar ve geri yaylanmanın artan elastikiyet modülü (Young's modulus) ile azaldığını, ayrıca, sürtünmenin geri yaylanma üzerine etkisinin ihmal edilebileceğini belirtmişlerdir [5].

Slota ve Jurcisin, yüksek mukavemetli çelik (AHSS), ultra yüksek mukavemetli çelik (UHSS) ve yumuşak çelik levha numuneler ile gerçekleştirdiği çalışmada, geri yaylanma miktarını malzeme mukavemetine göre değiştiğini belirtmiştir. Deneysel sonuçlar, SEY ile desteklenmiş, ayrıca, değişik malzeme modelleri kullanılarak

deneysel verilere en yakın sonuç bulunmaya çalışılmıştır. Malzeme mukavemeti yüksek levhaların geri yaylanmalarının fazla olacağı belirtilmiştir [6].

Dong-juan ve arkadaşları, V bükme sonrası meydana gelecek geri yaylanma miktarını hesaplamak için yeni bir analitik model geliştirmişler ve sonuçları SEY sonuçları ile karşılaştırarak, bükme sırasında malzemede meydana gelen incelleme miktarının göz ardı edebileceğini belirtmişlerdir [7].

Jooybari ve arkadaşları, CK67 çeliğinin U ve V bükümde geri ve ileri yaylanma davranışlarını SEY simülasyonu üzerinden incelemişlerdir. Sonuç olarak, her iki büküm tipinde de levha kalınlığının artmasının ileri ve geri yaylanma hareketlerinde azalmaya yol açtığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca, hadde yönü ve zımba uç radyüsünün geri ve ileri yaylanma hareketleri üzerine etkilerini incelemişlerdir [8]. Sever ve arkadaşları benzer bir çalışmayı yüksek mukavemetli çelik numuneler ile yapmışlar. Levhaları V bükme ve U bükme işlemine tabii tutmuşlar ve SEY yöntemi ile sonuçları karşılaştırmışlardır. Anizotropinin, yani hadde yönünün, V ve U bükme işlemlerinde çok ufak bir etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır [9].

Nasrollahi ve Arezoo, büküm bölgelerinde delikler bulunan HSLA360 ve St12 çelik numuneleri kenar bükme işlemine tabii tutmuşlardır. Daha sonra yaptıkları SEY simülasyonu ve yapay sinir ağları yöntemiyle elde ettikleri geri yaylanma miktarlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırarak, büküm bölgesinde bulunan deliklerin geri yaylanma miktarını azalttığını, özellikle, kare deliklerin diğer delik şekillerine göre (dikdörtgen ve yuvarlak) daha az geri yaylanma gösterdiğini belirtmişlerdir [10].

Dilipak, Özdemir ve Sarıkaya, 4 mm kalınlıktaki S235JR çeliğinin 90°'lik kalıplarda V bükümünü gerçekleştirmiştir. Büküm işlemini 5 farklı radyüse sahip zımba ile levha üzerinde 30 s bekleterek ve hiç bekletmeden direkt olarak çekerek uygulamışlardır. Ayrıca, deneyler sırasında bazı numuneleri normalize tavllanmış, bazılarını temperlenmiş ve bazılarını ise tavsız olarak kullanmışlardır. Deneyler sonucunda, zımbayı büküm sonrası levha üzerinde bekletmenin, tavlama işlemlerinin ve zımba radyüslerinin ileri yaylanma hareketine etkilerini incelemişlerdir. İleri yaylanmanın artan zımba radyüsü ve zımbanın malzeme üzerinde bekletilmesi ile azaldığını belirtmişlerdir. Normalizasyon işleminin ileri yaylanma miktarını artırdığını belirtmişlerdir [11].

Geri yaylanma miktarı malzeme özelliklerine göre değişmektedir. Her büküm öncesi çekme testi yaparak bu özellikleri belirleyip, daha sonra bükme işlemi

yapmak çok büyük bir zaman alacaktır. Imai, Koyama ve Jin, bükme sırasında malzeme özelliklerini belirleyip daha sonraki bükümleri bu yaklaşım ile yaparak yüksek hassasiyette ($\pm 0,25^\circ$) büküm yapabilecekleri yeni bir sistem geliştirmişlerdir [12].

Erdin ve Atmaca yaptıkları çalışmada, alüminyum alaşımlarının V bükme işlemi sırasında hadde yönü, tavlama ve zımbayı levha üzerinde bırakma gibi parametrelerin geri yaylanma üzerinde etkilerini incelemişler. Hadde yönünün alüminyum alaşımların bükme işleminde büyük bir etkisi olduğunu, tavlama ve zımbayı levha üzerinde bekletmenin geri yaylanma miktarını azalttığını yaptıkları deneyler ile ortaya koymuşlardır [13].

Gisario, Barletta ve Venetacci, titanyum ve alüminyum alaşımı ile yaptıkları çalışmada, geliştirdikleri bükme kalıbını lazer ile desteklemişlerdir. Normalde sadece uygulanan kuvvet ile numuneleri bükememelerine karşılık, lazer ile bükme bölgesini ısıtarak daha düşük kuvvetlerde bükme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Bükme bölgesinin ısıtılmasının malzemenin akma noktasını düşürdüğünü ve artık gerilmeleri azalttığını belirtmişlerdir [14].

Singh, Kim ve Choi, V bükme işlemini magnezyum alaşımlarında çalışmışlar ve bükme sırasında mekanik davranışların diğer malzemelerden (çelik, alüminyum) farklı olduğunu deneysel ve SEY ile ortaya koymuşlardır [15].

Ahmadi, Sadeghi ve Arabi, 304 L paslanmaz çelik ile V bükme çalışması yapmışlardır. Hadde yönünde bükülen malzemelerin mikro yapılarını incelediklerinde, östenit – martenzit dönüşümünün basma ve çekme bölgelerinde 90° 'den, 30° 'ye doğru gidildikçe, yani, bükme açısı azaldıkça arttığı tablo ile ortaya koyulmuştur. Ayrıca, en yüksek sertliğin 1,5 mm kalınlıktaki numunenin 30° bükümü sonrası elde edildiği grafiksel olarak gösterilmiştir [16].

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Levhaların bükme ile şekillendirilmesi endüstride çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstrideki yaygın kullanımı ve bükme işlemini etkileyen parametrelerin çokluğundan dolayı, bükme işlemi geniş bir araştırma alanına sahiptir.

Endüstride levha ile ürün imalatı sırasında kullanılan levha malzemelerin kalınlığına ve mekanik özelliklerine dikkat edilmeden üretim yapılabilmektedir.

Yapılacak bu üretim sonrası istenilmeyen bir ürün elde etmek işletmeye fazladan maliyet olarak yansıyacaktır. Bu durumu engellemek için malzeme mekanik özellikleri ve levha kalınlığının bükme davranışına etkisini incelemek gereklidir.

Gerçekleştirilen bu çalışmanın amacı, endüstride yaygın olarak kullanılan DKP, Galvaniz ve Paslanmaz çelik levhaların mekanik özelliklerini değerlendirmek, levha kalınlığı, malzeme çeşidi ve hadde yönü dışındaki parametrelerin sabit tutularak yapılacak havada bükme işlemi sonucu, bu değişkenlerin bükme davranışları üzerine olan etkilerini geri ve ileri yaylanma hareketleri üzerinden incelemektir. Sonuç olarak doğru büküm yapılabilmesi için gerekli çıkarımları, yapılan deneyler ve analizlerin yorumlanması ile tablo ve grafikler halinde ortaya koymaktır.

2. TİCARİ LEVHALAR

Ticari levhalar/saclar, endüstride ürün imalatı sırasında kullanılacak sac veya rulo olarak bulunan metallere verilen genel bir isimdir. Bu metaller genellikle soğuk şekil verme işleminde kullanılırlar. Ticari levhalar endüstriyel ortamda, taşıtlar, beyaz eşyalar, soğutmalı teşhir kabinleri, makineler, elektronik aletler, ofis elemanları v.d. birçok alanda kullanılmaktadırlar. Ticari levhalar, kullanılan alanlarda gerekli mukavemeti ve işlenebilirliği düşük maliyetle sağladığı için ülkemizde de çok fazla tercih edilmektedir.

Levhalar, malzeme gruplandırılmalarında çok fazla çeşitlilik göstermektedirler. Ülkemiz endüstrisi başta olmak üzere, bükme ile ürün imal eden işletmelerde en çok kullanılan levha tipleri galvanize çelikler, DKP ve paslanmaz çeliklerdir. Aşağıdaki tablolarda endüstride yaygın olarak kullanılan paslanmaz çelik, DKP ve galvaniz levhaların üreticileri tarafından verilen mekanik özellikleri gösterilmiştir. [17], [18].

Tablo 2.1: 304 ve 304L kalite paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri.

Özellikler	304		304L	
	Tipik	En az	Tipik	En az
σ_u (MPa)	600	515	590	485
σ_y (MPa)	310	205	310	170
El (%)	60	40	60	40

Tablo 2.2: 316 kalite paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri.

Özellikler	316		316L		316Ti	
	Tipik	En az	Tipik	En az	Tipik	En az
σ_u (MPa)	580	515	570	485	600	515
σ_y (MPa)	310	205	300	170	320	205
El (%)	55	40	60	40	50	40

Tablo 2.3: 430 kalite paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri.

Özellikler	Tipik	En az
σ_u (MPa)	530	450
σ_y (MPa)	360	205
El (%)	25	22

Tablo 2.4: DKP çeliklerin mekanik özellikleri.

Standart	Kalite	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	El (%)
EN 10111	DD11	440	170 – 340	23 – 28
	DD12	420	170 – 320	25 – 30
	DD13	400	170 – 310	28 – 33
	DD14	380	170 - 290	31 - 36

Tablo 2.5: Galvanize çeliklerin mekanik özellikleri.

Standart	Kalite	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	El (%)
EN 10346	DX51D+Z	270 – 500	-	22
	DX52D+Z	270 – 420	140 – 300	26
	DX53D+Z	270 – 380	140 – 260	30
	DX54D+Z	260 – 350	140 – 220	36
	DX56D+Z	260 - 350	120 - 180	39

Bu tezin yazıldığı gün itibariyle çalışma sırasında kullanılan levhaların 1 ton başına maliyetleri Tablo 2.6’da verilmiştir.

Tablo 2.6: Tez çalışmasında kullanılan levhaların maliyetleri.

	Galvaniz			DKP	Paslanmaz
Kalınlık	1 mm	1,5 mm	2,5 mm	2,5 mm	2,5 mm
Fiyat (\$)	750	685	670	680	2630

Genel olarak çalışmada kullanılan çelik levhalar göz önüne alındığında Paslanmaz malzemenin en yüksek maliyete sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebepleri, Paslanmaz levha üretimi sırasında kullanılan alaşım elementleri ve üretim

prosesidir. Paslanmaz elik yapısında yüksek oranda Krom alaşımı içermektedir. Levha haline getirilecek Paslanmaz elik döküm işlemi ardından sırasıyla kaba ve sıcak haddeme işlemlerinden sonra i yapılarının homojenleştirilmesi için tavlama işlemine tabii olurlar. Paslanmaz elikler mükemmel korozyon direnci ve yüksek mukavemete sahiptirler ve kimyasal bileşimleri değiştirilerek amaca uygun hale getirilebilirler, bu sebepten kullanım alanları oldukça geniştir.

Galvaniz levhalar istenilen kalınlıkta elde edilebilmesi için döküm sonrası soğuk haddelemeye tabii tutulur ve daha sonrasında yüzeyi çinko ile kaplanır. Üretilen levhada kalınlık azalması maliyet artışına sebep olmaktadır. Bunun nedeni kalınlık azaltmak amaçlı Galvaniz levhanın daha fazla haddeme işlemine tabii tutulmasıdır. DKP levhalar mukavemet değerleri Galvaniz levhalara yakın olmasına rağmen üretimi sırasında sıcak haddelenmesi aralarındaki az da olsa maliyet farkına sebep olmaktadır. Galvaniz levhaların yüzeyinin çinko ile kaplanması korozyon direnci sağlamaktadır. Bu sebeple Paslanmaz çeliklere göre düşük mukavemet ve yüksek korozyon direnci istenilen uygulamalarda Galvaniz levhalar tercih edilmektedir. rnek olarak yüksek mukavemet ve korozyon direnci gerektiren basınçlı kap imalatında Paslanmaz elik tercih edilirken, sadece korozyon direncinin önemli olduğu soğutmalı teşhir kabinin alt gövdesinde Galvaniz elik tercih edilmektedir.

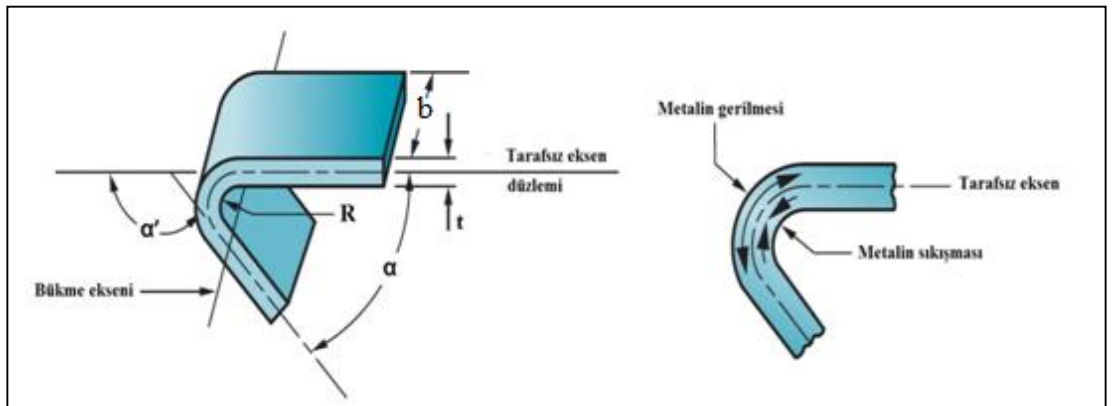
3. BÜKME

Bükme, en yaygın olarak kullanılan metal şekillendirme yöntemlerinden biridir. Tanım olarak levhalar, plakalar, borular, teller ve kesitlerin belirli bir bölgesinde deformasyon oluşturulmasıyla uygulanan yaygın bir metal işleme yöntemidir [19].

Bükme, iş parçası düz bir eksen etrafında döndürülerek gerçekleştirilir. Bu şekillendirme işleminde levha üzerinde plastik ve elastik deformasyonlar meydana gelmektedir.

3.1. Bükme İşlemi

Bükme işlemi sırasında iş parçasının iç ve dış yüzeylerinde gerinim meydana gelmektedir. Malzeme kalınlığının iş parçasının bükülen kısmında değişmediği kabul edilirse, tarafsız eksen malzemenin ağırlık merkezinden geçmektedir. Bükme işleminde, dış yüzeyde meydana gelen gerilmeler, iç yüzeyde meydana gelen gerilmelerden, dolayısıyla gerinimler, daha fazla olmakta, tarafsız eksen malzemenin iç yüzeyine doğru yer değiştirmektedir. Tarafsız eksen başlangıç çizgisi kabul edilerek malzemenin dış yüzeyine doğru gidildikçe çekme kuvvetleri, iç kısma doğru ise basma kuvvetleri ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.1’de iş parçasının bükülmesi ve ortaya çıkan gerilmeler gösterilmiştir [20].



Şekil 3.1: Bükme işlemi ile oluşan gerilmeler.

- α : Büküm açısı ($\alpha + \alpha' = 180^\circ$)
- b: Levha genişliği

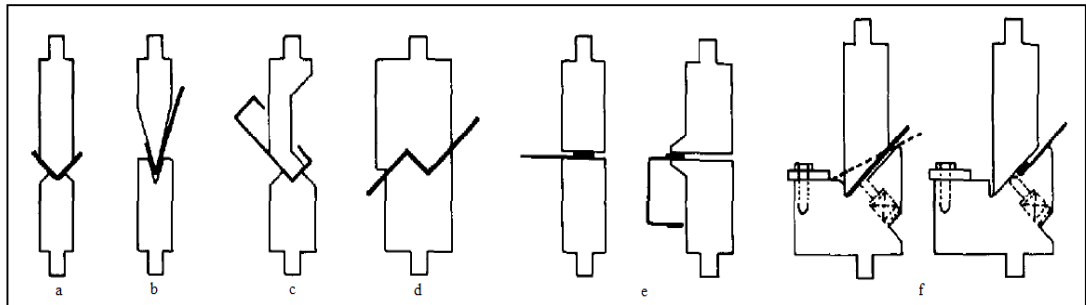
- R : Büküm yarıçapı
- t : Levha kalınlığı

İş parçasının bükülmesi genel olarak malzeme kalınlığına, malzeme özelliklerine, bükme açısına, bükme yarıçapına, bükme kuvvetine bağlıdır. Bükme işleminde en dikkat edilmesi gereken husus ise ileri ve geri yaylanma davranışlarıdır.

3.2. Bükme İşlem Çeşitleri

Bükme işlemleri ile metal şekillendirme DIN 8586 standardına göre; lineer kalıp hareketi ile bükme ve döner kalıp hareketi ile bükme olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır [21]. Bu çalışmada lineer kalıp hareketi ile bükme kullanılmış ve endüstride en çok kullanılan çeşitleri detaylandırılmıştır.

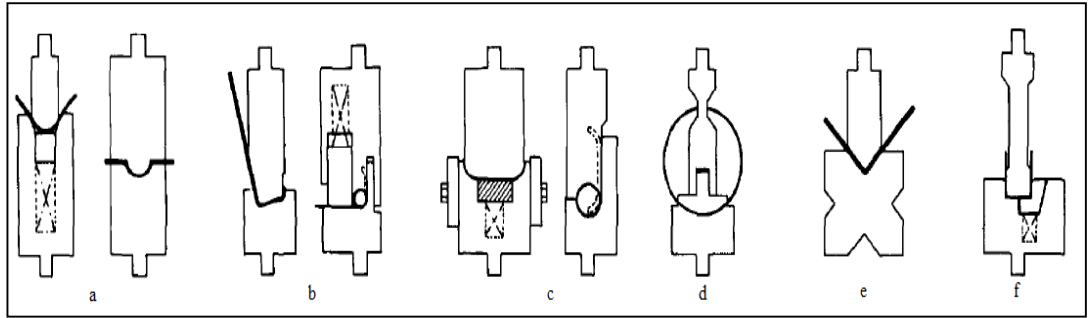
Lineer kalıp hareketi ile bükmede kalıp tek bir eksen üzerinde doğrusal olarak hareket etmektedir. Bükmenin yapıldığı kalıba veya malzemenin aldığı son şekle göre, bükme çeşitleri endüstride farklı isimlerle anılabilmektedir. Lineer kalıp hareketi ile bükme kalıplarından örnekler verilerek, endüstride en çok kullanılan V bükme, kenar bükme ve serbest (havada) bükme daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır.



Şekil 3.2: Bükme işlem çeşitleri – 1.

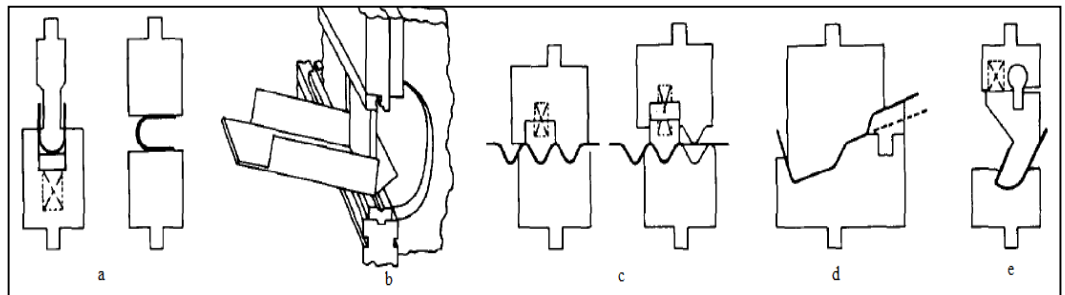
90°'lik bükme kalıbı çoğunlukla ezme kalıbı olarak adlandırılıp, kullanımı sırasında ezme özelliklerinin göz önüne alınması gerekmektedir (Şekil 3.2.a). Genel anlamda, 90°'lik kalıplarda zımba uç radyüsü malzeme kalınlığından az olmamalıdır. Yüksek çekme gerilimine sahip malzemelerin bükümünde zımba uç radyüsü daha büyük olarak kullanılır. Dar açılı V bükme veya havada bükme işlemi, bükme açısının kritik olmadığı durumlarda 90°'lik V bükme kalıbında yapılabilir (Şekil

3.2.b). Bunun dışında, daha geniş veya dar açılı bükümler makine ayarları değiştirilerek gerçekleştirilebilir. Kaz boynu kalıp ile bükme (Şekil 3.2.c), 90°'lik V bükmeye benzer, ancak kullanımı sırasında fazla yükleme durumları ortaya çıkabileceğinden dikkatli olunmalıdır. Ofset bükme (Şekil 3.2.d), iki adet 90° veya dar açılı bükmeyi aynı anda yapabilir. Kenar katlama, adında da anlaşılacağı üzere kenar yapımlarında kullanılır (Şekil 3.2.e). Ön büküm yapılan levhaların bükülebileceği gibi, tek kalıpta önce açılı büküm, daha sonrasında katlama yapılabilir (Şekil 3.2.f) [22].



Şekil 3.3: Bükme işlem eşitleri – 2.

Radyüs bükme (Şekil 3.3.a), genellikle radyüsün malzeme kalınlığının 4 katından fazla olması gereken durumlarda kullanılmaktadır. Kıvrırma bükme (Şekil 3.3.b), parça ucunun yuvarlatılması veya halka şeklinde kullanılabilmesi amacıyla yapılır. Tüp, boru bükme, kıvrırma bükmeye çok benzemekte, küçük borular ön bükme (Şekil 3.3.c) ile yapılırken, büyük borular tek kalıp (Şekil 3.3.d) ile yapılabilirler. 4 taraflı bükme (Şekil 3.3.e), küçük parçaların kısa zamanda, seri olarak yapılabilmesi amacıyla kullanılır. Kanal bükme (Şekil 3.3.f), kaz boynu ile üretilebilecek kanalların tek bir kalıp ile üretilmesini sağlar [22].

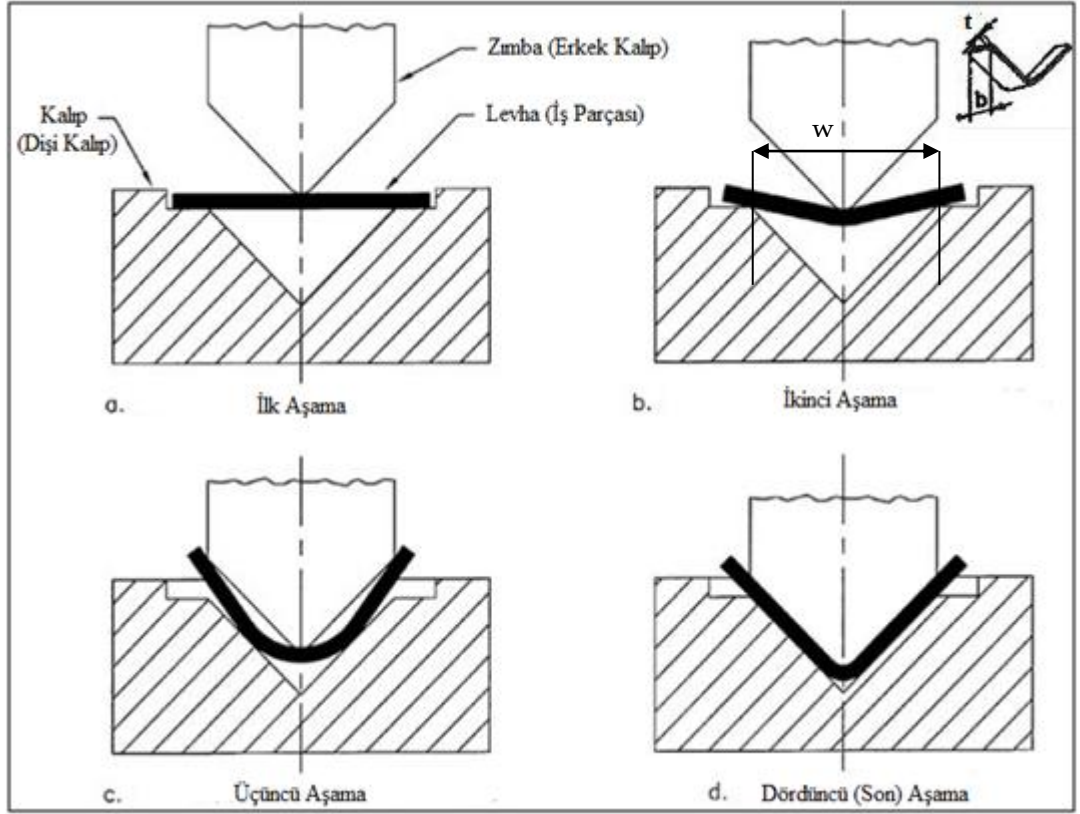


Şekil 3.4: Bükme işlem çeşitleri – 3.

U bükme (Şekil 3.4.a), kanal bükme ile çok benzemesine rağmen geri yaylanma miktarı çok fazladır. Geri yaylanma etkisi azaltmak için ikinci bir kalıp kullanılır. Kutu bükme (Şekil 3.4.b), özel üretimler için kullanılmaktadır. Zımba uzun, kalıp ise kısa olarak kullanılmaktadır. Oluk bükme (Şekil 3.4.c), daha çok birden çok oluğu aynı anda üretmek için uygulanmaktadır. Çoklu bükme (Şekil 3.4.d), tek bir vuruşta tüm bükümlerin yapılabilmesi için uygulanmaktadır. Pabuç bükme (Şekil 3.4.e), dik konumda uygulanamayan pabuç ve benzeri parçaların bükülmesinde uygulanır [22].

3.2.1. V Bükme

V bükmede hem zımba, hem de kalıp V şeklindedir. Zımba ve kalıp arası açıklık sabit ve levhanın kalınlığı kadardır [23]. Ancak, zımba ucu her zaman köşegen olmak zorunda değil, radyüslü de olabilir. Bükme işleminde, zımba (erkek kalıp) aşağıya doğru inerken ilk olarak desteksiz levha ile temas eder (Şekil 3.5.a). Zımba levhanın bükülecek bölgesine bastırır. Levha bükme kolları yukarı doğru hareket ile kalıp radyüsleri etrafında çok az hareket eder (Şekil 3.5.b). Zımba aşağıya doğru hareket ettikçe, diğer bir anlamda, bükme olayı devam ettikçe levha bükme kollarının hareketi devam eder (Şekil 3.5.c). Son durumda zımba tam olarak levha üzerine kapanmış ve levha zımba-kalıp arasında temas halindedir (Şekil 3.5.d). Zımba kaldırıldığında bükme tamamlanmaktadır. Şekil 3.5 V bükme olayının aşamalarını göstermektedir [24].



Şekil 3.5: V bükme aşamaları.

V bükmede bükme kuvveti hesabı Eş. 3.1'e göre yapılmaktadır [25].

$$P_b = \frac{c \times t^2 \times b \times \sigma_u}{w} \quad (3.1)$$

c, levha kalınlığı ve kalıp açıklığına bağlı olup Eş. 3.2'e göre hesaplanır.

$$c = 1 + \frac{4t}{w} \quad (3.2)$$

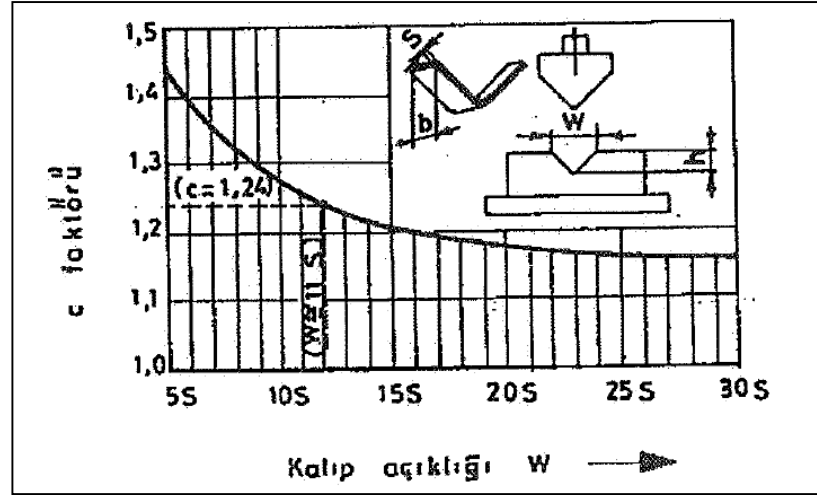
P_e emniyetli kalıplama kuvveti Eş. 3.3 ile bulunur.

$$P_e = 2P_b \quad (3.3)$$

- P_b : Bükme kuvveti (N),
- P_e : Son bükme kuvveti (N),
- b: Levha genişliği (mm),
- t : Levha kalınlığı (mm),

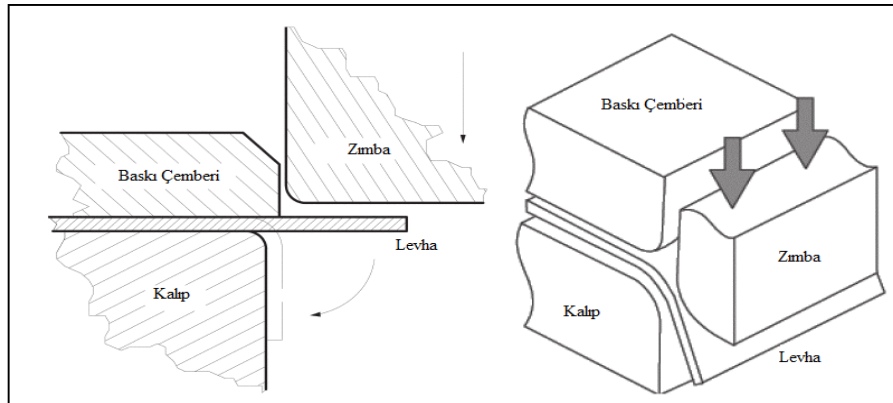
- σ_u : Çekme mukavemeti (N/mm²),
- w : Kalıp ağız açıklığı (mm)
- c : t / w oranına bağlı bir katsayı

c katsayısı ek kuvvetleri karşılamak için denklem içerisinde çarpılmaktadır. c katsayısına Şekil 3.6'dan ulaşmak mümkündür [25].



Şekil 3.6: c katsayı diyagramı.

3.2.2. Kenar Bükme



Şekil 3.7: Kenar bükme.

Kenar bükme işleminde levha, yay veya hidrolik silindir ile yüklenmiş bir baskı çemberi ile tutulur. Zımbanın aşağıya hareketi ile malzemeye şekil verilir. Bükülecek kısmın uzunluğu diğer kısımlara göre daha kısa isteniyorsa bu bükme tarzı tercih

edilir. Zımba ile kalıp arası boşluk malzeme kalınlığı kadardır. Şekil 3.7’de kenar bükme işlemini göstermektedir [26].

Kenar bükmede bükme kuvvet hesabı Eş. 3.4’e göre yapılmaktadır [22].

$$P_w = \frac{0,333 \times t^2 \times b \times \sigma_u}{A} \quad (3.4)$$

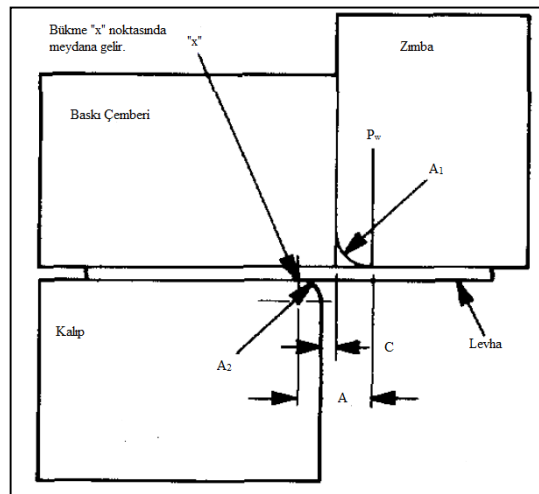
- P_w : Bükme kuvveti (N),
- b : Levha genişliği (mm),
- t : Levha kalınlığı (mm),
- σ_u : Çekme mukavemeti (N/mm²),

A mesafesi Eş. 3.5’e göre verilmektedir. Şekil 3.8’de kenar bükme kuvvet hesabındaki veriler gösterilmektedir [22].

Şekil 3.8’de belirtilen;

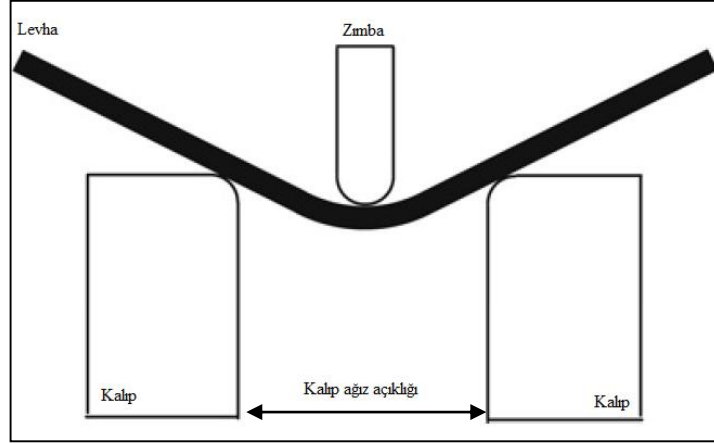
$$A = A_1 + C + A_2 \quad (3.5)$$

- A_1 : Zımba radyüsü (mm),
- A_2 : Kalıp radyüsü (mm),
- C : Zımba-kalıp arası boşluk (mm)



Şekil 3.8: Kenar bükme kuvvet hesap verileri.

3.2.3. Serbest (Havada) Bükme



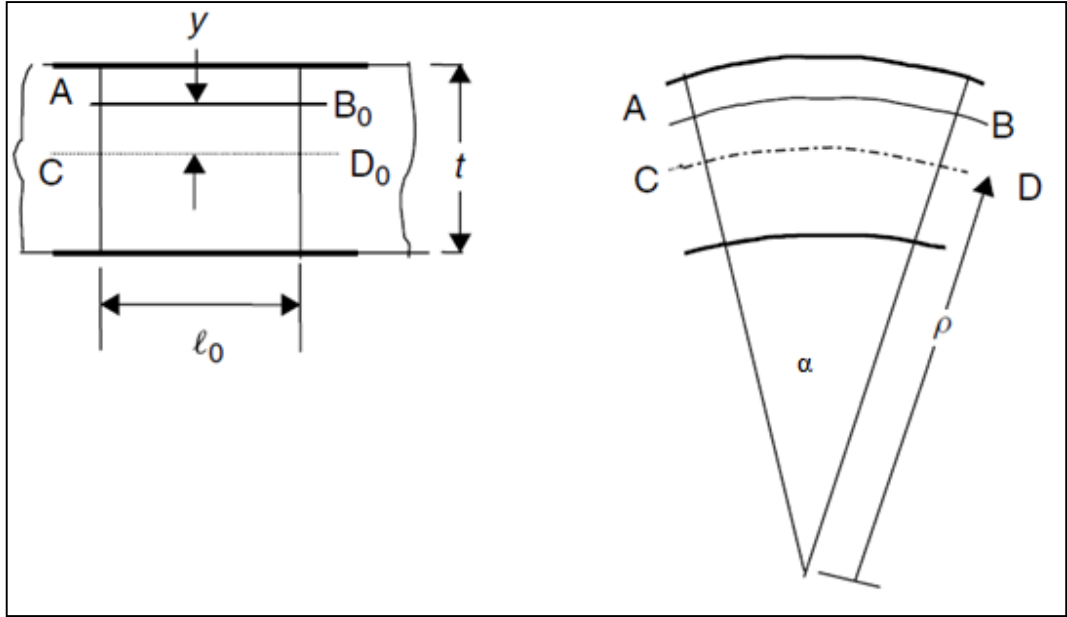
Şekil 3.9: Serbest bükme.

Serbest bükme, levha kenarları kalıplar tarafından desteklenir ve zımbanın aşağıya doğru hareketi ile bükme işlemi gerçekleşir. Şekil 3.9’da serbest bükme gösterilmektedir [27]. Yapı olarak V bükmeye çok benzemesine rağmen, aradaki en büyük fark bükülecek iş parçasının, işlem başından sonuna kadar desteksiz olmasıdır. Bu bükme işlemine 3 noktadan bükme de denmektedir. Diğer bükme türlerine göre en büyük avantajı; farklı açılarda bükme yapmak için kalıp değişime gerek duyulmamasıdır [26]. Serbest bükme işlemi V bükme kalıplarında da yapılabilir.

Serbest bükme işleminde bükme kuvveti Eş. 3.1’de verilen V bükme formül ile bulunabilir.

3.3. Bükme Mekanikliği

Bükme işlemi, malzeme içerisindeki tarafsız eksen den uzaklığa bağlı olarak meydana gelen gerinimlerden kaynaklanmaktadır. Şekil 3.10’da malzemenin bükülen bölgesindeki değişimler gösterilmektedir [28].



Şekil 3.10: Bükme bölgesi geometrileri.

3.3.1. Bükme Geometrisi ve Düzlemsel Gerinim

Şekil 3.10'da verilen $\overline{CD}_0$ doğru parçası sacın kalınlığının orta kısmından geçmekte ve malzeme bükülmeden önceki tarafsız eksen ile çakışmaktadır. Bükme işlemi ile birlikte, tarafsız eksen malzemenin iç yüzeyine doğru kaymakta, $\overline{CD}_0$ doğru parçası uzayarak $\widehat{CD}$ haline gelmektedir. İlk durumdaki boyu l_0 ise; son durumdaki boyu l_s haline gelmektedir.

$$l_s = \rho \alpha \quad (3.6)$$

Bükme kesitinin merkezinden y birim uzaklıktaki $\overline{AB}_0$ doğru parçasının boyu, $\widehat{AB}$ haline gelerek boyu l değerine ulaşmaktadır.

$$l = \alpha (\rho + y) = \rho \alpha \left(1 + \frac{y}{\rho}\right) \quad (3.7)$$

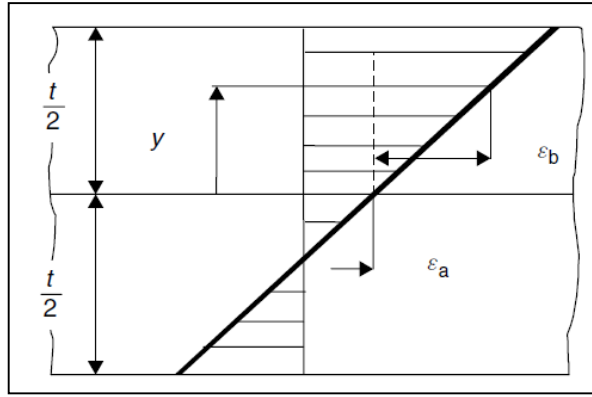
Eş. 3.6, Eş. 3.7'de yerine yazılırsa;

$$l = l_s \left(1 + \frac{y}{\rho}\right) \quad (3.8)$$

3.8 eşitliği elde edilir. AB yayındaki eksenel gerinim ise;

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{ls}{l_0} + \ln \left(1 + \frac{y}{\rho}\right) = \varepsilon_a + \varepsilon_b \quad (3.9)$$

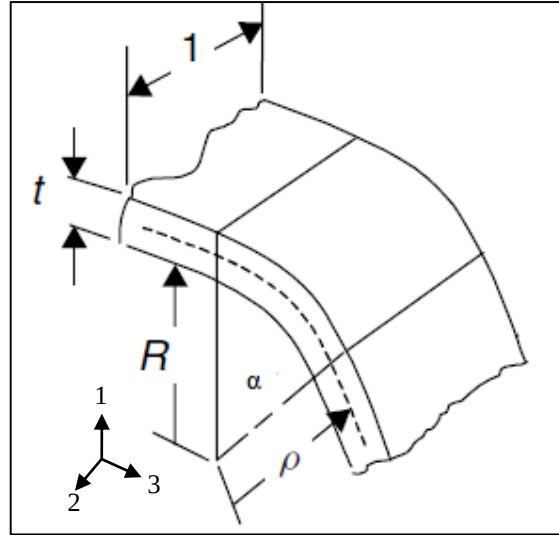
Bükme yarıçap değeri, levhanın kalınlığına göre büyük olduğundan, bükme işleminden meydana gelen gerinim miktarı Eş. 3.9'daki gibidir. Buradaki ε_a merkezdeki gerinim miktarını, ε_b ise bükme sırasındaki gerinimi ifade etmektedir (Şekil 3.11) [28].



Şekil 3.11: Varsayılan gerinim.

Eğer Şekil 3.12'deki gibi bir birim levhanın büküm bölgesi malzeme genişliği taraflarında deforme olmuyorsa, malzemede düzlemsel gerinim oluyor demektir. Levha genişliği, kalınlığından çok daha büyük olduğundan malzeme genişliği yönündeki gerinimleri ihmal edilebilir [29]. Yani, bükmeye paralel (malzeme genişlik yönünde) gerinimi sıfırdır. Bu durumda izotropik bir levhada [28];

$$\begin{aligned} \varepsilon_1; \quad \varepsilon_2 = 0; \quad \varepsilon_3 = -\varepsilon_1 \\ \sigma_1; \quad \sigma_2 = \sigma_1/2; \quad \sigma_3 = 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$



Şekil 3.12: Birim genişlikteki levha.

Bu şekil değişimi dikkate alındığında, Eş. 3.11 ve Eş. 3.12'deki Von Mises akma kriteri kabulü ile birlikte, Eş. 3.13 ve Eş.3.14 elde edilir.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3.11)$$

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{9}[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]} \quad (3.12)$$

Eşitlik 3.10'daki değerler, Eş. 3.11 ve Eş. 3.12'de yerine yazılırsa;

$$\sigma_1 = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right) \sigma_f = S \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \bar{\varepsilon} \quad (3.14)$$

3.3.2. Bükme İşleminde Malzeme Modelleri

Bükme işleminde malzeme modeli seçimi, gerinim büyüklüğüne bağlıdır. Gerinim ise temel olarak bükme oranına bağlıdır. Bükme oranı ρ/t olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak bükme sırasında malzemeler plastik sertleşme davranışı sergilerler. Ancak, işlemlerin analizi uygulamada kolaylık sağlanması

açısından daha basit malzeme modelleri seçilebilmektedir. Bükme işlemlerinde elastik bükme, rijit – mükemmel plastik bükme, elastik – mükemmel plastik bükme ve deformasyonla sertleşen malzeme bükme modelleri bulunmaktadır. [28].

3.3.2.1. Elastik-Mükemmel Plastik Bükme Modeli

Eğriliğin elastik sınırı geçtiği ve momentin tam plastik momentin altında kaldığı durumlarda genellikle elastik-mükemmel plastik bükme modeli kullanılır. Bu modelde düzlem gerinim hali için gerilme değeri (3.13) eşitliğinden elde edilmektedir. y değeri, tarafsız eksenenden elastik sınıra kadar olan uzaklık, y_e değerini aştığında, malzeme S akma dayanımında plastik özellik göstermeye başlar. Eğriliğin artmasıyla, y_e değeri azalır [28].

$$(\varepsilon_b)_{y=y_e} = \frac{y}{\rho} = \frac{S}{E'} \quad (3.15)$$

$$y_e = \frac{S}{E'} \frac{1}{(1/\rho)} = m \frac{t}{2} \quad (3.16)$$

$$m = \frac{(1/\rho)_e}{(1/\rho)} \quad (3.17)$$

ve $0 \leq m \leq 1$ şeklindedir.

İşlem sırasındaki bükme momenti ise 3.18 eşitliğinde belirtilmektedir.

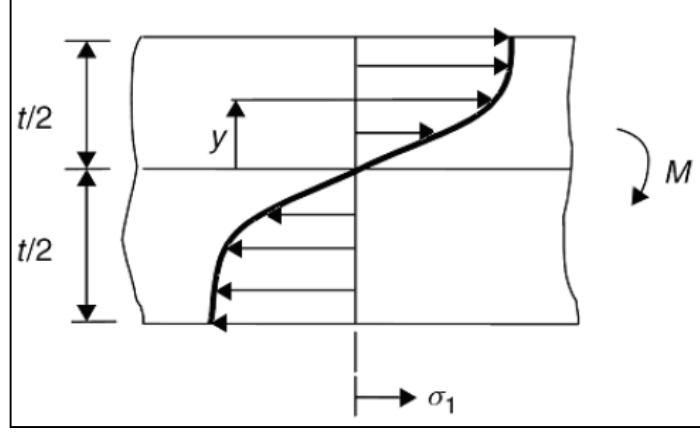
$$M = 2 \left\{ \int_0^{y_e} E' \frac{y}{\rho} y dy + \int_{y_e}^{t/2} S_y dy \right\} = \frac{S t^2}{12} (3 - m^2) \quad (3.18)$$

Bu eşitlikte m yerine 1 yazılması halinde elastik bükme, 0 yazılması halinde ise rijit – mükemmel plastik bükme modeli moment değerleri elde edilmiş olur.

Şekil 3.13 bu modeldeki gerilme dağılımını, Şekil 3.14 ise moment-eğrilik değişimini göstermektedir.

3.3.2.2. Deformasyonla Sertleşen Malzeme Bükme Modeli

Metaller ve alaşımlarda, artan yük ile birlikte kalıcı deformasyonların artması, sonuç olarak malzeme mukavemetinin artırılması işlemine deformasyon ile sertleşme adı verilir. Deformasyonla sertleştirme işlemi, ısıl işleme yanıt vermeyen metal ve alaşımlar üzerinde uygulanan önemli bir endüstriyel prosestir [31].



Şekil 3.15: Deformasyonla sertleşen malzeme bükme modeli gerilim dağılımı.

Bu modelde, tüm kesitin plastik olarak deforme olduğu yaklaşımında bulunmaktadır. Gerilim dağılımı Şekil 3.15’de gösterilmektedir. Tarafsız eksenenden y kadar uzaklıktaki gerilim;

$$\sigma_1 = K' \varepsilon_1^n \approx K' \left(\frac{y}{\rho} \right)^n \quad (3.19)$$

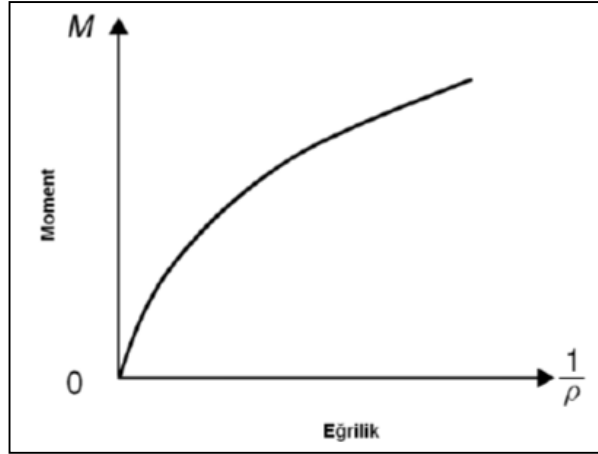
şeklinde ifade edilmektedir [28]. Moment denklemi ise;

$$M = 2K' \left(\frac{1}{\rho} \right)^n \int_0^{t/2} y^{1+n} dy = K' \left(\frac{1}{\rho} \right)^n \frac{t^{n+2}}{(n+2)2^{n+1}} \quad (3.20)$$

$$\frac{M}{I_n} = \frac{\sigma_1}{y^n} = K' \left(\frac{1}{\rho} \right)^n \quad (3.21)$$

$$I_n = \frac{t^{n+2}}{(n+2)2^{n+1}} \quad (3.22)$$

olarak elde edilmektedir. Moment-eğrilik diyagramı şekil 3.16’da gösterilmiştir [28].

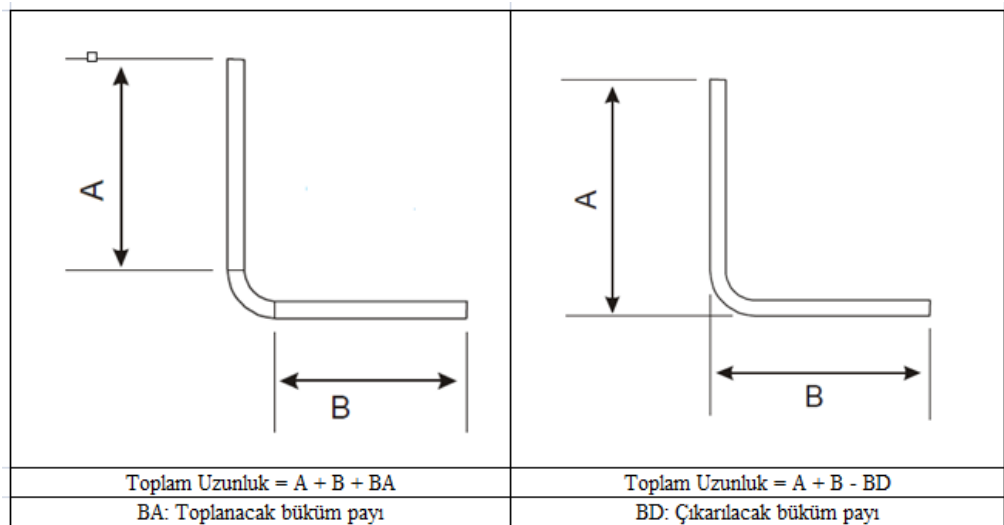


Şekil 3.16: Deformasyonla sertleşen malzeme bükme modeli moment-eğrilik grafiği.

3.4. Bükme İşlemi Açınım Hesaplama

Bir iş parçası büküldüğünde malzemenin dış yüzeyi uzarken, iç yüzeyi ise sıkışmaya maruz kalmaktadır. Levhanın büküm sonrası ne kadar uzadığını veya sıkıştığını hesaplamak zordur. Bu yüzden, son olarak elde etmek istediğimiz ürünün geometrisi için bazı hesaplamalar yapılması gereklidir. Bu hesaplamalar günümüz teknolojisinde, direkt olarak bükme için kullanılan bilgisayarlı makineler kendi programların, tasarım programlarında, bükme testi ile elde edilmiş bükme tabloları yardımıyla yapılabilir.

Levha açınımı hesaplamaları Şekil 3.17’de verilmiştir [32].



Şekil 3.17: Büküm işleminde açınım hesaplamaları.

Bükme işleminde tarafsız eksen yer değiştirmektedir. Açınım hesabında payların değerini bulabilmek için Eş. 3.23 kullanılır [32].

$$BA = \pi (R + Xt) \alpha / 180 \quad (3.23)$$

Bu eşitlikte X simgesi K-faktörü olarak bilinmekte ve levha kalınlığı-tarafsız eksenin malzeme iç yüzeyine olan uzaklığı oranına bağlıdır. Çıkarılması gereken BD payı ise;

$$BD = 2OSSB - BA \quad (3.24)$$

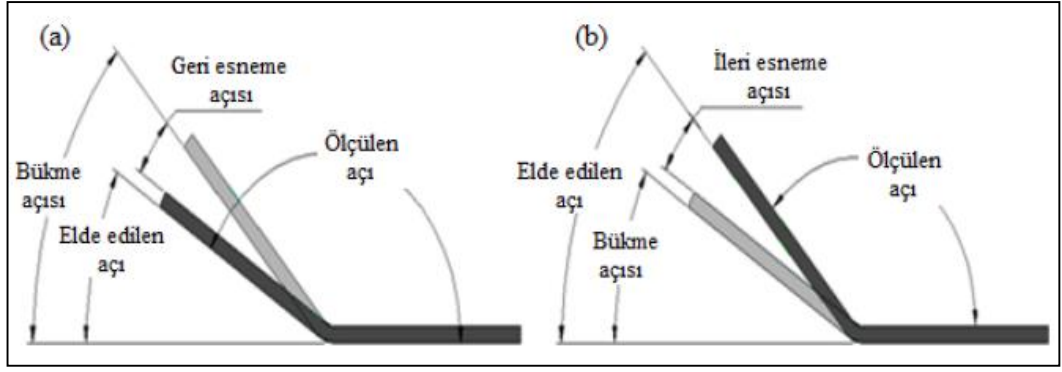
$$OSSB = \tan(\alpha/2) (t + R) \quad (3.25)$$

şeklinde ifade edilir [32]. OSSB, 3.17 şeklinde belirtilen, eklenecek BA kısmındaki A ve B ayaklarından sonra kalan düz uzunluklardır.

Genel formüller dışında, deneysel olarak elde edilen sonuçlarda mevcuttur. 2013 yılında Satoshi Sakai isimli bir girişimci bükme metodu ile ilgili patent almış bulunmaktadır [33].

3.5. Bükme İşleminde Geri ve İleri Yaylanma Hareketleri

Bükme işlemi ile üretilecek ürünün istenilen açı ve ölçüye sahip olması için en dikkat edilmesi gereken husus geri ve ileri yaylanma hareketleridir. Geri yaylanma, bükme kuvvetinin şekil verilecek malzeme üzerinden kaldırılmasından sonra, malzeme içindeki kalıntı gerilimlerin elastik olarak yeniden dağılımdan dolayı ortaya çıkan bir olay olarak tanımlanmaktadır [34]. Şekil 3.18’de bükme işleminde ortaya çıkan geri ve ileri yaylanma hareketlerini göstermektedir.



Şekil 3.18: Bükme işleminde a) geri ve b) ileri yaylanma hareketleri.

Geri esneme faktörü, GEF, eşitlik 3.26 ile ifade edilmektedir [35];

$$GEF = \frac{\alpha}{\alpha_d} = \frac{R_d + (t/2)}{R + (t/2)} \quad (3.26)$$

Bu eşitlikte;

- α : Büküm (ölçülen) açısı ($^{\circ}$),
- R_d : Dişi kalıp kavis yarıçapı (mm),
- R : Büküm yarıçapı (mm),
- α_d : Dişi kalıp açısı ($^{\circ}$),
- t : Levha kalınlığı (mm),

olarak belirtilmektedir.

Geri ve ileri yaylanma hareketlerine etki eden birden çok parametre mevcuttur. Bunlar;

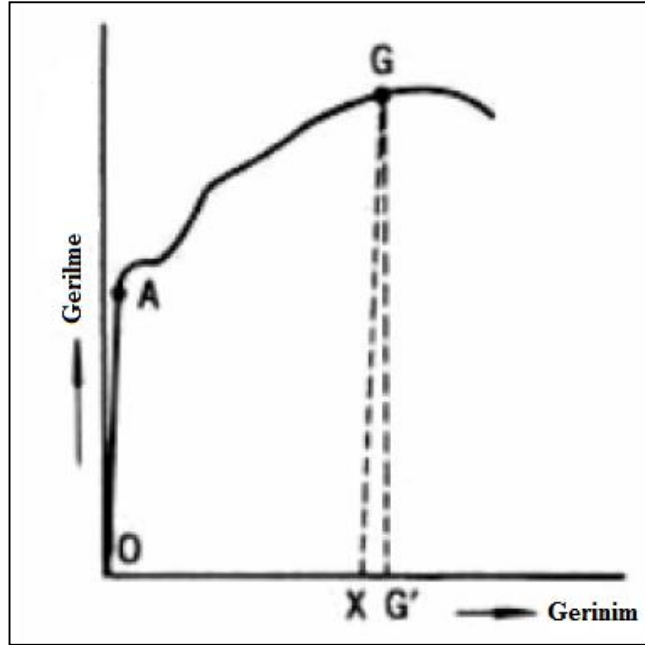
- Malzeme özellikleri,
- Malzeme kalınlığı,
- Malzeme hadde yönü,
- Bükme kuvveti,
- Zımbanın levha üzerinde bekleme süresi,
- Bükme açısı,

- Zımba radyüsü,
- Kalıp boşluğu,
- Bauschinger etkisi,
- Tane boyutu,
- Artık gerilimler,
- Pekleşme üsteli,
- Proses parametreleri,

olarak tanımlanabilirler. Bu etkiler başlıklar altında ayrıntılı incelenecektir.

3.5.1. Malzeme Özellikleri

Geri ve ileri yaylanma hareketleri malzemelerin özelliklerine göre değişiklikler göstermektedir. Bükülecek levhanın, elastik modülü, akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve kopma gerilmesi gibi mekanik özelliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Malzeme özellikleri gerilme-gerinim ilişkisiyle açıklanabilir.

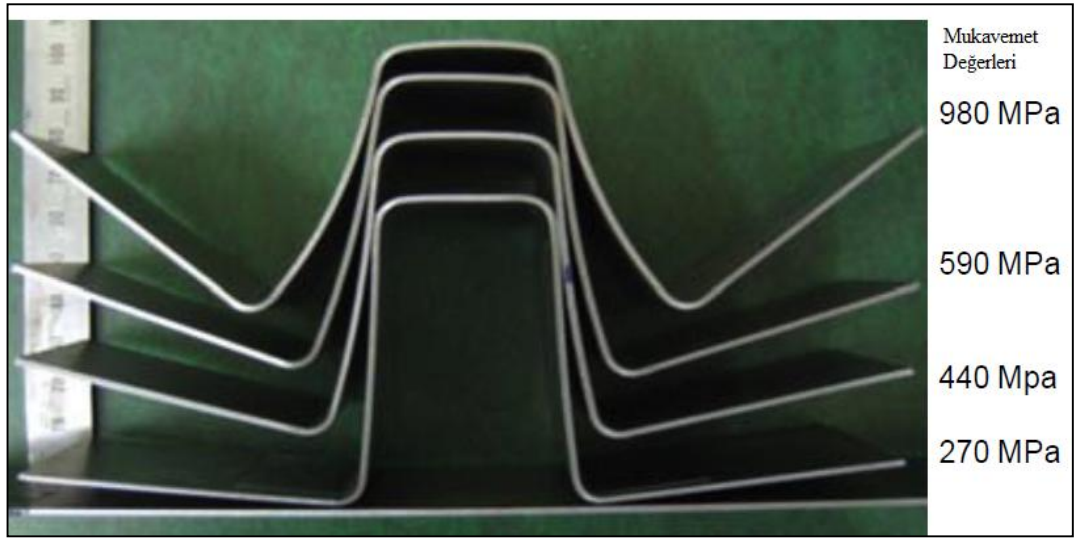


Şekil 3.19: Gerilme-gerinim eğrisi.

Şekil 3.19'daki gerilme-gerinim eğrisindeki G noktası, levhaya şekil verilirken uygulanan kuvvete ait gerilmeyi göstermektedir. $\overline{OA}$ doğrusu, gerilme-gerinim

ilişkisinin orantılı olarak değiştiği elastik bölgedir. Şekil verme işlemi sonrası, levha üzerindeki kuvvet kaldırıldığında gerinim X değerini almaktadır. Bu değer, malzemenin plastik bölgedeki elastikiyetini belirtmektedir. X-G' aralığı, levhanın eski haline dönmeye çalışan miktarını belirtmektedir. O-X aralığı ise, kalıcı deformasyon değerini belirtir. Bükme sırasında akma bölgesini aşan gerilmenin olduğu durumda geri yaylanma etkisi gözlenecektir [36].

Levha mukavemeti arttıkça geri ve ileri yaylanmanın arttığı birden çok çalışma ile ortaya koyulmuştur. Şekil 3.20'de Billur ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada bu durum açıkça gözlemlenmektedir [37].



Şekil 3.20: Malzeme mukavemeti – geri yaylanma ilişkisi.

3.5.2. Malzeme Kalınlığı

Bükülecek malzemenin kalınlığı geri ve ileri yaylanma hareketlerini etkileyen bir diğer faktördür. Literatürde deneysel, sonlu elemanlar analizi veya yapay sinir ağı sistemi ile yapılan çalışmalar incelendiğinde malzeme kalınlığının geri ve ileri yaylanma hareketi üzerine etkisi açıkça gözlemlenmektedir.

Artan levha kalınlığı ile geri yaylanma azalırken, tam tersi durumda, azalan levha kalınlığı ile geri yaylanma artmaktadır [38], [39], [40]. Ancak, geri yaylanmanın tersi trendinde, ileri yaylanma kalınlık arttıkça artma eğilimi göstermektedir [41].

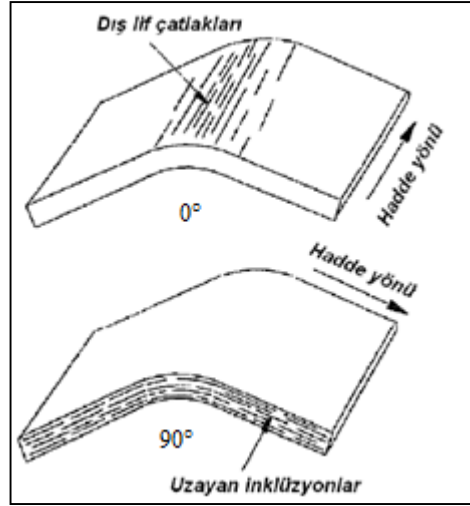
3.5.3. Malzeme Hadde Yönü

Genellikle levhalar farklı yönlerde farklı mekanik özellikler göstermektedirler. Yöne bağlı olarak mekanik özellikleri değişiklik gösteren malzemelere anizotropik malzeme denilmektedir. Yöne bağlı olarak mekanik özellikleri değişiklik göstermeyen malzemelere ise izotropik malzeme denilmektedir.

Anizotropi, mekanik ve kristalografik olarak iki bölümde incelenebilir. Mekanik anizotropi, safsızlıklar (metalik olmayan inklüzyonlar) ile impürite ve boşluk gibi süreksizliklerin malzeme yapısında yönlenmesi veya dağılımı ile ortaya çıkmaktadır. Örnek olarak çeliği ele alırsak, yapısındaki bir cüruf inklüzyonu haddeleme işlemi sonrası hadde yönünde uzayabilir ve sac yüzeyine paralel olacak şekilde düzleşebilir. Bu da çeliğin hadde yönüne dik olan çekme dayanımını, hadde yönüne paralel çekme dayanımından daha düşük kılabilmektedir. Mekanik anizotropi kırılmada ön plana çıkmaktayken kristalografik anizotropi daha çok plastik şekillendirme işlemlerinde önem kazanmaktadır [42].

Levhaların mekanik özellikleri yöne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu durum malzemelerin plastik şekillendirme işlemlerinden biri olan bükme işleminde de kendini göstermektedir. Literatürdeki çalışmalarda anizotropinin geri yaylanma üzerine etkisi bulunduğu anlaşılmaktadır [43], [44], [45].

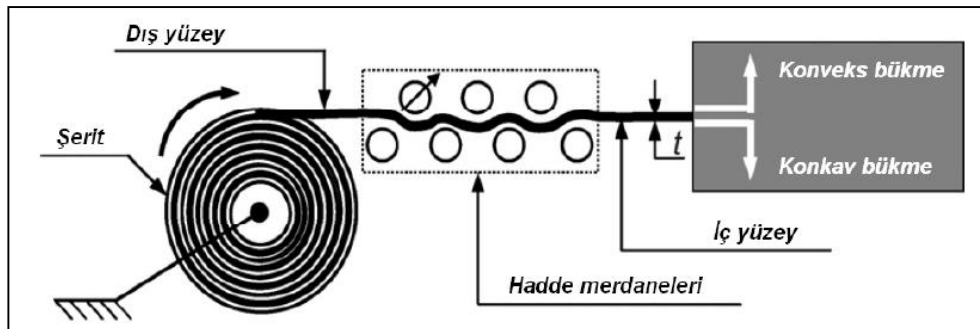
Malzemenin bükülmesi sonrası geri yaylanma miktarları levhaların normal anizotropi değerlerinde meydana gelen artışlar sonucunda artış göstermektedir [45]. Anizotropi ile geri yaylanma arasındaki ilişkinin doğru orantılı olduğu söylenebilir. Anizotropi nedeniyle malzemede meydana gelebilecek çatlaklar ve inklüzyonlardaki uzamalar Şekil 3.21’de gösterilmektedir [43].



Şekil 3.21: Hadde yönü ve haddeye paralel bükme geometrileri.

Anizotropi değeri arttıkça malzemenin deformasyona karşı direnci artmakta ve bu durum doğrultulara göre farklılık göstermektedir. Bükme eksenini hadde doğrultusuna dik gelecek şekilde gerçekleştirilen bükme işleminde malzemenin bükülebilirliği haddeye paralel doğrultuya göre iyileşmektedir [43]. Haddeye paralel doğrultuda alınan malzemelerde bükme sonrası geri yaylanma miktarı haddeye dik yöndeki geri yaylanmaya göre az olmaktadır [46].

Malzeme hadde yönünün etkisi rulo halindeki malzemelerden elde edilen levhalarda değişiklik göstermektedir. Bu durumda levhanın geçmişinin ön plana çıktığı söylenebilir. Rulo açıcılardan elde edilen levhanın şekillendirilmesi sırasında konveks ve konkav etki söz konusu olmaktadır. Bu etki, rulonun açım yönü ve malzemenin şekillendirme yönüne bağlı olarak değişmektedir (Şekil 3.22) [46].



Şekil 3.22: Konkav ve konveks bükme.

Konkav bükme işlemi levhanın rulo halindeki iç yüzeyine bakan tarafa bükülmesidir. Bu işlemde geri yaylanma miktarının daha fazla olduğu söylenebilir. Bunun nedeni malzeme geçmişindeki kalıntı gerilmelerdir. Konveks bükme işlemi ise levhanın rulonun dış yüzeyine bakan tarafa doğru bükülmesidir. Bu işlemde daha az kalıntı gerilmesine rastlandığından geri yaylanma daha az olmaktadır. Dolayısıyla istenilen parça geometrisinin elde edilmesi için konveks bükme işlemi tercih edilmesi daha doğru olacaktır [46].

3.5.4. Bükme Kuvveti

Bükme kuvvetinin tam olarak hesaplanması etkin bir bükme yapılabilmesi için çok önemlidir. Bu çalışmanın 3.2 Bükme İşlem Çeşitleri başlığı altında endüstride en çok kullanılan bükme işlemlerinde kullanılan bükme kuvvetlerinin hesaplanması için gerekli eşitlikler verilmiştir. Çeşitli deneysel çalışmalar uygulanan kuvvetin artırılmasının geri yaylanmayı azalttığını gösterse de, gereğinden fazla kuvvet ise iş parçası üzerinde istenmeyen deformasyonlar olmasına, bükme işleminin yapıldığı makinenin ise fazla yüklenerek zarar görebilmesine sebep olabilmektedir. Endüstride gerekli bükme kuvvetleri CNC kontrollü presler veya abkantlarda malzeme tanımlaması ve gerekli malzeme boyutları girildikten sonra otomatik olarak hesaplanmaktadır. Bükme kuvveti, yağlama, zımba uç radyüsü, pekleşme üsteline bağlı olarak değişebilir. Literatürde yağlama, zımba radyüsü, zımba hızı ve anizotropi arttıkça, pekleşme üsteli ise azaldıkça bükme kuvvetinin arttığı ortaya konulmuştur [47]. Bükme bölgesindeki malzeme miktarı azaldıkça, başka bir değişle, levhanın bükülen kısmında bir delik olması halinde bükme kuvvetinin azaldığı başka bir çalışmada ortaya konulmuştur [48].

3.5.5. Zımbanın Levha Üzerinde Bekleme Süresi

Büküm işlemi sırasında zımba levha üzerinde belirli bir süre bekletilirse geri ve ileri yaylanma miktarları azalmaktadır [49], [50]. Bekleme sırasında dislokasyonların artan deformasyona bağlı olarak yoğunluğunun artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir, yani malzeme sertleşmektedir. Başka şekilde ifade edilecek olursa, bekleme sırasında malzeme hidrostatik yüklenmekte, bu durum plastik akma eşiğini

aşığıya çekmektedir. Bundan dolayı daha önce plastik iş yapamayan artık gerilimler işe dönüşmektedir. Artan yoğunluk ile birlikte dislokasyonlar birbirlerinin hareketini engelleyerek geri ve ileri yaylanma miktarını etkilemektedirler. Zımbanın levha üzerinde bekletilmesi geri ve ileri yaylanmayı azaltmasına rağmen, bekleme ile birlikte işlem süresinin artması, maliyetin artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle zımba bekletme uygulaması yapılırken tüm koşulların dikkate alınması gerekmektedir.

3.5.6. Bükme Açısı

İstenilen açıdaki ürünün elde edilebilmesi için bükme açısının geri ve ileri esneme miktarı kadar arttırılması veya azaltılması gereklidir. Bu değişim malzeme cinsine göre değişkenlik göstermektedir. Alüminyum, bakır, pirinç ve yumuşak çelik gibi malzemelerin ileri ve geri yaylanmaları sert malzemelere göre daha azdır. Bükme açısının değişimi V büküm işleminde kalıp iç açısının değiştirilmesi (pahalı) ile, havada bükme işleminde ise zımbanın deplasmanı (ucuz) ile kontrol edilmektedir.

3.5.7. Zımba Uç Radyüsü

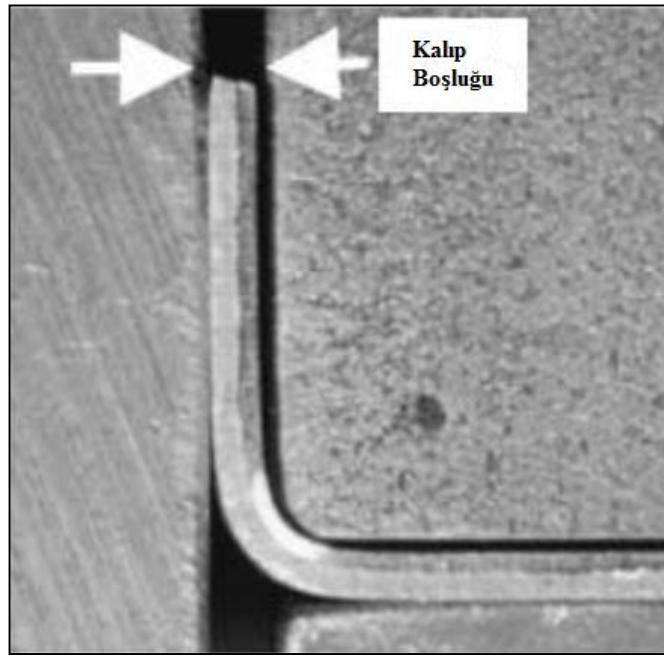
Malzemenin lokal/yerel hasara uğramadan bükme işlemine tabi olabileceği minimum radyüs değeri o malzeme için bükülebilirliği belirtmektedir. Genel olarak malzemeler çok küçük radyüs değerlerinde bükülememektedirler. Çok küçük radyüs değerlerinde bükülen malzemenin en dış kısmında aşırı miktarda gerinim meydana gelebilmekte ve bu durum hasara neden olabilmektedir. Ek olarak, alüminyum gibi malzemelerde çok küçük radyüslerde gerçekleştirilen işlemler neticesinde istenmeyen yüzey özellikleri ile karşılaşılabilir. Sonuç olarak, bükme işleminde oluşacak hasarları engellemek amacıyla büyük radyüsler tercih edilmektedir. Ek olarak malzeme kalınlığı arttıkça, malzemenin bükülebileceği minimum bükme radyüsünün arttığı görülmektedir [41], [43].

Al-Mg-Si alaşımı ile yapılan bir çalışmada, daha büyük zımba radyüsü değeriyle birlikte geri yaylanma miktarının azaldığı ortaya koyulmuştur [51]. DKP malzeme ile yapılan bir çalışmada ise, 6 mm radyüse sahip zımba ile yapılan deney sonucundaki

geri yaylanma miktarının, 2 mm radyüse sahip zımba ile yapılan deneydeki geri yaylanma miktarından daha fazla olduğu ortaya koyulmuştur [52]. 304 kalite paslanmaz çelik ile yapılan bir çalışma geri yaylanma miktarının artan zımba radyüsü ile arttığını ortaya koymaktadır [53]. Sonuç olarak, artan zımba radyüsü ile birlikte geri yaylanmanın azaldığı, ancak tam tersi şekilde ileri yaylanmanın arttığı gözlemlenmiştir [54].

3.5.8. Kalıp Boşluğu

V bükme, havada bükme gibi bükme ile şekillendirme çeşitlerinde, kalıp boşluğu malzeme kalınlığına eşit olmaktadır. Ancak, kenar bükme, U bükme gibi bükme işlem çeşitlerinde kalıp boşluğu önem kazanmaktadır. Şekil 3.23'te kenar bükmedeki kalıp boşluğu gösterilmektedir [55].



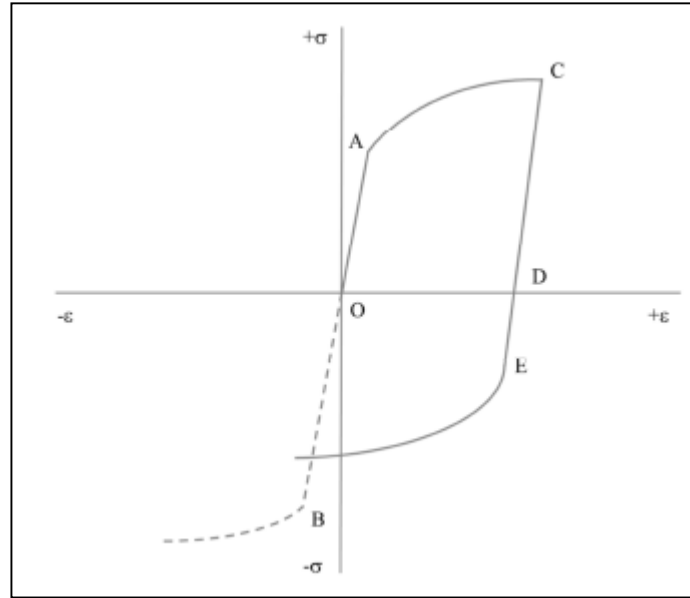
Şekil 3.23: Kenar bükmede kalıp boşluğu.

Kalıp boşluğunun levha kalınlığına oranında meydana gelen % 10'luk bir artış geri yaylanma miktarını % 10 mertebesinde arttırabilmektedir. Kalıp boşluğunun artması bükme işlemi için gereken kuvveti azaltmaktadır [55]. Benzer sonuçlar farklı çalışmalarda da ortaya koyulmuştur [46].

Kalıp boşluğunun azalması ile birlikte bükme bölgesinde deformasyonlar daha fazla artmakta, dolayısıyla bükme sonrası geri yaylanma miktarı azalmaktadır [55]. Ancak sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan bir çalışmaya göre, hem geri yaylanma hareketini telafi edebilmek, hem de oluşabilecek malzeme hatalarını engellemek için, kalıp boşluğunun uygun miktarda, malzeme kalınlığı kadar, bırakılması gerekmektedir. Her ne kadar kalıp boşluğunun azaltılması geri yaylanma miktarını azaltsa da kalıp boşluğunun azaltılması belli hasarlara, bu durum da malzeme kaybına ve maliyet artışına sebep olabilmektedir [56].

3.5.9. Bauschinger Etkisi

Bauschinger etkisi adını Alman mühendis Johann Bauschinger'den almaktadır. Bir malzeme üzerine uygulanan gerilmeden dolayı gerilme sertleşmesine uğruyorsa ters doğrultuda plastik akmaya yol açmak daha kolaydır. Başka bir deyişle, çekme gerilmesi uygulanan bir malzemeye akma sınırından hemen sonra ters yönde basma gerilmesi uygulandığında çekme gerilmesi sırasındaki akma gerilme değeri, basma gerilmesi sırasında alacağı akma değerinden daha büyük olacaktır [57].



Şekil 3.24: Bauschinger etkisi ve histerisiz döngüsü.

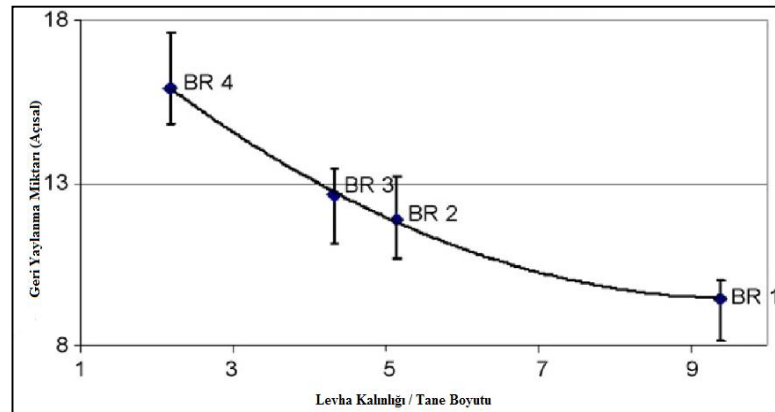
Şekil 3.24'deki OAC eğrisi çekme gerilmesi altındaki bir malzemenin gerilme-gerilme eğrisidir. Çekme gerilmesi altındaki malzemenin ilk akma değeri A

noktasında meydana gelmektedir. Aynı malzeme basma gerilmesine maruz bırakılsaydı, bu durumdaki akma değeri B noktası olacaktı. Varsayalım ki, aynı malzeme özelliklerine sahip başka bir numune C noktasına kadar çekme gerilmesine maruz bırakılmış olsun. Üzerindeki yük bırakıldığında gerilme değeri CD yolunu takip edecektir. D noktasındaki numuneye basma gerilmesi uygulandığında, E noktasından itibaren plastik akma başlayacaktır. E noktasındaki gerilme değeri B noktasındaki gerilme değerinden daha küçüktür. Gerilme değerindeki bu azalmaya Bauschinger etkisi denilmektedir. Bu etki tam tersi olarak da geçerlidir. İlk olarak basma gerilmesine maruz bırakılan bir malzeme belli bir değerden sonra çekme gerilmesine maruz bırakılırsa, o zamanki akma değeri bir öncekinden ufak olacaktır [57].

Çevrimsel plastik deformasyonun gerçekleştiği durumlarda Bauschinger etkisi göz önüne alınmalıdır. Bu durum kendini alüminyumda göstermektedir [58]. Daha önce yapılan deneysel çalışmalarda, Bauschinger etkisinin geri ve ileri yaylanma miktarı üzerine etkisi çelik malzemelerde ihmal edilebilir olduğu ortaya koyulmuştur [59].

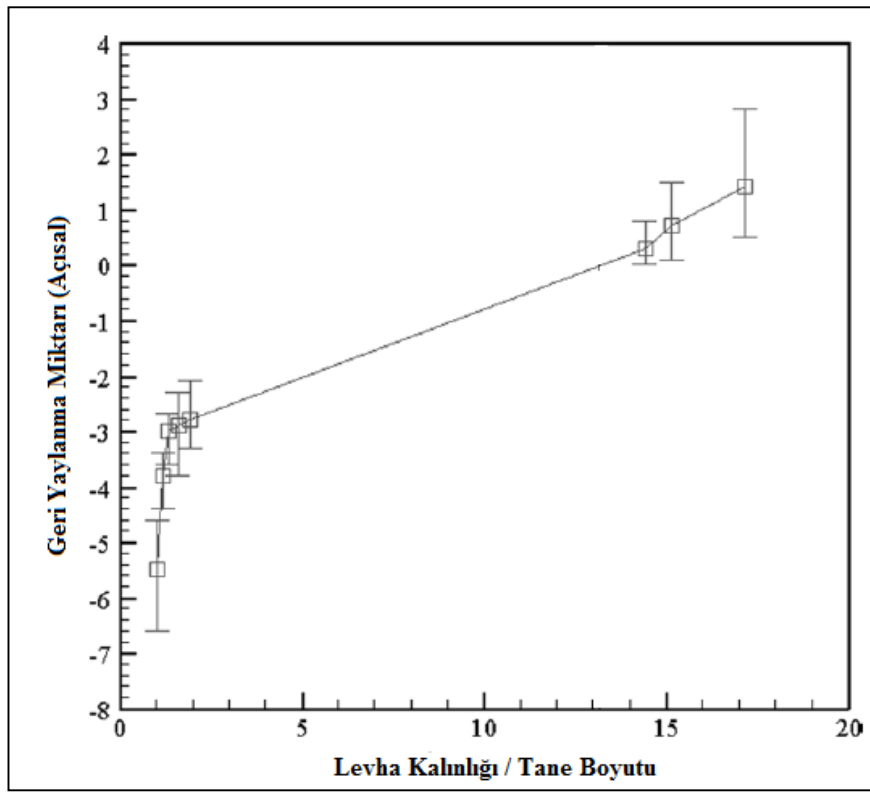
3.5.10. Tane Boyutu

Geri ve ileri yaylanma hareketleri üzerine tane boyutunun etkisi yapılan çalışmalar ile ortaya koyulmuştur. Pirinç sacın bükülmesi ile yapılan çalışmada, levha kalınlığının tane boyutuna oranının artmasıyla geri yaylanma miktarının azaldığı ortaya koyulmuştur. Bu durum Şekil 3.25’de gösterilmektedir [60].



Şekil 3.25: Pirinç malzemede geri yaylanmaya tane boyutu etkisi.

2011 yılında yapılan bir çalışma, içerisinde % 95 oranında demir içeren aynı kalınlıklara ancak farklı tane boyutlarına sahip levhaların bükme işlemi sonucu, levha kalınlığının tane boyutuna oranı azaldıkça geri yaylanmanın azaldığını, tam tersi şekilde bu oranın çok artması sonucu ise geri yaylanma miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.26'da yaklaşık 0,5 mm kalınlığa sahip bir levhanın tane boyutu değişimine göre gösterilmektedir [61]. Geri yaylanmanın negatif değerleri diğer bir değişle ileri yaylanma anlamına gelmektedir. Bu çalışma için düşünüldüğünde, azalan levha kalınlığı/tane boyutu oranı ileri yaylanma miktarının artması anlamına gelmektedir.



Şekil 3.26: Tane boyutunun geri yaylanmaya etkisi.

Genel olarak normalizasyon tavlama sürecinin tane boyutu küçültülmesine sebep olduğu bilinmektedir. Sertliği ve gevrekliği yüksek 4 mm kalınlığındaki Hardox 500 levha ile yapılan bir çalışmada, normalizasyon tavlama sürecine tabii tutulmuş malzemelerin bükme işlemi sonrası geri yaylanma ile ileri yaylanma davranışları incelenmiştir. Tavlama yapılmamış numunelerde geri yaylanma ile tavlama yapılmış numunelerde ise ileri yaylanma ile karşılaşılmıştır [62].

Tüm bu çalışmalar neticesinde, tane boyutunun değişimi geri ve ileri yaylanma hareketlerini etkilediği görülmektedir. Levha kalınlığı-tane boyutu oranı azaldıkça, başka bir değişle, sabit levha kalınlığında tane boyutu arttıkça, ileri yaylanma miktarı, tane boyutu azaldıkça geri yaylanma miktarı artmaktadır. Geri ve ileri yaylanma hareketlerinin etkisi azaltmak için en efektif tane boyutunda bükme işlemi gerçekleştirilmelidir.

3.5.11. Artık Gerilimler

Levha içindeki artık gerilimler herhangi bir dış etki olmadığı halde malzeme içinde bulunan gerilimlerdir. Bu gerilimler plastik deformasyon veya malzemedeki sıcaklık değişimlerinden meydana gelebilir.

Plastik deformasyon levha üretimi sırasında üretim süreçlerinden biri olan haddelme sırasında ortaya çıkar. Yüzeye yakın bölgelerde meydana gelen plastik deformasyon sonucu taneler uzar, iç kısımda ise herhangi bir değişim olmaz. Bunun sonucu olarak, levhanın dış kısmında çekme, iç kısmında ise basma gerilmeleri ortaya çıkmaktadır. Sıcaklık değişimleri ise, döküm veya ısıl işlem ürünlerinin, farklı bölgelerinin farklı hızlarda soğumasından meydana gelmektedir.

Artık gerilmeler geri ve ileri yaylanma miktarlarını etkileyerek istenilen ölçülerde üretim yapılmasını engeller. Artık gerilimlerin etkisi bükme işleminde zımbanın malzeme üzerinde bekletilmesiyle giderilebilir. Bekleme sırasında artık gerilmelerin homojen olarak dağılması sağlanır [49]. Bu durum maliyetin artmasına sebep olacaktır.

Alüminyum ile yapılan bir çalışmada ısıtma ile birlikte artık gerilimlerin azaldığı ve dolayısıyla geri yaylanmanın azaldığı ortaya koyulmuştur [13]. Titanyum alaşımı ile yapılan başka bir çalışmada ısıtma ile artık gerilmelerin azaldığı ve geri yaylanmanın azaldığı görülmüştür [14].

3.5.12. Pekleşme Üsteli

Geri ve ileri yaylanma miktarını etkileyen bir diğer parametre pekleşme üstelidir. Malzeme üzerinde meydana gelen gerilim miktarı akma mukavemetini aştıktan sonra plastik deformasyonlar meydana gelmeye başlar. Akma mukavemeti

ve çekme mukavemeti arasındaki bölgedeki gerilim değeri Eşitlik 3.27 ile ifade edilmektedir.

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (3.27)$$

Bu eşitlikte K malzemeye bağlı olarak değişen mukavemet dayanımını, ε gerinimi, n ise pekleşme üstelini ifade etmektedir. n değerinin artması, malzemenin boyun vermesinin gecikmesine sebep olmaktadır.

Literatürde, mukavemet katsayısı ile geri yaylanma miktarının doğru orantılı olduğu belirtilmektedir [26], [39]. Artan pekleşme üsteli ile geri yaylanma miktarının da arttığı yapılan çalışmalar ile ortaya koyulmuştur [5], [26].

3.5.13. Proses Parametreleri

Bükme işlemi sırasında malzemenin bulunduğu ortamın fiziksel koşulları ile ilgili etkenlerdir. Sıcaklık ve sürtünme bu parametrelerden bazılarıdır.

Sıcaklık artırımı ile malzemedeki artık gerilmeler azalabilir, böylece geri yaylanma azaltılabilir [13]. Ayrıca sıcaklık ile malzemelerin akma dayanımları düşürülebilir, böylece daha kolay bir şekilde büküm yapılabilir [14]. Ancak sıcaklığın artması, ileri yaylanma miktarının da artması anlamına gelebilmektedir [63]. Ayrıca, sıcaklık enerji gerektirdiğinden maliyet artışına sebep olmaktadır.

Sürtünme geri ve yaylanma hareketleri üzerine etkisi olan bir diğer parametredir. Çeşitli akışkanlar kullanılarak etkisi azaltılabilir. Literatürde sürtünmenin geri ve ileri yaylanma hareketleri üzerine etkilerini inceleyen çeşitli çalışmalar mevcuttur [54], [64].

Alüminyum ile gerçekleştirilen sayısal analiz ile yapılan çalışmada artan sürtünme katsayısı ile birlikte geri yaylanmanın azaldığı ortaya koyulmuştur [64]. Başka bir çalışmada ise bu durum tam tersi, yani, artan sürtünme katsayısı ile geri yaylanmanın arttığı ifade edilmektedir [65]. Yapılan başka bir çalışmada sürtünmenin geri yaylanma üzerine etkisinin ihmal edilebileceği ifade edilmektedir [5].

Elektro galvanize levhalar ile yapılan bir çalışmada zımba hızının etkisi ortaya koyulmuştur. Bu çalışmaya göre artan zımba hızıyla, geri yaylanma miktarı

artmaktadır [66]. Şekillendirme hızı etkisi daha çok sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Oda sıcaklığında bu durum kendini göstermezken, yüksek sıcaklıklarda, zımba hızı düştükçe geri yaylanma miktarı azalmaktadır [64].

Endüstride geri ve ileri yaylanma hareketleri sonucunda istenilen ürünü doğru ölçülerde elde edebilmek için bazı metotlar kullanılmaktadır. Önceden geri veya ileri yaylanma miktarları dizayn aşamasında hesaplanarak bükme açısını bu duruma göre belirlemek bu tekniklerden biridir [67]. Taban ezme yöntemi ile bükülen levhanın iç kısmına ek yük uygulayarak yaylanma hareketi engellenebilir. Bu teknikte zımba ucu çıkıntılı yapılarak basma gerilmesi artırılır [68], [69].

Tüm bu etkiler ve değişkenler göz önüne alındığında, bükme işleminde parametreler çok karmaşık ve düzensizdir [70]. Literatürde, Taguchi metodu, bilgisayar destekli proses planlama gibi yöntemler kullanılarak yapılan çalışmalar mevcuttur [71], [72].

4. MATERİYAL VE METOT

Bu bölümde, deneysel çalışmalar sırasında kullanılan malzemeler, ölçme cihazı, bükme işleminde kullanılan cihaz, bükme parametreleri ve uygulanan yöntemler ve yapılan analiz çalışmaları hakkında bilgiler verilmiştir.

4.1. Deney Malzemeleri

Bükme işlemi deneyleri için 2,5 mm DKP, 1-1,5-2,5 mm Galvaniz ve 2,5 mm paslanmaz saclar kullanılmıştır. Bu saclara ait kimyasal kompozisyonlar (ağırlıkça yüzde olarak) ve mekanik değerler sacların satın alındığı firmadan elde edilmiştir.

Tablo 4.1: DKP sac kimyasal kompozisyonu.

Kimyasal Bileşim %								
C	Mn	P	S	Si	Al	Ti	Nb	V
0,047	0,267	0,01	0,008	0,013	0,042	0,011	0,001	0,002

Tablo 4.2: Galvaniz sac kimyasal kompozisyonu.

Kimyasal Bileşim %								
C	Mn	Si	Ti	Nb	Al	V	S	P
0,041	0,1784	0,0086	0,0008	0,0002	0,0403	0,0006	0,006	0,0076

Tablo 4.3: Paslanmaz sac kimyasal kompozisyonu.

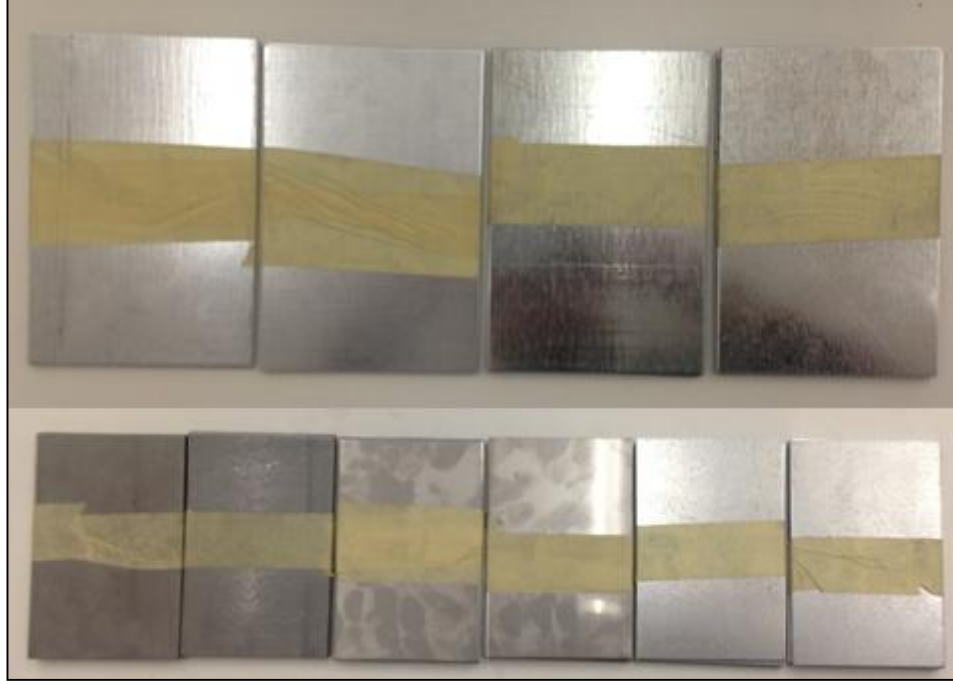
Kimyasal Bileşim %							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
0,022	0,43	1,56	0,033	<0,001	18,3	8,1	0,048

Tablo 4.4: Mekanik özellikler.

	DKP	Galvaniz	Paslanmaz
σ_u (MPa)	327	335-374	614-624
σ_y (MPa)	256	226-329	276-310

4.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney numuneleri, haddeleme yönünde (0°) ve haddelemeye dik yönde (90°) olacak şekilde 150 x 100 mm boyutlarında, giyotin makas tezgahında kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Deney numuneleri.

Numuneler hadde yönüne paralel kesilmiş 8 adet ve hadde yönüne dik kesilmiş 8 adet olmak üzere, kalınlık başına 16 adet, toplamda 80 adet hazırlanmıştır.

4.3. Deneysel Çalışmada Kullanılan Makine ve Cihazlar

4.3.1. Kesme Tezgahı (Giyotin Makas)

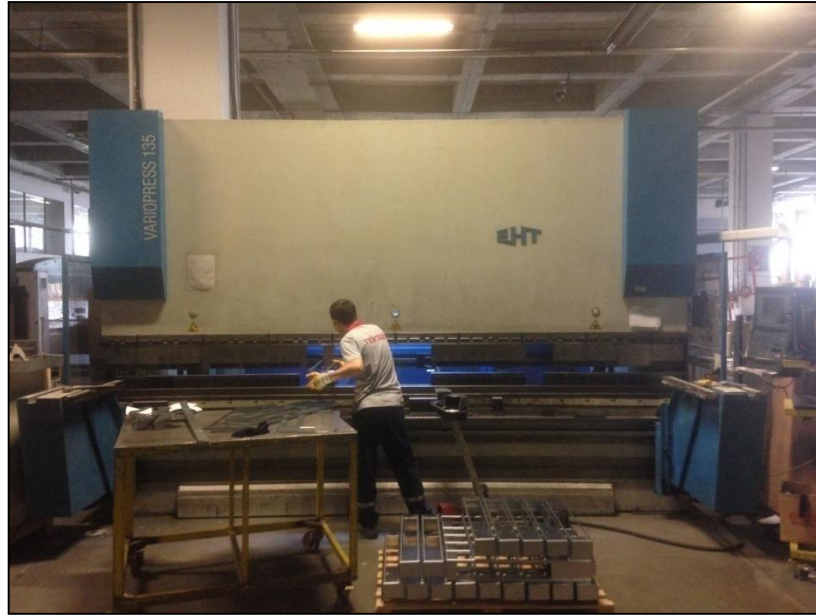
Bükme işleminde kullanılacak tüm numuneler Tekso Teknik Soğutma San. ve Tic. A. Ş. makine parkında bulunan CNC kontrollü RAS Powercut giyotin makasta kesilerek hazırlanmıştır.



Şekil 4.2: Giyotin makas.

4.3.2. Bükme Tezgahı (Abkant Pres)

Deneysel çalışmalar Tekso Tenik Soğutma San. ve Tic. A. Ş. makine parkında bulunan 1350 kN'luk maksimum basma kapasiteli EHT Variopress 135 abkant tezgahında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan tezgah Şekil 4.3'te, teknik özellikleri ise Tablo 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.3: Bükme işleminin gerçekleştirildiği abkant makinesi.

Tablo 4.5: Abkant tezgahının genel özellikleri.

Presleme Kuvveti (maks.)	1350 kN
Presleme Hızı (maks.)	11 mm/s
Geri Dönüş Hızı (maks.)	130 mm/s
Toplam Uzunluk	6740 mm
Toplam Genişlik	3790 mm
Yerden Yükseklik	3200 mm
Piston Hareketi	240 mm

4.3.3. Ölçme Cihazı

Numuneler büküldükten sonra ölçümler Elsel Gaz Armatürleri San. Ve Tic. A. Ş. bünyesindeki Mitutoyo PJ 2500 profil projeksiyon cihazı ile yapılmıştır. Numuneler cam tabla üzerine yerleştirilmiş, x ekseninde ekran üzerinde sıfırlanıp sabitlendikten sonra, yansıma ekranın çevrilmesi ile açı okuması yapılmıştır. Cihazın Mart 2017 tarihinde yapılan 16U01126 referans kodlu TSE kalibrasyonuna göre sapma değeri $\pm 0,56'$ olarak verilmiştir. Şekil 5.4'te profil projeksiyon cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Profil projeksiyon cihazı.

4.4. Deney Numunelerinin Mekanik Karakterizasyonu

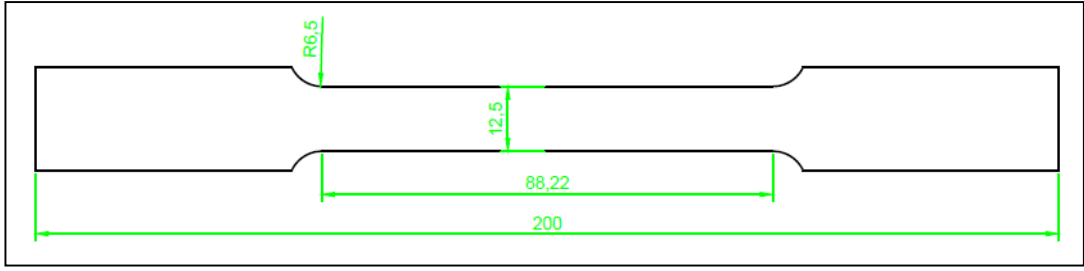
Deney sırasında kullanılacak numunelerin mekanik karakterizasyonunun yapılabilmesi için Autodesk Inventor yazılımında çekme testi numunelerinin ölçülendirilmesi yapılmış ve daha sonra Tekso Teknik Soğutma San. ve Tic. A. Ş. Bünyesindeki Ermaksan Fibermak Momentum Gen-2 lazer cihazıyla kesimler sağlanmıştır. Şekil 4.5'te lazer kesim makinesi verilmiştir. Her numuneden Şekil 4.6'da görülen çekme numuneleri hadde yönünde ve hadde yönüne dik olarak hazırlanmıştır.



Şekil 4.5: Lazer kesim makinesi.



Şekil 4.6: Çekme deney numunesi.



Şekil 4.7: Çekme deney numune ölçüleri.

Çekme testleri Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'ndeki Instron 5000 çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8'de çekme test cihazı verilmiştir.



Şekil 4.8: Çekme test düzeneği.

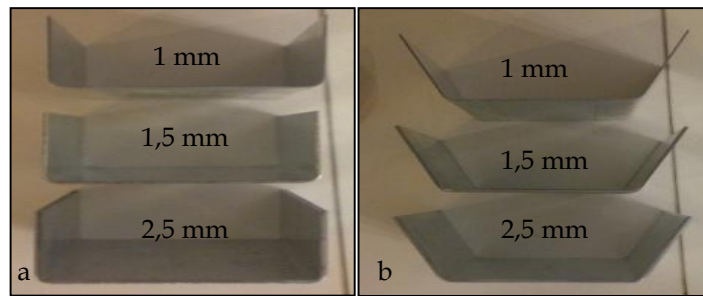
Çalışma sırasında 2 defa çekme deneyi yapılmıştır. İlk testlerde hadde yönüne paralel kesilmiş 6 adet, hadde yönüne dik kesilmiş 6 adet, kalınlık başına 12 adet olmak üzere, toplamda 60 adet numune teste tabii tutulmuştur. Bu test sırasında ekstansometre kullanılamamıştır. Bu testten yaklaşık 3 ay sonra hadde yönüne paralel kesilmiş 1 adet, hadde yönüne dik kesilmiş 1 adet, kalınlık başına 2 adet olmak üzere, toplamda 10 adet numune ile ikinci test gerçekleştirilmiştir. İkinci test sırasında ekstansometre kullanılmıştır.

4.5. Metot

Bükme işlemi üretim endüstrisinde en önemli ve çok yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bükme ile levha şekillendirme işlemlerinde erkek kalıp bükülerek deforme olan bölge üzerinden kaldırıldığında, elastik geri dönüşten dolayı malzeme özelliklerine bağlı olarak geri ve ileri yaylanma hareketleri meydana gelmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmada, havada bükme tekniğinde, malzeme özelliklerinin ve levha kalınlığının geri ve ileri yaylanma davranışlarına etkisi araştırılmıştır.

Deneysel çalışmada 3 farklı kalınlıkta (1, 1,5 ve 2,5 mm) galvaniz levha, aynı kalınlık üzerinden malzeme özelliklerinin etkisini inceleyebilmek amaçlı DKP ve paslanmaz (2,5 mm) levhalar kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler 150 x 100 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Toplamda 80 numune hazırlanmış ve numuneler her iki kenarından bükülerek 160 adet ölçü alınmıştır. Tüm numuneler zımba uç yarıçapı 1 mm kalıpta havada bükülmüştür.

Hazırlanan numuneler her iki tarafından bükülerek elde edilecek ölçü sayısı iki katına çıkarılmıştır. Numunelerin 40 adedine 90°'lik, diğer yarısına ise 120°'lik bükme işlemi uygulanmıştır. Bükme sırasında kullanılan erkek ve dişi kalıplar aynı tutulmuş, böylece malzeme özellikleri ve kalınlığın geri ve ileri yaylanma hareketleri üzerine etkisi incelenmiştir.

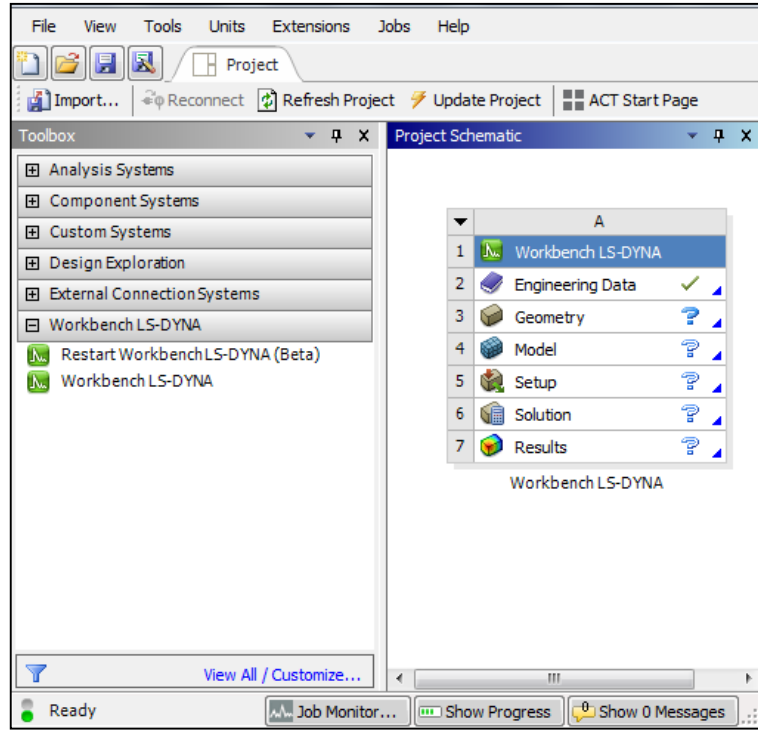


Şekil 4.9: Galvaniz malzeme bükme deney numune örnekleri a) 90° b) 120° bükme.

Bükme işlemi ortam sıcaklığında, erkek kalıp bükme sonrası levhanın üzerinde bekletilmeden, direkt olarak çekilerek gerçekleştirilmiştir. Bükme işlemi sırasında herhangi bir yağlayıcı eleman kullanılmamıştır.

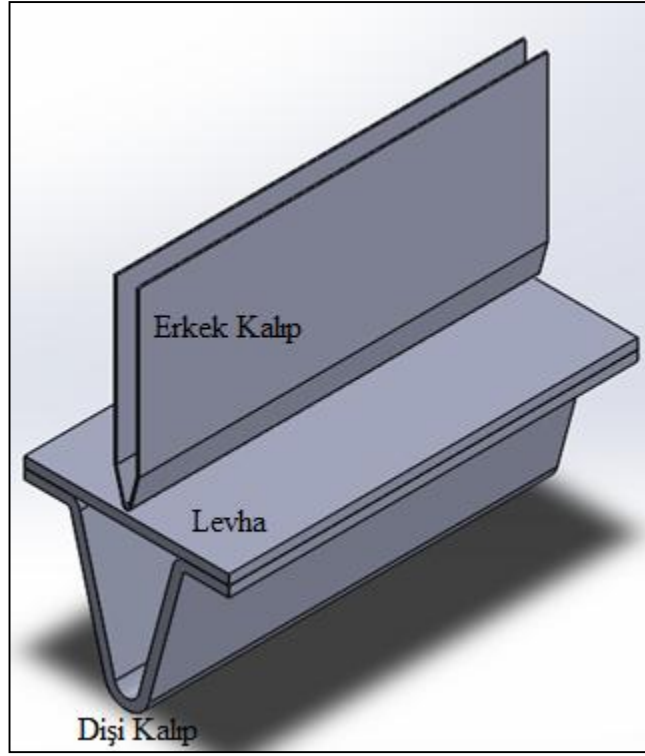
4.6. Analiz Çalışmaları

Bükme işlemi sırasında meydana gelen geri yaylanma analizleri Ansys programı ile gerçekleştirilmiştir. Amerika kökenli Ansys programı, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak karmaşık mühendislik problemlerinin simülasyonunda kullanılan bilgisayar destekli mühendislik yazılımıdır. Bu çalışma sırasında Ansys Workbench 18.1 grafiksel ara yüzü içerisinde yer alan LS-DYNA yardımıyla ekspilisit yöntem ile analizler gerçekleştirilmiştir. Ansys Workbench programı ara yüzü Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



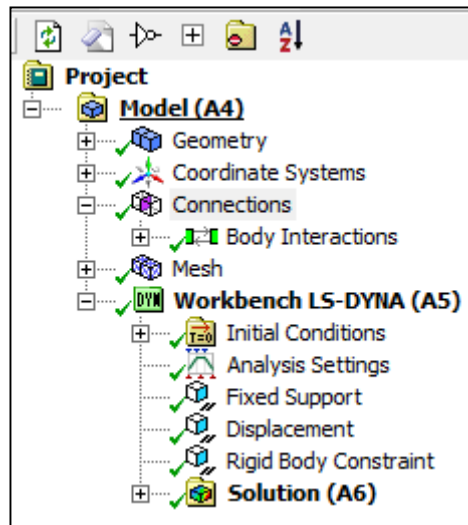
Şekil 4.10: Ansys programı ara yüzü.

Analizlerin yapılabilmesi için ilk olarak kalıpların ve levha numunelerin bilgisayar ortamında modellenmesi gerekmektedir. Bunun için levha, erkek ve dişi kalıplar Solidworks programı yardımıyla katı model olarak oluşturulmuştur. Şekil 4.11'de oluşturulan katı model gösterilmektedir.



Şekil 4.11: Solidworks programında oluşturulan katı model.

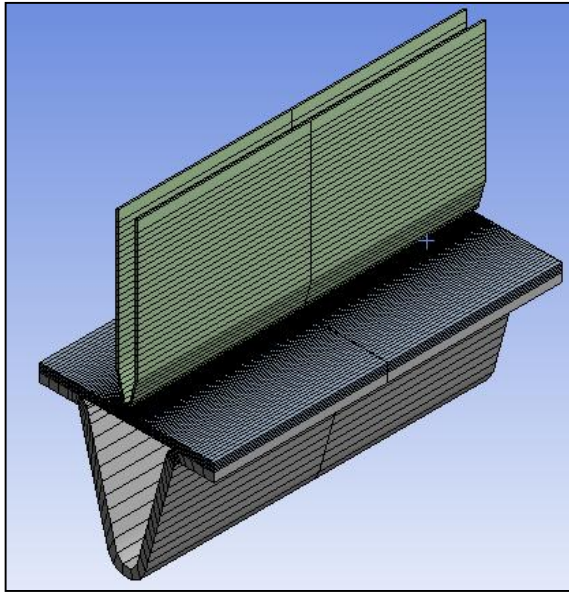
Ansys programı içerisinde oluşturulan Workbench LS-DYNA analiz sistemi içerisine oluşturulan katı model aktarılmış ve analiz modelinin oluşturulması sıra ile takip edilmiştir. Analiz için model oluşumu genel hatlarıyla Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12: Analiz modeli genel görünüş.

Analize başlamadan önce geometrilere malzeme tanımlaması yapılmıştır. Erkek ve dişi kalıplar rijit gövde olarak tanımlanmış, levha ise analizi yapılacak malzemeye göre seçilmiştir. DKP ve Galvaniz levhalar için Ansys yazılımı içerisinde yer alan malzeme kütüphanesindeki “General Non-linear Materials” içerisinde bulunan “Structural Steel NL” malzemesi, Paslanmaz levha için ise “Stainless Steel NL” malzemesi seçilmiştir. Seçilen malzemelerin sertleşme modeli olarak “Bilinear Kinematic Hardening” seçilmiştir. Analizi yapılacak levhanın mukavemet katsayısı ve akma mukavemet değeri çekme testlinden elde edilen verilere göre elle girilmiştir.

Malzeme tanımları yapıldıktan sonra bağlantı tanımlamaları gerçekleştirilmiştir. Bunun için “Body Interactions” sekmesi altında birbirine değen tüm yüzeyler arası sürtünmeli yüzey tanımlanmış ve sürtünme katsayısı 0,3 olarak verilmiştir. Bağlantılar oluşturulduktan sonra ağ örme (mesh) işlemine geçilmiştir. Analizin gerçeğe en yakın olarak yapılabilmesi için ağ örme işlemi çok önemlidir. Yüksek sayıda ve düzgün olarak yapılmış bir ağ örme işlemi en iyi sonucu almaya yarayacaktır. Ancak, ağ sayısının artması ile birlikte düğüm ve eleman sayıları artacak, bu durum analiz süresinin uzamasına sebep olacaktır. Ek olarak dişi ve erkek kalıp rijit gövde seçildiğinden bu kısımlarda oluşan gerilimlerin hesaba katılmasına gerek görülmemiştir. Ağ örme işlemi levhanın büküm noktasında daha yoğun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Ağ örme işleminde 2610 düğüm ve 1260 eleman oluşturulmuştur. Ağ örülmüş model Şekil 4.13’te gösterilmiştir.



Şekil 4.13: Ağ örülmüş model.

Ağ örme işleminden sonra sınır koşulları belirlenmiştir. Dişi kalıp tüm yönlerden sabitlenmiştir (fixed support). Erkek kalıp ise sadece dikey yönde serbest bırakılmış ve diğer yönlerde hareketi kısıtlanmıştır. Bükme işlemi analiz süreleri 0,09 ve 0,12 saniye belirlenmiştir. Ancak, geri yaylanma öncesi bükme açısının tespiti için zımbanın en alt düzeye indiği durum için ayrı analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin süreleri 0,08 ve 0,11 saniye olarak belirlenmiştir. Ekpilisit yöntemde çözüm aralıkları otomatik olarak belirlenmekte ve çözüm zaman aralıkları çok düşük olmaktadır. Bükme işlemi erkek kalıba dikey olarak tanımlanan hareket ile sağlanmıştır. 0,09 saniyelik analizler için zımba 9 mm, 0,12 saniyelik analizler için ise 12 mm aşağıya indirilerek analizlerin yapılması sağlanmıştır. Zımba hareketi azaldıkça elde edilecek büküm açısı daha fazla olacaktır.

Bükme işleminin analizinde tarafsız eksenin iç kısma doğru kayması ve çekme – basma kuvvetlerinin ortaya çıktığı görülmüştür. Ancak bu çalışmada analiz sonucu elde edilen verilerden sadece geri ve ileri yaylanma miktarları kullanılacağından gerilme ve gerinim değerleri ortaya koyulmamıştır. Toplamda 20 analiz yapılmış ve ortalama olarak bir analiz 9 saat sürmüştür.

5. DENEYSEL SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Endüstride çok yaygın bir şekilde kullanılan Galvaniz, DKP ve Paslanmaz çelik levhalardan hadde yönünde ve hadde yönüne paralel olmak üzere, standartlara uygun çekme numunesi alınmış ve çekme testleri uygulanmıştır. Belli bir süre sonra, aynı levhalardan hadde yönünde ve hadde yönüne paralel olarak 1'er adet daha numune alınıp standartlara uygun çekme testi uygulanmıştır. Böylece endüstride kullanılan çelik levhalar yorumlanmış ve düzensizlikler ortaya koyulmuştur.

Daha sonra, 1–1,5–2,5 mm kalınlıklarındaki Galvaniz, 2,5 mm kalınlıklarındaki DKP ve Paslanmaz çelik levhalardan 150 x 100 mm ebatlarında, hadde yönünde ve hadde yönüne paralel olmak üzere 4'er adet numune kesilerek çift tarafından 90° ve 120°'lik bükme işlemine tabii tutulmuştur. Bükme işlemi sonrası, numunelerin bükme açıları profil projeksiyon cihazında ölçülmüştür. Sonuç olarak, kalınlık ve malzeme parametrelerinin (çekme mukavemeti, akma mukavemeti, hadde yönü, pekleşme üsteli) bükme işlemi üzerine etkileri incelenmiştir.

5.1. Çekme Testleri

İlk yapılan çekme testinde ekstansometre kullanılmamış ve numuneler kopana kadar deneyler devam ettirilmiştir. Bu testler sırasında hadde yönünde 30 adet, haddeye dik yönde 30 adet olmak üzere, toplam 60 adet numune çekme testine tabii tutulmuştur. Paslanmaz çelik levhaların sadece çekme mukavemeti, Galvaniz ve DKP levhaların ise akma ve çekme mukavemetleri ortaya koyulmuştur. Numune başına değerler Ek-A'da verilmiştir. Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de bu testin sonuçlarından alınmış, çekme ve akma mukavemetleri, Şekil 5.1'de ise 2,5 mm kalınlıktaki Galvaniz, DKP ve Paslanmaz çekme test numune sonuçlarından tipik 1'er adedinin örnek Gerilme – Gerinim davranışları verilmiştir.

Tablo 5.1: 1. Çekme testi sonucu levhaların çekme mukavemetleri.

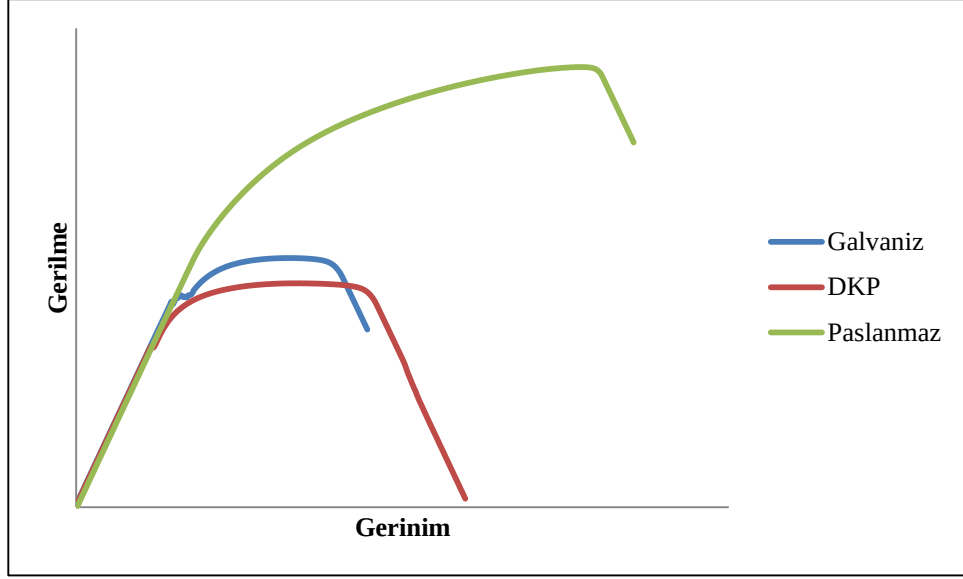
Çekme Mukavemeti, σ_u (MPa)					
Hadde Yönü	Galvaniz			DKP	Paslanmaz
	1 mm	1,5 mm	2,5 mm	2,5 mm	2,5 mm
Paralel	390	400	365	328	637
Dik	389	397	364	326	652

Tablo 5.1'e göre; paslanmaz levha en yüksek çekme mukavemetine sahip olup, çekme testi sırasında boyun vermeye başlamadan en fazla uzama gösteren ve bükme kuvvet hesabına göre, en yüksek bükme kuvveti gerektiren malzemedir.

Tablo 5.2: 1. Çekme testi sonucu levhaların akma mukavemetleri.

Akma Mukavemeti, σ_y (MPa)				
Hadde Yönü	Galvaniz			DKP
	1 mm	1,5 mm	2,5 mm	2,5 mm
Paralel	294	348	287	244
Dik	302	364	309	237

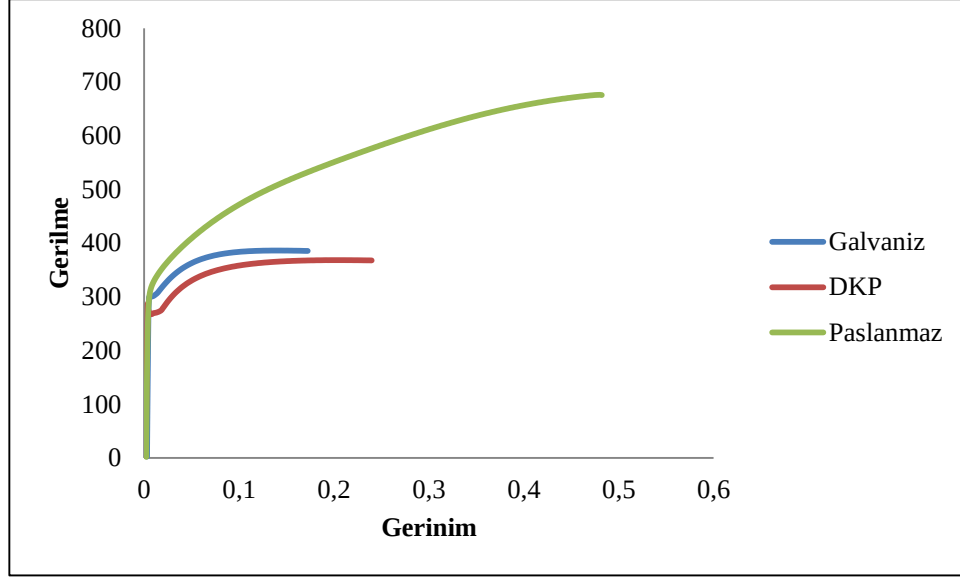
Tablo 5.2'deki akma mukavemetleri, çekme testi sırasında gerilimin düşmeye başlamadan önceki değerler olarak belirlenmiştir. Şekil 5.1'de verildiği üzere; DKP ve Galvaniz levhalar belirgin bir akma değeri göstermesine rağmen, Paslanmaz levha da bu durum söz konusu değildir. Bu test sırasında gerinme değerleri elde edilemediğinden Paslanmaz çelik levhanın akma mukavemeti elde edilememiştir.



Şekil 5.1: 1. Çekme testi sonucu levhaların Gerilme – Gerinim diyagramları.

Malzemelerin mühendislik gerilim değeri, uygulanan kuvvetin, başlangıçtaki kesit alanına oranı olarak belirlenmektedir. Teorik olarak bulunan malzeme gerilimleri kalınlık göz önüne alınmadan yapıldığı zaman gerilimler eşit olacaktır. Ancak pratikte, levha üretimi sırasındaki haddeleme, tavlama gibi işlemler malzemenin içyapısında değişime sebep olup farklı gerilimleri ortaya çıkaracaktır. Tablo 5.2’de bu durum görülmektedir. Levha üreticileri de standartlarında mekanik özellikleri belirli bir aralık içinde vermektedirler. Ancak 1,5 mm kalınlıktaki Galvaniz levha bu değerlerin bile dışında kalmaktadır. Bu durum endüstride, aynı özellik adı altında satılan sacların aslında aynı özelliklerde olmadığını göstermektedir. Sonuç olarak, belirli bir levha kalınlığına sahip levhanın sonuçlarına göre yapılacak tasarım çalışması sonrası bu sonuçlara dayanılarak yapılacak farklı bir kalınlıktaki çalışmada, aynı kalite adı altında satılan malzemeler farklı özellikler göstereceğinden, üretim sırasında istenmeyen durumların ortaya çıkması kaçınılmaz olacaktır.

Belli bir süre sonrasında (yaklaşık 3 ay), kalınlık, malzeme çeşitleri ve hadde yönleri dikkate alınarak tekrar çekme numuneleri hazırlanmış ve standartlara uygun olarak çekme testi uygulanmıştır. Bu test sırasında ekstansometre kullanılmış ve malzemelerin gerinim, pekleşme dayanımı ve pekleşme dayanım katsayıları da hesaplanabilmektedir. Bu test sırasında hadde yönüne paralel kesilmiş 1 adet, hadde yönüne dik kesilmiş 1 adet, kalınlık başına 2 adet olmak üzere, toplamda 10 adet numune çekme testine tabii tutulmuştur.



Şekil 5.2: 2. Çekme testi sonucu levhaların Gerilme – Gerinim diyagramları.

İlk çekme testinde olduğu gibi, DKP ve Galvaniz levhalar belirgin bir akma gösterirken, Paslanmaz levha da bu durum söz konusu değildir, akma noktası, 0.002 (%0.2) gerinim değerinden elastik doğruya paralel çizilerek bulunmuştur.

Tablo 5.3: 2. Çekme testi sonucu levhaların çekme mukavemetleri.

Çekme Mukavemeti, σ_u (MPa)					
Hadde Yönü	Galvaniz			DKP	Paslanmaz
	1 mm	1,5 mm	2,5 mm	2,5 mm	2,5 mm
Paralel	371	349	386	368	676
Dik	365	351	385	371	668

2. çekme testi sonucu elde edilen çekme mukavemetleri ilk teste benzer bir şekilde Paslanmaz levhanın kopmaya kadar olan uzaması diğer levhalara oranla çok daha fazladır.

Tablo 5.4: 2. Çekme testi sonucu levhaların akma mukavemetleri.

Akma Mukavemeti, σ_y (MPa)					
Hadde Yönü	Galvaniz			DKP	Paslanmaz
	1 mm	1,5 mm	2,5 mm	2,5 mm	2,5 mm
Paralel	283	240	300	271	311
Dik	278	247	302	308	312

1. çekme testinde olduğu gibi bu testte de aynı malzemenin farklı kalınlıklarda ki akma mukavemetleri birbirinden farklıdır. Ek olarak, aynı lot içinde satın alınan malzemelerden özellikle 1,5 mm kalınlıktaki Galvaniz levhanın ilk test sırasındaki akma mukavemet değerleri 348 MPa ve 364 MPa (sırasıyla hadde yönünde ve hadde yönüne dik numuneler için) olarak ölçülmüşken, 2. çekme testindeki aynı kalınlık için bu değerler 240 MPa ve 247 MPa olarak ölçülmüştür.

2. çekme testinde ekstansometrenin zarar görmemesi adına, maksimum yük görüldükten sonra deneyler durdurulmuş, malzemelerin kopması beklenmemiştir. Bu ölçümler, malzemelerin mukavemet katsayıları ve pekleşme üstellerinin bulunabilmesi için yeterli olmuştur. Tablo 5.5’de mukavemet katsayıları, Tablo 5.6’da pekleşme üstelleri verilmiştir.

Tablo 5.5: 2. Çekme testi sonucu hesaplanan mukavemet katsayıları.

Mukavemet Katsayısı, K (MPa)					
Hadde Yönü	Galvaniz			DKP	Paslanmaz
	1 mm	1,5 mm	2,5 mm	2,5 mm	2,5 mm
Paralel	579	592	607	593	1253
Dik	575	582	579	568	1247

Tablo 5.6: 2. Çekme testi sonucu hesaplanan pekleşme üstelleri.

Pekleşme Üsteli, n					
Hadde Yönü	Galvaniz			DKP	Paslanmaz
	1 mm	1,5 mm	2,5 mm	2,5 mm	2,5 mm
Paralel	0,158	0,197	0,155	0,175	0,341
Dik	0,161	0,186	0,136	0,151	0,349

Şekil 5.3’te mukavemet katsayısı ve pekleşme üsteli değerlerinin etkisi görsel olarak görülmektedir. “a” harfi ile belirtilen numune çekme öncesi numune boyunu, diğer harfler ise çekme sonrası numune boylarını belirtmektedir. “f” harfi ile belirtilen Paslanmaz çelik en yüksek mukavemet katsayısı ve pekleşme üsteline sahip olmasından dolayı, çekme testinde en fazla uzamayı gösteren malzemedir.



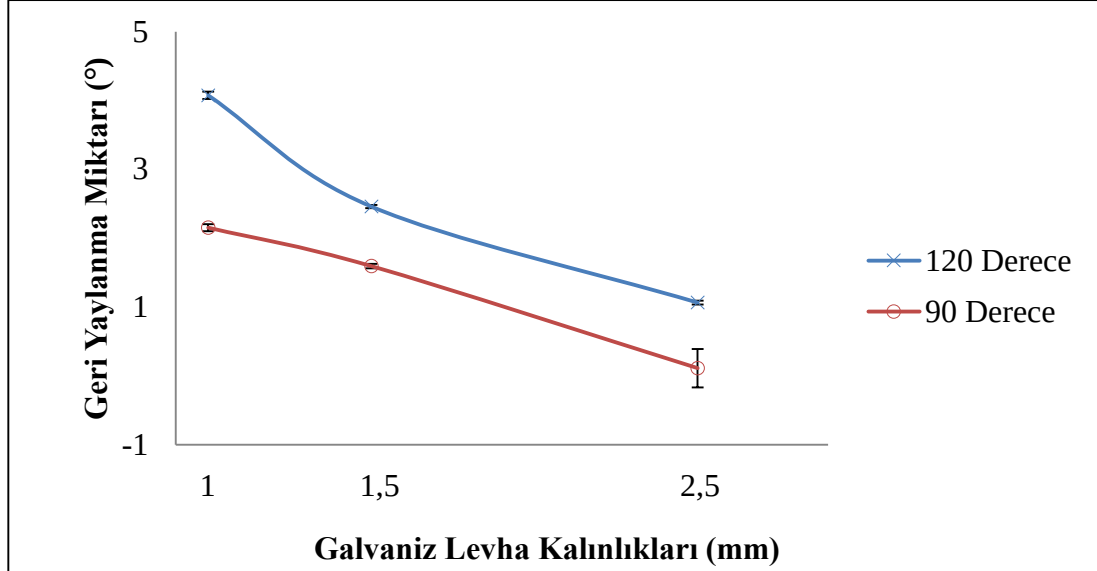
Şekil 5.3: Çekme testi öncesi ve boyun verme noktasına kadar yüklenen numune boyları.

İki test arasındaki farklar ülkemiz levha üretici firmalardan alınan ürünlerde karşılaşılan belirsizlikleri gözler önüne sermektedir. Standartlar içinde üretilmeyen ve sonrasında belirli bir kalite adı altında satışı yapılan malzemeler neticesinde, bu levhalar ile üretim yapacak işletmeler zor durumlara girmekte ve istedikleri ürünü belirlemiş oldukları yöntemler ile elde edememektedirler. Bükme işleminde çekme mukavemet değeri, bu çalışmanın 3. bölümünde de belirtildiği üzere, bükme kuvvet hesaplarında direkt olarak kullanılmaktadır. Belirli bir kalınlık ve çekme mukavemeti ile yapılan bükme kuvvet hesabı diğer kalınlıklara da uygulanmak istendiğinde gerekli büküm yapılamayacak, makine zarar görecektir ve işletme ekonomik olarak zarar görecektir.

5.2. Bükme Testleri

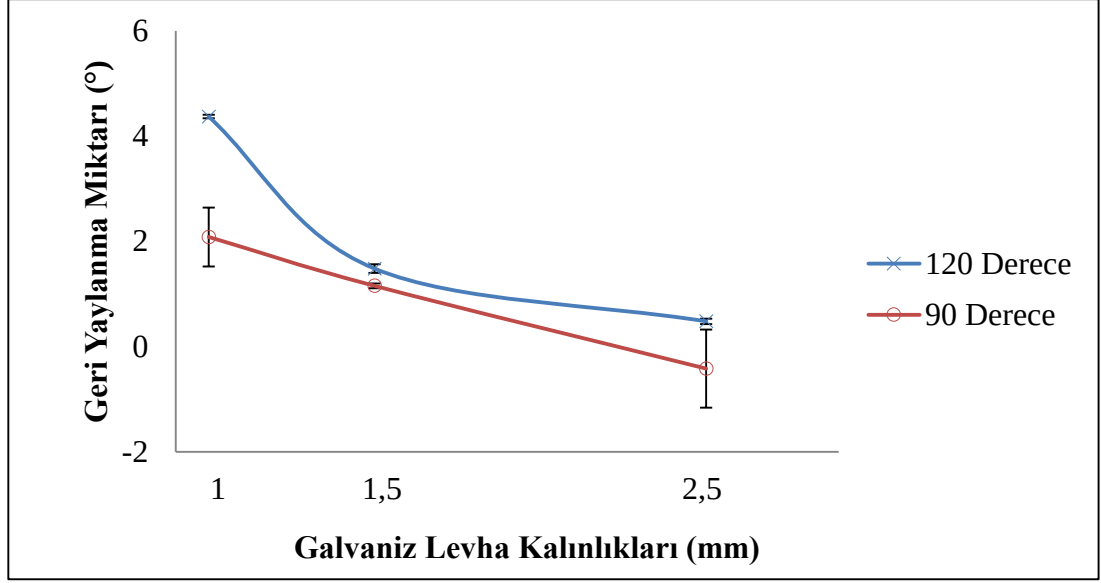
Tüm bükme işlemleri, ortam sıcaklığında ve aynı kalıp üzerinde yapılmıştır. Bu sayede kalınlık ve malzeme özellikleri etkisi incelenmiştir. Yapılan bükme işlemleri

sonucunda, bükülen levhaların profil projeksiyon cihazında açıları ölçülmüş ve ileri ve geri yaylanma miktarları derece olarak ortaya koyulmuştur. Ek-B’de tüm malzemelerin bükme açıları verilmiştir.



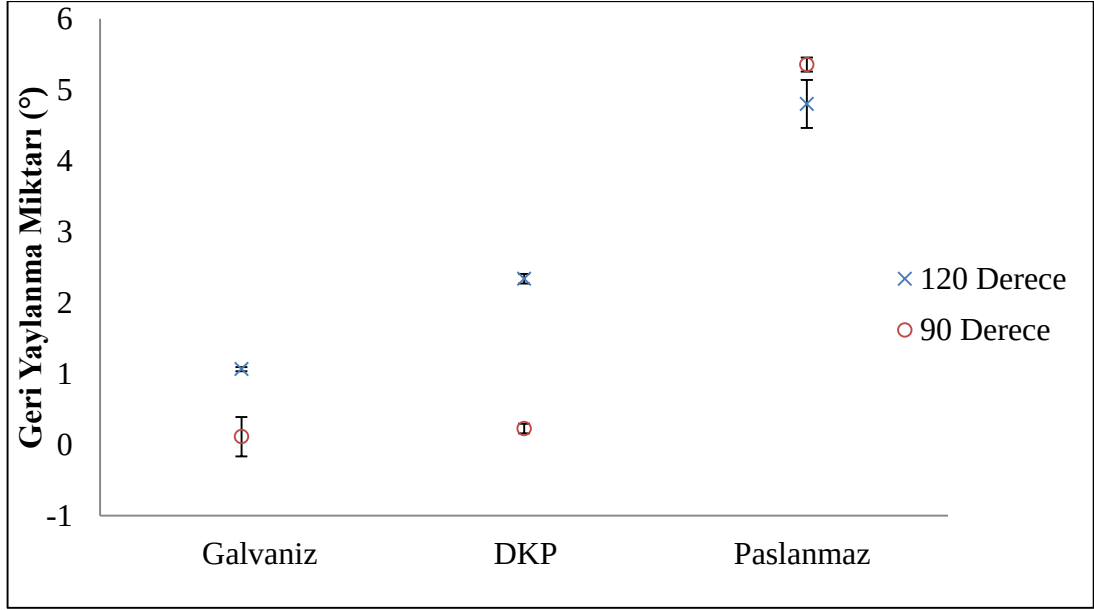
Şekil 5.4: Hadde yönüne paralel kesilmiş Galvaniz levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının karşılaştırılması.

Hadde yönüne paralel kesilerek bükme işlemine tabii tutulmuş Galvaniz levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının karşılaştırılması Şekil 5.4’de verilmiştir. Bu duruma göre; daha önceki çalışmalarda da belirtildiği üzere [38], [39], [40], levha kalınlığı arttıkça geri yaylanma miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. En yüksek sapma miktarı 2,5 mm kalınlıktaki Galvaniz levhanın 90°’lik bükümünde 0,28 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, en yüksek geri yaylanma değeri 1 mm kalınlıktaki Galvaniz levhanın 120°’lik bükümünde 4,14° olarak gözlemlenmiştir.



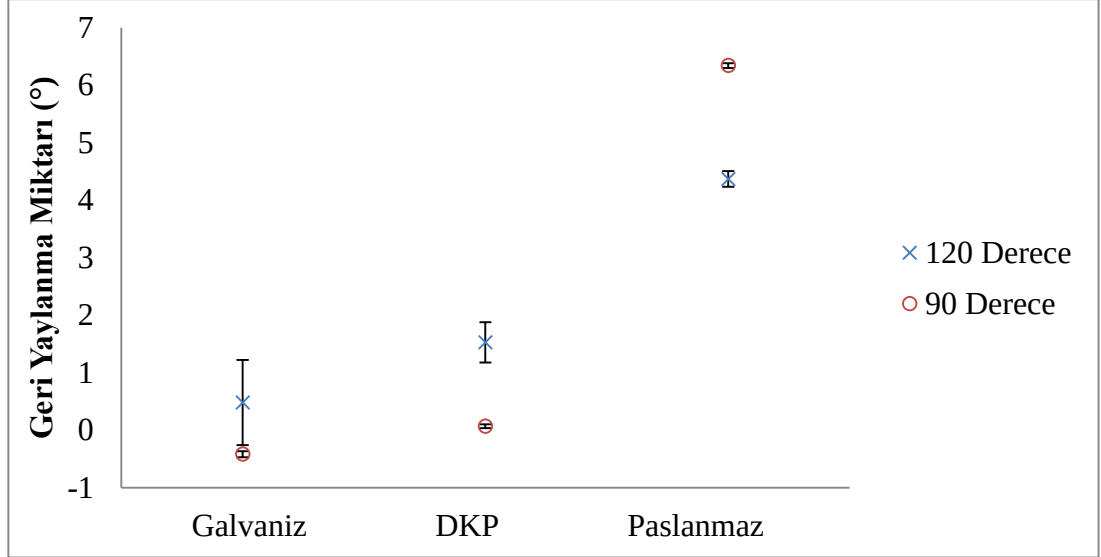
Şekil 5.5: Hadde yönüne dik kesilmiş Galvaniz levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının karşılaştırılması.

Hadde yönüne dik kesilerek bükme işlemine tabii tutulmuş Galvaniz levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının karşılaştırılması Şekil 5.5'te verilmiştir. Bu büküm tipinde de kalınlık artışının geri yaylanma miktarın düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada belirtildiği şekli ile [41], kalınlık artışının negatif geri yaylanma miktarının, yani ileri yaylanma miktarının, artışına sebep olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek sapma miktarı 2,5 mm kalınlıktaki Galvaniz levhanın 90°'lik bükümünde 0,74 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, en yüksek geri yaylanma değeri 1 mm kalınlıktaki Galvaniz levhanın 120°'lik bükümünde 4,39° olarak gözlemlenmiştir.



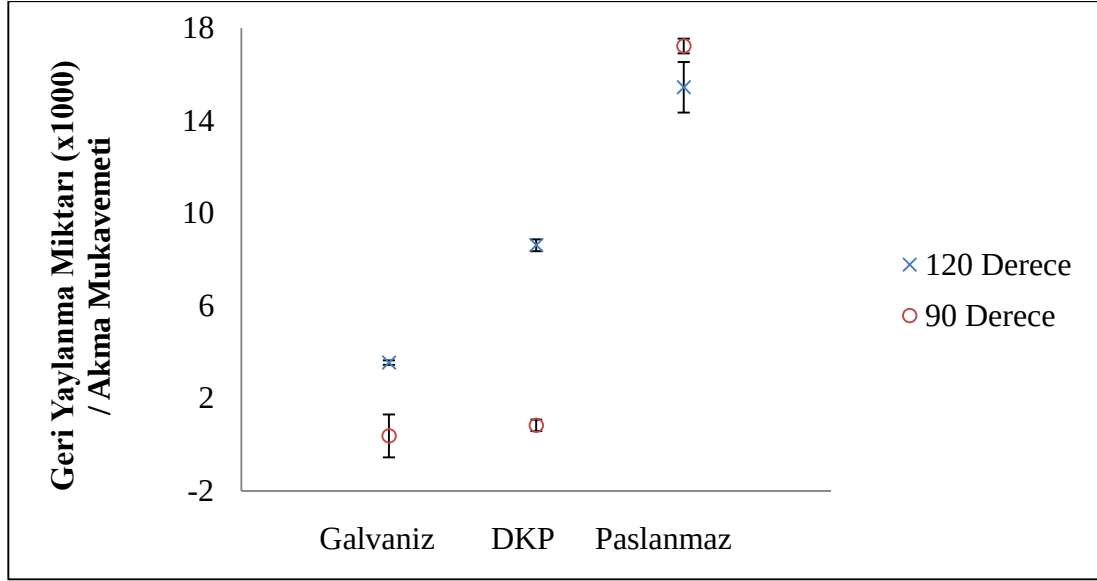
Şekil 5.6: 2,5 mm kalınlıktaki hadde yönüne paralel kesilmiş levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının karşılaştırılması.

Hadde yönüne paralel kesilerek bükme işlemine tabii tutulmuş 2,5 mm kalınlıktaki Galvaniz, DKP ve Paslanmaz levhaların ileri ve geri yaylanma miktarlarının karşılaştırılması Şekil 5.6’da verilmiştir. Her iki büküm açısında da paslanmaz levhalar en yüksek geri yaylanma oranına sahiptir. Paslanmaz levha göz önüne alındığında, malzeme mukavemeti arttıkça geri yaylanma miktarının artışı her iki bükümde de gözlemlenmiştir. 90°’lik bükümünde Galvaniz ve DKP levhaların geri yaylanma miktarları birbirine çok yakındır. Buna göre, 90°’lik büküm yapılmak istendiğinde DKP levhanın geri yaylanma değerleri çok daha az sapma ile sonuç vermektedir.



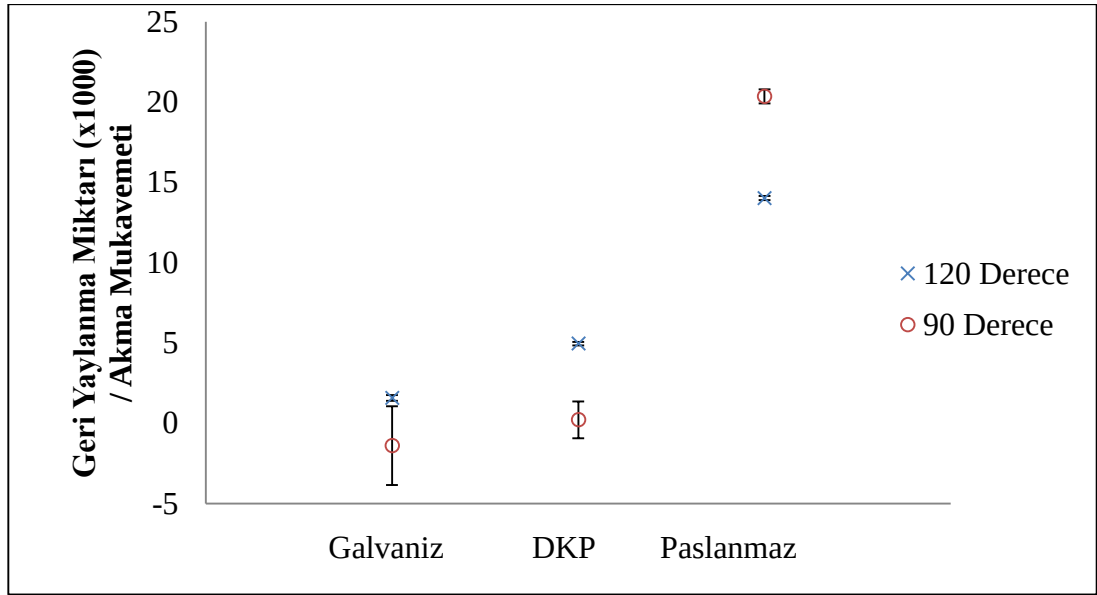
Şekil 5.7: 2,5 mm kalınlıktaki hadde yönüne dik kesilmiş levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının karşılaştırılması.

Hadde yönüne dik kesilerek bükme işlemine tabii tutulmuş 2,5 mm kalınlıktaki Galvaniz, DKP ve Paslanmaz levhaların ileri ve geri yaylanma miktarlarının karşılaştırılması Şekil 5.7’de verilmiştir. Paslanmaz ve DKP levhalarda paralel kesilerek bükülmüş numunelerdeki davranış gözlemlenmektedir. Ancak, Galvaniz levhanın 120°’lik bükümündeki geri yaylanma miktarındaki sapma diğer büküm açıları ve levhalara göre yüksektir. Ancak, bu sapma 0,74° olduğu göz önüne alınırsa, hassas olmayan bükümlerde dikkate alınmayacak kadar küçük bir değerdir. Paralel kesilerek bükülmüş numunelerde olduğu gibi, Paslanmaz levhanın 90°’lik bükümünde en yüksek geri yaylanma değeri görülmektedir. Paslanmaz levha göz önüne alındığında, malzeme mukavemeti arttıkça geri yaylanma miktarının artışı her iki bükümde de gözlemlenmiştir.



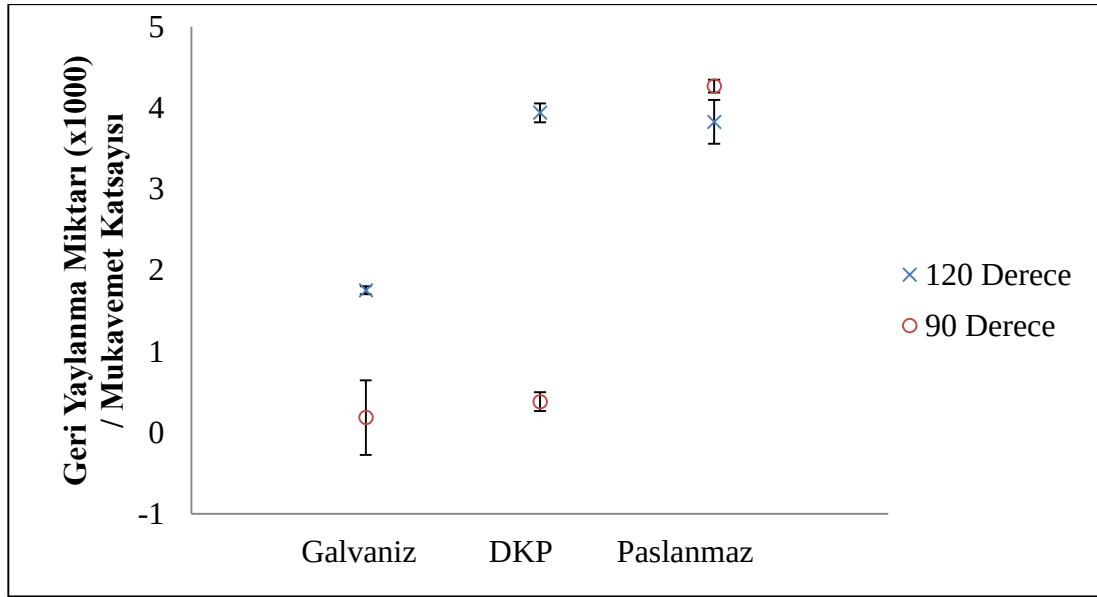
Şekil 5.8: 2,5 mm kalınlıktaki hadde yönüne paralel kesilmiş levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının akma mukavemetlerine göre oranı.

Hadde yönüne paralel kesilerek bükme işlemine tabii tutulmuş 2,5 mm kalınlıktaki Galvaniz, DKP ve Paslanmaz levhaların ileri ve geri yaylanma miktarlarının akma mukavemetlerine oranı Şekil 5.8’de verilmiştir. Her iki bükme işleminde de en yüksek geri yaylanma miktarı Paslanmaz levhada, en düşük ise Galvaniz levhada gözlemlenmiştir. Buna karşılık, en yüksek akma mukavemeti Paslanmaz levhada, en düşük akma mukavemeti ise DKP levhada gözlemlenmiştir. Elde edilen verilere göre, 90°’lik bükme işleminde Galvaniz ve DKP levhaların geri yaylanma miktarları birbirine çok yakın olmaktadır. 120°’lik bükme işleminde ise bu durum söz konusu olmamaktadır. Eğer, 90°’lik bir bükme işlemi gerçekleştirilmek istendiğinde, levhanın Galvaniz veya DKP olarak seçilmesi geri ve ileri yaylanma miktarı açısından belirgin bir fark yaratmayacaktır. Literatürdeki çoğu çalışma [5], [73], [74], artan akma mukavemeti ile birlikte geri yaylanma miktarının da arttığını belirtmektedir. DKP ve Galvaniz levhaların birbirlerine göre değerlendirilmelerinde bu durum desteklenememektedir. Ancak, Paslanmaz levha diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında, artan akma mukavemeti ile birlikte geri yaylanma miktarının da arttığı görülmüş ve daha önceki çalışmalar desteklenmiştir.



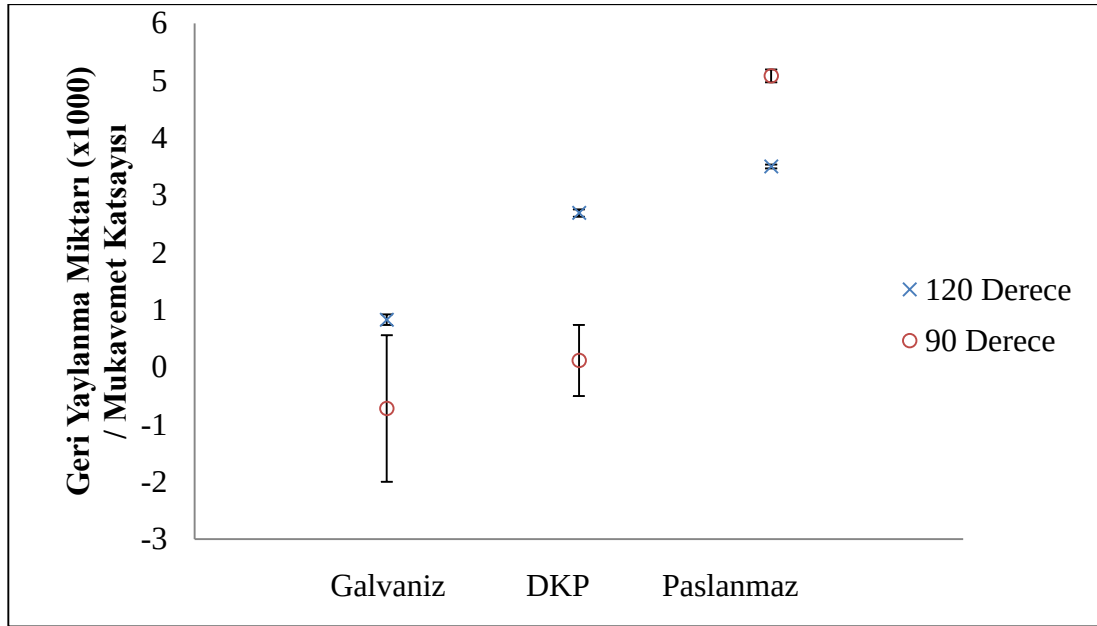
Şekil 5.9: 2,5 mm kalınlıktaki hadde yönüne dik kesilmiş levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının akma mukavemetlerine göre oranı.

Hadde yönüne dik kesilerek bükme işlemine tabii tutulmuş 2,5 mm kalınlıktaki Galvaniz, DKP ve Paslanmaz levhaların ileri ve geri yaylanma miktarlarının akma mukavemetlerine oranı Şekil 5.9’da verilmiştir. Her iki bükme işleminde de en yüksek geri yaylanma miktarı Paslanmaz levhada, en düşük ise Galvaniz levhada gözlemlenmiştir. Buna karşılık, en yüksek akma mukavemeti Paslanmaz levhada, en düşük akma mukavemeti ise Galvaniz levhada gözlemlenmiştir. Galvaniz levhanın 90°’lik bükümünde, 8 adet büküm sonucu geri yaylanma miktarı negatif çıkmış, yani, levha ileri yaylanmıştır. Hadde yönüne paralel kesilerek bükülmüş numunelerde olduğu üzere, 90°’lik bir bükme işlemi gerçekleştirilmek istendiğinde, levhanın Galvaniz veya DKP olarak seçilmesi geri ve ileri yaylanma miktarı açısından belirgin bir fark yaratmayacaktır. Aynı şekilde hadde yönüne paralel kesilmiş numunelerde olduğu gibi, Paslanmaz levhanın diğer malzemelere göre artan akma mukavemeti ile birlikte geri yaylanma miktarı artmıştır. Bu durumda önceki çalışmalar desteklenir durumdadır.



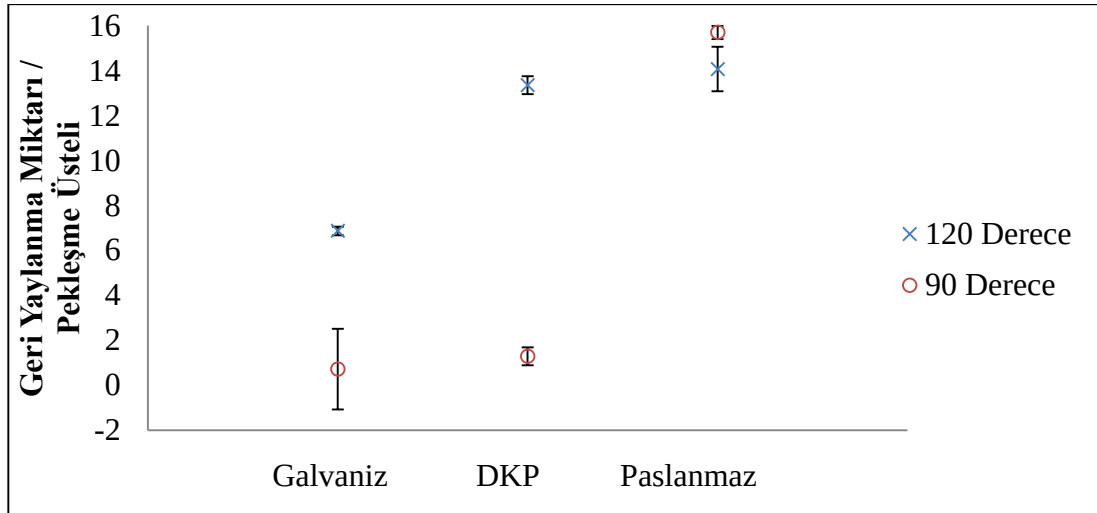
Şekil 5.10: 2,5 mm kalınlıktaki hadde yönüne paralel kesilmiş levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının mukavemet katsayılarına oranı.

Hadde yönüne paralel kesilerek bükme işlemine tabii tutulmuş 2,5 mm kalınlıktaki Galvaniz, DKP ve Paslanmaz levhaların ileri ve geri yaylanma miktarlarının mukavemet katsayılarına oranı Şekil 5.10’da verilmiştir. En yüksek mukavemet katsayısı Paslanmaz levhada, en düşük mukavemet katsayısı ise DKP levhada gözlemlenmiştir. DKP levhanın 120°’lik bükümündeki davranışı, Paslanmaz levha ile benzerlik göstermektedir. Diyagramdan da görülebileceği üzere, 90° bükümden, 120°’lik büküme geçerken sıçrama olmuştur. Bu sıçramanın nedeni, geri yaylanma miktarının 2°’den fazla bir artış göstermesidir. Bu durumun ortaya çıkmasına sebep olabilecek en kuvvetli sebep, bu malzemenin içinde kalan artık gerilmelerdir. Erkek kalıbın bükme sırasında üzerinde durma süresi arttırılarak bu tarz istenmeyen durumlar ortadan kaldırılabilir. Ancak, bu çalışmada erkek kalıp bükme sonrası levha üzerinden hemen kaldırılmış. Ek olarak, Galvaniz levhanın 90°’lik ve Paslanmaz levhanın 120°’lik bükümlerinde geri yaylanma miktarlarının düzensiz olduğundan sapma değerlerinin daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Daha önceki çalışmalarda [26], [39], mukavemet katsayısının geri yaylanma miktarı ile doğru orantılı olduğu belirtilmektedir. 90°’lik büküm göz önüne alındığında, Paslanmaz levhanın daha önceki çalışmaları desteklediği ortaya koyulmuştur.



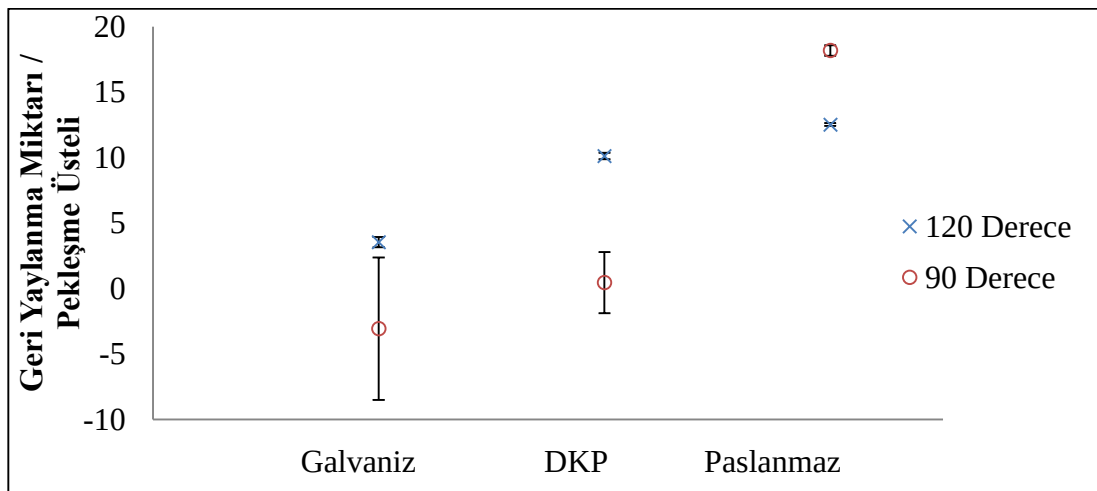
Şekil 5.11: 2,5 mm kalınlıktaki hadde yönüne dik kesilmiş levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının mukavemet katsayılarına oranı.

Hadde yönüne dik kesilerek bükme işlemine tabii tutulmuş 2,5 mm kalınlıktaki Galvaniz, DKP ve Paslanmaz levhaların ileri ve geri yaylanma miktarlarının mukavemet katsayılarına oranı Şekil 5.11’de verilmiştir. En yüksek mukavemet katsayısı Paslanmaz levhada, en düşük mukavemet katsayısı ise Galvaniz levhada gözlemlenmiştir. Hadde yönüne dik kesilerek bükülmüş Galvaniz ve DKP levhalar, 90°’lik büküm sırasında yakın özellik göstermişlerdir. Ayrıca, geri yaylanma miktarlarındaki sapma miktarları paslanmaz levhaya oranla daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Daha önceki çalışmalarda [26], [39], mukavemet katsayısının geri yaylanma miktarı ile doğru orantılı olduğu belirtilmektedir. DKP ve Galvaniz levhalar bu bilgi ile örtüşmemelerine rağmen, Paslanmaz levhayı diğer malzemeler ile karşılaştırdığımız takdirde, daha önceki çalışmalar desteklenir durumdadır.



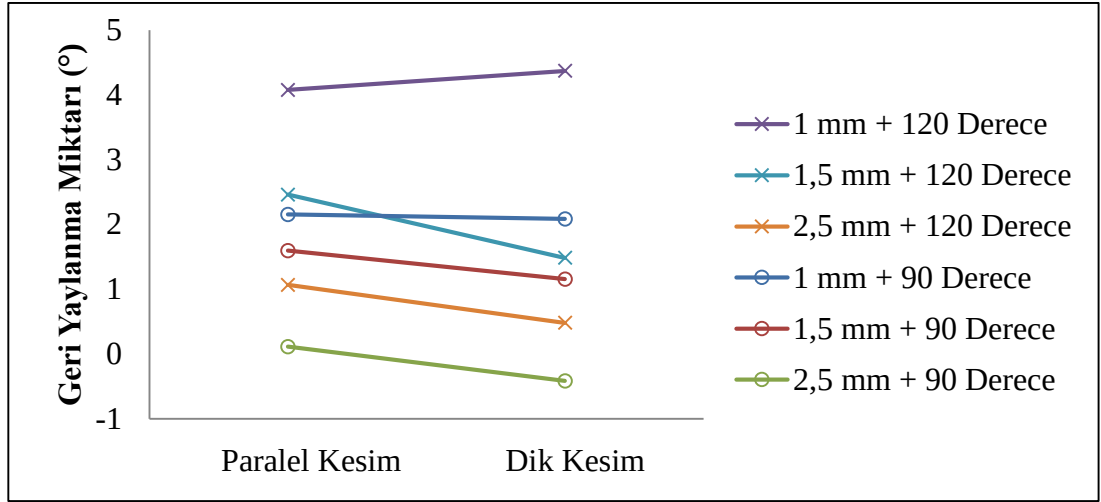
Şekil 5.12: 2,5 mm kalınlıktaki hadde yönüne paralel kesilmiş levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının pekleşme üsteline oranı.

Hadde yönüne paralel kesilerek bükme işlemine tabii tutulmuş 2,5 mm kalınlıktaki Galvaniz, DKP ve Paslanmaz levhaların ileri ve geri yaylanma miktarlarının pekleşme üstellerine oranı Şekil 5.12’de verilmiştir. En büyük pekleşme üsteli Paslanmaz levhada, en ufak üstel ise Galvaniz levhada tespit edilmiştir. Literatürde ve önceki çalışmalarda [5], [26], artan pekleşme üsteli ile birlikte geri yaylanma miktarının artacağı belirtilmektedir. Her iki büküm açısı için de bu durumun desteklendiği ortaya koyulmuştur.



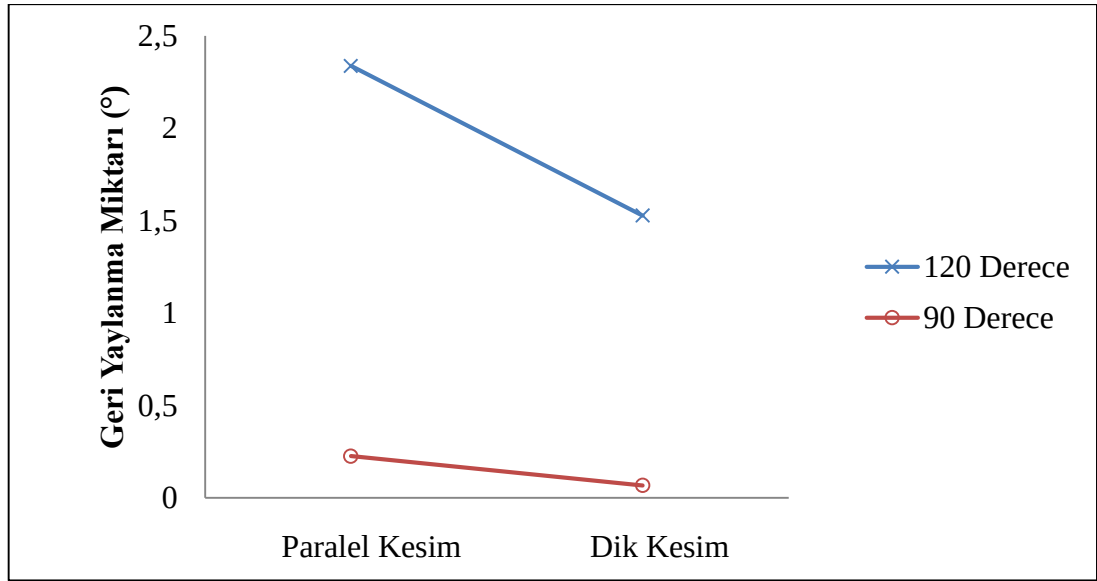
Şekil 5.13: 2,5 mm kalınlıktaki hadde yönüne dik kesilmiş levhaların geri ve ileri yaylanma miktarlarının pekleşme üsteline oranı.

Hadde yönüne dik kesilerek bükme işlemine tabii tutulmuş 2,5 mm kalınlıktaki Galvaniz, DKP ve Paslanmaz levhaların ileri ve geri yaylanma miktarlarının pekleşme üstellerine oranı Şekil 5.13’de verilmiştir. En büyük pekleşme üsteli Paslanmaz levhada, en ufak üstel ise Galvaniz levhada tespit edilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda [5], [26], pekleşme üsteli ile geri yaylanma miktarının doğru orantılı olduğu belirtilmektedir. Her iki büküm açısı için de bu durumun desteklendiği ortaya konulmuştur.



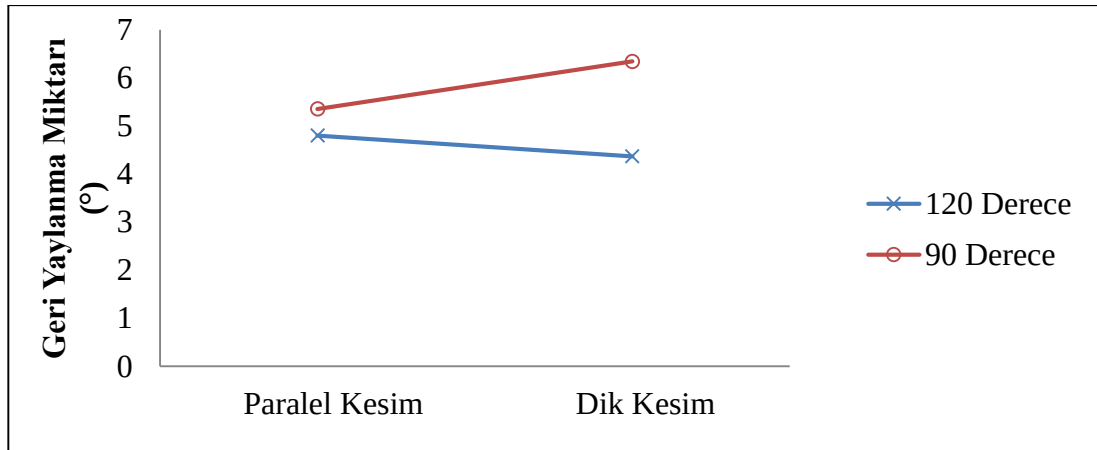
Şekil 5.14: Galvaniz levhaların hadde yönüne göre geri yaylanma miktarları.

Galvaniz levhaların hadde yönüne göre geri yaylanma miktarları Şekil 5.14’de verilmiştir. Geri yaylanma miktarlarının ortalaması alınarak, her kalınlık ve bükme açısı kendi içinde sadece hadde yönüne göre değerlendirilmiştir. 1 mm kalınlığındaki Galvaniz levhanın 120°’lik bükümü hariç, diğer tüm kalınlık ve büküm açılarındaki, hadde yönüne paralel olarak kesilip bükülen levhaların geri yaylanma miktarlarının, hadde yönüne dik olarak kesilip bükülen levhalara göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum akma mukavemet değeriyle açıklanmaktadır. Dik kesilmiş numuneler bükme yönü göz önüne alındığında haddeye paralel yönde bükülecektir. Tablo 5.4’te görülebileceği üzere, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarındaki Galvaniz numunelerin akma mukavemetleri haddeye paralel yönde daha düşüktür. 1 mm kalınlık için ise tam tersi durum söz konusudur.



Şekil 5.15: DKP levhaların hadde yönüne göre geri yaylanma miktarları.

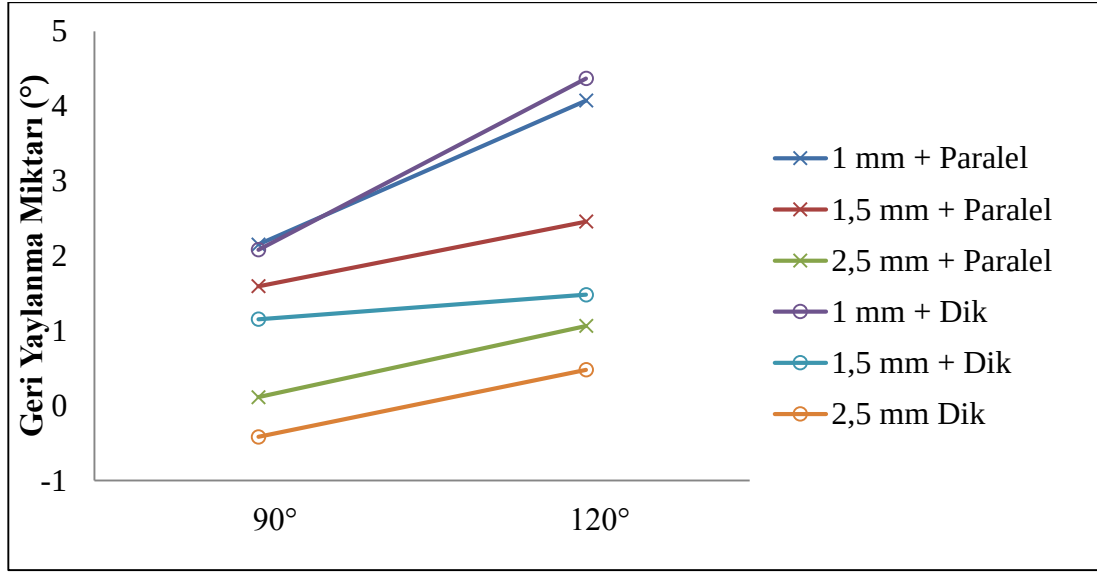
DKP levhaların hadde yönüne göre geri yaylanma miktarları Şekil 5.15'te verilmiştir. Hadde yönüne paralel olarak kesilip bükülen levhaların geri yaylanma miktarlarının, hadde yönüne dik olarak kesilip bükülen levhalara göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Çekme testinden alınan sonuçlara göre, hadde yönüne dik kesilerek bükülen numunelerin akma mukavemetleri, hadde yönüne paralel kesilerek bükülen numunelerden daha azdır ve bu durumdan dolayı büküm sonrası geri yaylanma miktarları daha az olmaktadır.



Şekil 5.16: Paslanmaz levhaların hadde yönüne göre geri yaylanma miktarları.

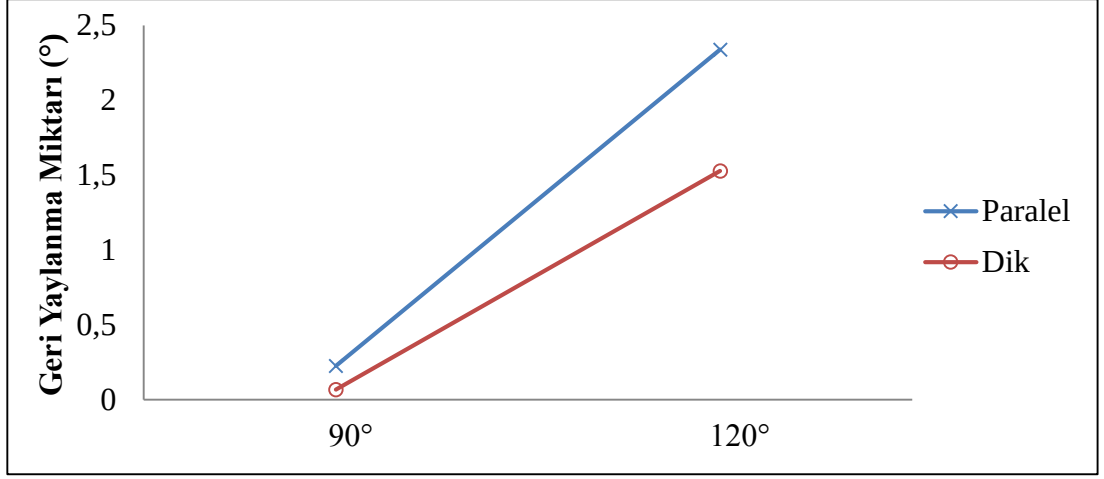
Paslanmaz levhaların hadde yönüne göre geri yaylanma miktarları Şekil 5.16'da verilmiştir. Paslanmaz levhaların hadde yönüne göre geri yaylanma miktarı bükme

açısına göre değişiklik göstermektedir. 90°'lik bükmede dik kesilen levhada geri yaylanma daha fazla ancak, 120°'lik bükmede tam tersi durum söz konusudur. 120°'lik bükme göz önüne alındığında hadde yönüne dik kesilmiş numunelerin bükümü sonucu daha az geri yaylanma göstermesi daha düşük pekleşme üsteline sahip olmaları ile açıklanabilir. 90°'lik ise bu durum gerçekleştirmemiştir, daha detaylı bir inceleme gerekmektedir.



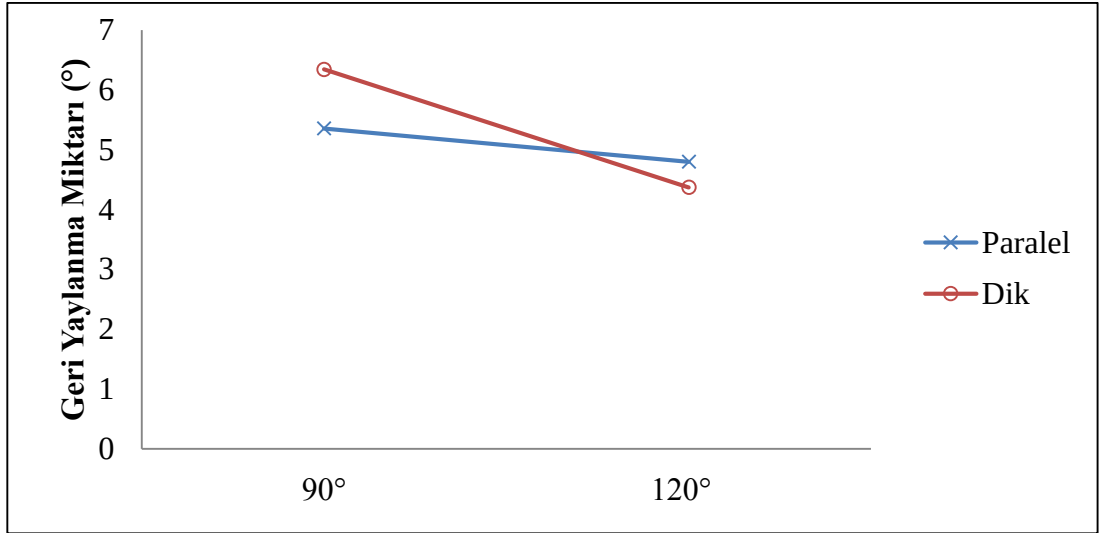
Şekil 5.17: Galvaniz levhaların bükme açısına göre geri yaylanma miktarları.

Galvaniz levhaların bükme açısına göre geri yaylanma miktarları Şekil 5.17'de verilmiştir. Hadde yönü ne olursa olsun, bükme açısının artmasıyla geri yaylanma miktarının da arttığı gözlemlenmektedir. Malzemelerin daha düşük açılara bükülmesi ile geri yaylanma miktarının artacağı daha önceki çalışmalarda ortaya koyulmuştur [66], [75]. Bu çalışma sonucu elde edilen değerlere göre Galvaniz levhaların büküm açısına göre geri yaylanma miktarlarının daha detaylı incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 5.18: DKP levhaların bükme açısına göre geri yaylanma miktarları.

DKP levhaların bükme açısına göre geri yaylanma miktarları Şekil 5.18’de verilmiştir. Hadde yönü ne olursa olsun, bükme açısının artmasıyla geri yaylanma miktarının da arttığı gözlemlenmektedir. Malzemelerin daha düşük açılara bükülmesi ile geri yaylanma miktarının artacağı daha önceki çalışmalarda ortaya koyulmuştur [66], [75]. Bu çalışma sonucu elde edilen değerlere göre DKP levhaların büküm açısına göre geri yaylanma miktarlarının daha detaylı incelenmesi gerekmektedir.



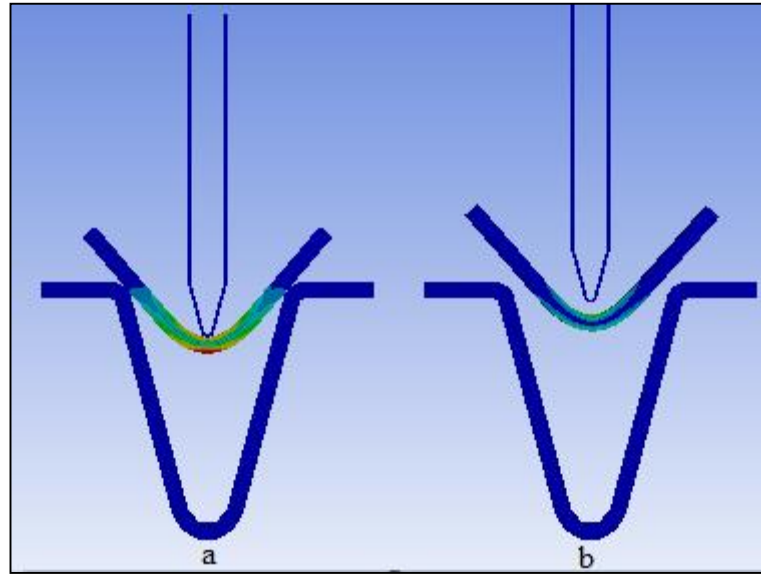
Şekil 5.19: Paslanmaz levhaların bükme açısına göre geri yaylanma miktarları.

Paslanmaz levhaların bükme açısına göre geri yaylanma miktarları Şekil 5.19’da verilmiştir. DKP ve Galvaniz levhaların aksine, artan bükme açısı ile birlikte

Paslanmaz levhanın geri yaylanma miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum daha önce yapılan çalışmaları desteklemektedir [66], [75].

5.3. Deney ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deneylerde olduğu gibi, tüm analizler aynı kalıp ve sıcaklıkta yapılmıştır. Analizler sırasında malzemelerin akma mukavemet ve mukavemet katsayı değerleri 2. çekme testi sonucu elde edilen hadde yönüne paralel numunelerin değerleri girilmiştir. Şekil 5.20.a'da erkek kalıp levha üzerinden kalkmadan hemen önceki anı göstermektedir. Bükme işlemin gerçekleştirildikten sonra yine erkek kalıba tanımlanan hareket ile levha üzerinden kalkması sağlanmış, bu sayede levha üzerinde geri yaylanma hareketinin ortaya çıkması sağlanmıştır. Şekil 5.20.b'de erkek kalıbın levha üzerinden kalktığı an gösterilmektedir.



Şekil 5.20: Bükme işlemi simülasyonu.

Yapılan sonlu elemanlar analizleri sonucu elde edilen geri yaylanma miktarları Tablo 5.7'de verilmiştir.

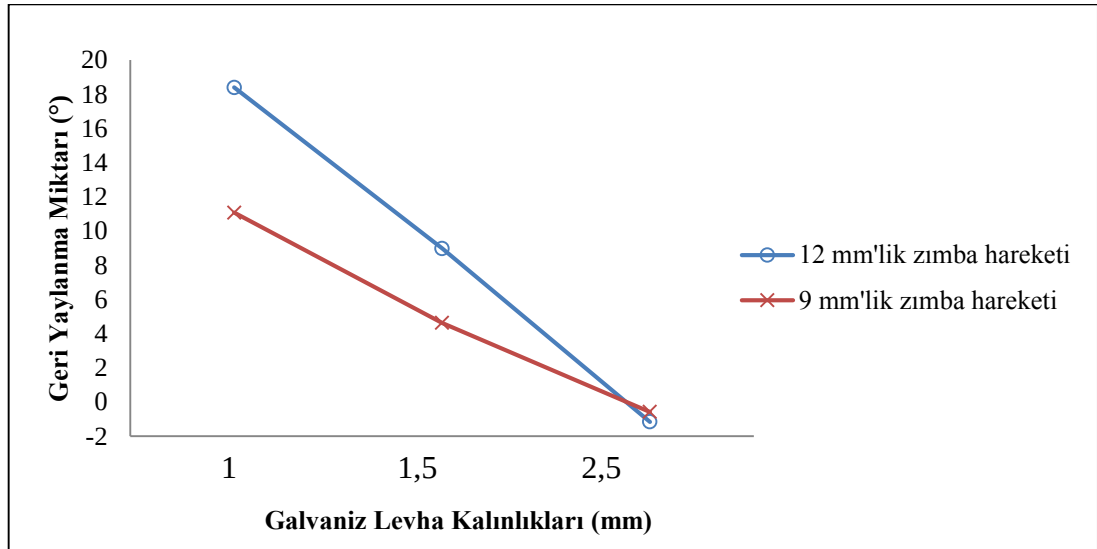
Tablo 5.7: Sonlu elemanlar analizi sonucu geri yaylanma miktarları.

Malzeme	Kalınlık (mm)	Geri Yaylanma Miktarı (°)	
		12 mm'lik zımba hareketi	9 mm'lik zımba hareketi
Galvaniz	1	18,4	11,08
	1,5	8,98	4,63
	2,5	-1,16	-0,58
DKP	2,5	-0,75	-0,21
Paslanmaz	2,5	9,5	4,45

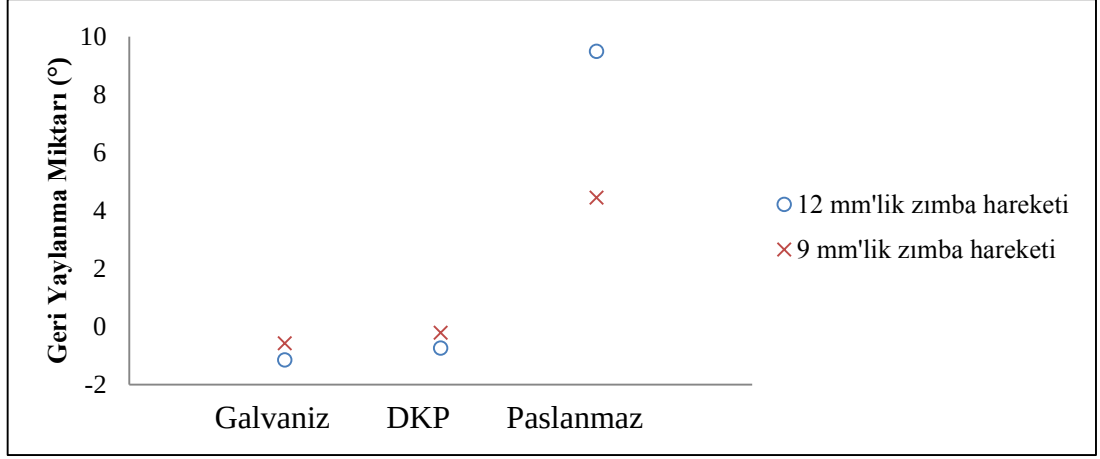
Analiz sonucu elde edilen verilere göre;

Aynı malzemenin farklı kalınlıkları ile yapılan analiz sonuçları karşılaştırıldığında, kalınlık artışının geri yaylanmayı azalttığı sonucu elde edilmiştir. Bu durum deneyler ile elde edilen sonuçları destekler niteliktedir.

Şekil 5.21’de Galvaniz levhalara ait, Şekil 5.22’de ise 2,5 mm kalınlıktaki Galvaniz, DKP ve Paslanmaz levhalara ait numunelerin analiz sonuçları verilmektedir.



Şekil 5.21: Galvaniz levhalar analiz sonuçları.



Şekil 5.22: 2,5 mm kalınlıktaki levhaların analiz sonuçları.

Aynı kalınlardaki farklı malzemeler ile yapılan analiz sonuçları karşılaştırıldığında, artan akma mukavemeti ile birlikte geri yaylanmanın arttığı ortaya koyulmuştur. Deneyler sonucu Paslanmaz levhaların bükümü ile elde edilen sonuçları destekler niteliktedir.

Zımbanın kalıp içerisine olan hareketi azaltılması sonucu elde edilen malzeme daha az bükülecektir. Diğer bir değişle, bükme açısı büyüyecektir. Yapılan analizler sonucu, zımbanın 9 mm aşağıya inmesi ile daha büyük bükme açısı elde edilmiştir. Tüm malzeme ve kalınlıklarda malzemenin daha az bükülmesi ile meydana gelen geri yaylanma miktarının azaldığı sonucu ortaya koyulmuştur. Bu durum deneyler sırasında Paslanmaz levhaların daha büyük bükme açılarında daha fazla geri yaylanma miktarına sebep olduğu sonucunu destekler niteliktedir.

6. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Deneysel çalışmada Galvaniz, DKP ve Paslanmaz çelik levha malzemeler kullanılmıştır. Bükme işlemine kalınlık etkisini incelemek amacıyla aynı malzemeden 3 farklı kalınlıkta numune alınmıştır. Bunun için bükme deneyinde, 1 mm, 1,5 mm ve 2,5 mm levha kalınlıklarında Galvaniz malzeme kullanılmıştır. Malzeme etkilerini incelemek için ise 2,5 mm kalınlıklarında DKP ve Paslanmaz çelik malzeme bükme deneylerinde kullanılmıştır. Malzeme özelliklerini belirlemek için standartlara uygun çekme test numuneleri hazırlanmış ve testleri yapılmış ve elde edilen veriler ile çekme mukavemeti, akma mukavemeti, pekleşme üsteli ve mukavemet katsayıları belirlenmiştir. Belirlenen özellikler geri yaylanma miktarları ile ilişkilendirilerek bükme üzerine etkileri hakkında veriler değerlendirilmiştir. Diğer değişkenleri sabit tutmak amaçlı tüm malzemeler ortam sıcaklığında, herhangi bir yağlayıcı kullanılmadan, zımba uç yarıçapı 1 mm olan kalıpta havada bükülmüştür. Tüm malzemelerden hadde yönüne paralel ve hadde yönüne dik olarak numuneler alınmış, 90° ve 120° bükümü gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular aşağıda sırasıyla verilmiştir;

Çekme testi sonucu en yüksek çekme mukavemetine ve akma mukavemetine sahip malzemenin Paslanmaz çelik olduğu saptanmıştır. Buna göre; Paslanmaz çelik levhanın bükülmesi için gereken kuvvet en fazla olacaktır, bir diğer anlamda, elastik bölgeyi aşp, plastik bölgeyi geçmek için daha fazla kuvvet gerekmektedir.

Paslanmaz çelik en yüksek mukavemet katsayısına sahip malzeme olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda, en yüksek pekleşme üsteline sahip malzemedir. Paslanmaz çelik, boyun vermeden önce en çok uzamayı gösteren malzemedir.

1 mm, 1,5 mm ve 2,5 mm kalınlıklara sahip Galvaniz levhanın 90°'lik ve 120°'lik bükümleri sonucu, hadde yönü fark etmeksizin, levha kalınlığının artması ile birlikte geri yaylanma miktarının azaldığı belirlenmiştir. Bu deneysel sonuçlar yapılan sonlu elemanlar analizleriyle desteklenmiştir. Kalınlığın bükme işlemi sonrası istenilen açıda ürün elde edilebilmesi için en önemli faktör olduğu fikri bir daha ortaya koyulmuştur.

Akma mukavemetinin geri yaylanma üzerine etkisi incelendiğinde, DKP ve Galvaniz levhaların belirgin bir davranış sergilemediği, ancak Paslanmaz levhanın hem hadde yönüne paralel, hem de hadde yönüne dik olarak bükümü sonucu en yüksek geri yaylanma miktarını gösterdiği görülmüştür. Sonuç olarak, artan akma

değeri ile birlikte geri yaylanma miktarlarının da arttığı belirlenmiştir. Bu sonuç çalışma sırasında yapılan sonlu elemanlar analiz değerleriyle desteklenmektedir. DKP ve Galvaniz levhaların daha detaylı bir incelemeye gerektiği sonucuna varılmıştır.

Mukavemet katsayısının geri yaylanma miktarı üzerine etkisi incelendiğinde, özellikle hadde yönüne paralel kesilmiş numunelerde DKP ve Galvaniz levhaların beklenenden ters davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Paslanmaz levha ise, hadde yönüne paralel kesilmiş numunenin 120°'lik bükümünde ve hadde yönüne dik kesilmiş numunenin her iki açıda da bükümünde beklendiği üzere, artan mukavemet katsayısı ile birlikte geri yaylanma miktarının da arttığı belirlenmiştir. Bu sonuç çalışma sırasında yapılan sonlu elemanlar analizleriyle desteklenmektedir.

Geri yaylanma miktarının artışı pekleşme üsteli ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Ancak, deney malzemelerinin büküm sonuçlarına göre, aynı mukavemet katsayısının geri yaylanma miktarına DKP ve Galvaniz levhalar, her iki hadde yönünde kesilmiş numuneler için karışık sonuçlar vermiştir. Paslanma levhanın büküm sonuçlarına göre, artan pekleşme üsteli ile birlikte geri yaylanma miktarının da arttığı belirlenmiştir.

Malzeme ve kalınlıklar aynı tutularak, hadde yönü için yapılan karşılaştırmada, 1 mm kalınlıktaki Galvaniz levhanın 120°'lik bükümü hariç, Galvaniz levhanın diğer tüm kalınlık ve büküm açılarında, hadde yönüne paralel kesilmiş numunelerin geri yaylanma miktarının, hadde yönüne dik kesilerek bükülen numunelerin geri yaylanma miktarından büyük olduğu belirlenmiştir. 1 mm kalınlıktaki Galvaniz levhanın 120°'lik bükümünde ise durum tam tersini göstermektedir. DKP levhaların her iki açı için bükümünde de, hadde yönüne paralel kesilmiş numunenin geri yaylanma miktarının daha büyük olduğu belirlenmiştir. Paslanmaz levha için bu durum daha belirsiz bir hal almaktadır. 120°'lik büküm de hadde yönüne paralel kesilerek bükülen numunelerin geri yaylanma miktarı, hadde yönüne dik kesilerek bükülen numunelerden fazla belirlenmesine rağmen, 90°'lik bükümde bu durumun tam tersine rastlanmıştır. Büküm sırasında hadde yönünün önemli bir faktör olduğu bir daha belirlenmiştir.

Büküm açısının geri yaylanma miktarına olan etkisi hadde yönü fark etmeksizin DKP ve Galvaniz levhalarda, artan büküm açısı ile birlikte artan geri yaylanma miktarı olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak, Paslanmaz levha ele alındığında durum tam tersine dönmektedir.

Havada (serbest) bükme işlemi, geri yaylanma miktarının hassasiyet gerektirmediği durumlarda endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Piyasa genelinde DKP ve Galvaniz levhalar fiyatından dolayı tercih edilmektedir. Paslanmaz levhalar ise bu iki malzemeye göre daha yüksek fiyatlıdır. Tüm bu çalışmaların ışığında, yapılacak işin hassasiyeti hakkında karar verilerek, en yüksek kazanç ve en yüksek kalite hesabı yapılarak bükme işleminde kullanılacak malzemeye karar verilmesi gereklidir.

6.1. Öneriler

Yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verilere ve ileride yapılacak çalışmalara da yol göstermesi açısından aşağıda belirtilen çalışmalar yapılabilir;

Paslanmaz ve DKP levhaların da farklı kalınlıkları ele alınarak, değişik malzeme özelliklerinde kalınlık etkisi araştırılabilir.

Levhalar üzerinde 90° ve 120° bükme işlemlerine ek olarak 60°, 45° ve 30°'lik bükme işlemleri yapılarak, düşük bükme açılarında geri yaylanma miktarları incelenebilir.

Zimba uç yarıçapı ve kalıp ağız açıklığı değiştirilerek bükme kalıplarının geri yaylanma miktarı üzerine etkileri incelenebilir.

Hadde yönünün etkisi sonlu elemanlar analizleriyle incelenebilir.

Ortam sıcaklığından farklı değerlerde büküm yapılarak sıcaklığın ve büküm sırasında yağlama yapılarak geri yaylanma üzerine etkileri incelenebilir.

Malzeme içyapısı ve malzeme üzerine yapılacak ısı işlemin bükme davranışlarına etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Tekiner Z., (2004), "An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies", *Journal of Materials Processing Technology*, 145 (1), 109-117
- [2] Tekaslan Ö., Şeker U., Özdemir A., (2006), "Determining springback amount of steel sheet metal has 0.5 mm thickness in bending dies", *Materials and Design*, 27 (3), 251-258
- [3] Gautam B., Kumar P., Chandra V., Rawat K., (2016), "Analysis of springback variation in V bending", *International Journal of Engineering Research & Technology*, 5 (2), 555-560
- [4] Fei D., Hodgson P., (2006), "Experimental and numerical studies of springback in air V-bending process for cold rolled TRIP steels", *Nuclear Engineering and Design*, 236 (18), 1847-1851
- [5] Panthi S. K., Ramakrishnan N., Ahmed N., Singh S. S., Goel M. D., (2010), "Finite Element Analysis of sheet metal bending process to predict the springback", *Materials & Design* 31 (2), 657-662
- [6] Slota J., Jurcisin M., (2012), "Experimental and numerical prediction of springback in V-bending of anisotropic sheet metals for automotive industry", *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika*, 84 (284), 55-68
- [7] Zhang D. J., Cui Z. S., Chen Z. Y., Ruan X. Y., (2007), "An analytical model for predicting sheet springback after V-bending", *Journal of Zhejiang University Science A*, 8 (2), 237-244
- [8] Jooybari M. B., Rahmani B., Daezadeh V., Gorji A., (2009), "The study of spring-back of CK47 steel sheet in V-die and U-die bending processes", *Materials & Design*, 30 (7), 2410-2419
- [9] Sever N. K., Mete O., H., Demiralp Y., Choi C., Altan T., (2012), "Springback prediction in bending of AHSS-DP 780", 40th North American Manufacturing Research Conference, Notre Dame, IND, USA, 4-8 June
- [10] Nasrollahi V., Arezoo, (2012), "Prediction of springback in sheet metal components with holes on the bending area, using experiments, finite element and neural networks", *Materials & Design*, 36, 331-336
- [11] Dilipak H., Özdemir M., Sarikaya M., (2013), "Effects of material properties and punch tip radius on spring-forward in 90 V bending processes", *Journal of Iron and Steel Research, International*, 20 (10), 64-69

- [12] Imai K., Koyama J., Jin Y., (2008), "High-accuracy V-bending system by real time identifying material property", *Journal of Materials Processing Technology*, 201 (1), 193-197
- [13] Erdin M. E., Atmaca A., (2016), "Effects of Holding Force on the Springback Behavior of Annealed Aluminum Plates", *Procedia Engineering* 149, 56-61
- [14] Gisario A., Barletta M., Venetacci S., (2016), "Improvements in springback control by external force laser-assisted sheet bending of titanium and aluminum alloys", *Optics & Laser Technology* 86, 46-53
- [15] Singh J., Kim M. S., Choi S. H., (2017), "The effect of strain heterogeneity on the deformation and failure behaviors of E-form Mg alloy sheets during a mini V-bending test", *Journal of Alloys and Compounds* 708, 694-705
- [16] Ahmadi M., Sadeghi B. M., Arabi H., (2017), "Experimental and numerical investigation of V-bent anisotropic 304L SS sheet with spring-forward considering deformation-induced martensitic transformation", *Materials & Design*, 123 (5), 211-222
- [17] Karataş E., (2009), "Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Sac Metalin Büküm Şekillerine Göre Deformasyonunun İncelenmesi", Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü
- [18] Erdemir Grubu, (2017), *Ürün Kataloğu 2017*, Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş.
- [19] Semistain S. L., (2006), "ASM Handbook Volume 14B Metalworking: Sheet Forming", ASM International
- [20] Groover M. P., (2010), "Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems", 4th Edition, John Wiley & Sons Inc.
- [21] Schuler GmbH, (1998), "Metal Forming Handbook", Springer-Verlag GmbH
- [22] Charles W., Benedict J. T., Veilleux R. F., (1984), "Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Volume 2: Forming", 4th Edition, Society of Manufacturing Engineers (SME)
- [23] Hosford W. F., Caddell R. M., (2011), "Metal Forming: Mechanics and Metallurgy, 4th Edition", Cambridge University Press
- [24] Suchy I., (2006), "Handbook of Die Design, 2nd Edition", McGraw-Hill
- [25] Ataşımşek S., (1977), "Sac Kalıpları", M.E.B.
- [26] Altan T., Tekkaya A. E., (2012), "Sheet Metal Forming: Processes and Applications", ASM International

- [27] Wang J., Verma S., Alexander R., Gau J. T., (2008), "Springback control of sheet metal air bending process", *Journal of Manufacturing Processes*, 10 (1), 21-27
- [28] Marciniak Z., Duncan J. L., Hu S. J., (2002), "Mechanics of Sheet Metal Forming", 2nd Edition, Butterworth-Heineman
- [29] Zajkani A., Hajbarati H., (2017), "Investigation of the variable elastic unloading modulus coupled with nonlinear kinematic hardening in springback measuring of advanced high-strength steel in U-shaped process", *Journal of Manufacturing Process*, 25, 391-401
- [30] Duncan J. L., Ding S. C., Jiang W. L., (1999), "Moment-curvature measurement in thin sheet – part II: yielding and kinking in aged steel sheet", *International Journal of Mechanical Sciences*, 41, 261-267
- [31] Gupta R. K., Mathew C., Ramkumar P., (2015), "Strain hardening in aerospace alloys", *Frontiers in Aerospace Engineering*, 4 (1)
- [32] Diegel O., (2002), "Bendworks: The fine-art of Sheet Metal Bending", Complete Design Services
- [33] Sakai S., (2013), "Method of Bending Sheet Metal", U.S. Patent 8,601,854 B2
- [34] Gite R. E., Phad K. S., Bajaj D. S., (2016), "Spring back effect analysis of bracket using finite element analysis", *International Advanced Journal in Science, Engineering and Technology*, 3 (1), 246-255
- [35] MEGEP, (2013), "Makine Teknolojisi, Bükme Kalıpları 1", Mesleki Eğitim ve Öğretim Sistemini Güçlendirme Projesi (M.E.B.)
- [36] Yenice M. M., (2006), "Bükme İle Şekillendirilen Saclarda Geri Yaylanma Davranışlarının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi
- [37] Çetin B., Billur E., Durkaya G., Yılmaz M. M., Atay A., Oğuz A. G., Onaylı O., Yalazı U. C., Kılıcı E., (2016), "Investigation of The Effect of Servo – Press Forming In Springback and Minimum Bending Radii of Ultra High Strength Steels", 17. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, Bursa, Türkiye, 12-15 Temmuz
- [38] Ahmed G. M. S., Ahmed H., Mohiuddin M. V., Md S. S. S., (2014), "Experimental Evaluation of Springback in Mild Steel and its Validation using LS-DYNA", *Procedia Materials Science* 6, 1376-1385
- [39] Sharad G., Nandedkar V. M., (2014), "Springback in Sheet Metal U Bending-Fea and Neural Network Approach", *Procedia Materials Science* 6, 835-839
- [40] Şenol Ö., Esat V., Darendeliler H., (2014), "Springback analysis in air bending process through experiment based artificial neural networks", *Procedia Engineering* 81, 999-1004

- [41]Leu D. K., (2016), “A simplified approach for distinguishing between spring-back and spring-go in free U-die bending process of SPFC 440 sheets”, *Materials & Design* 94, 314-321
- [42]Hosford W. F., (2005), “Mechanical Behavior of Materials”, 1st Edition, Cambridge University Press
- [43]Leu D. K., (1997), “A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals”, *Journal of Materials Processing Technology* 66, 9-17
- [44]Gomes C., Onipede O., Lovell M., (2005), “Investigation of springback in high strength anisotropic steels”, *Journal of Materials Processing Technology* 159, 91-98
- [45]Verma R. K., Haldar A., (2007), “Effect of normal anisotropy on springback”, *Journal of Materials Processing Technology* 190, 300-304
- [46]Mkaddem A., Saidane D., (2007), “Experimental approach and RSM procedure on the examination of springback in wiping-die bending processes”, *Journal of Materials Processing Technology* 189, 325-333
- [47]Chikalthankar S. B., Belurkar G. D., Nandedkar V. M., (2014), “Factors Affecting on Springback in Sheet Metal Bending: A Review”, *International Journal of Engineering and Advanced Technology* 3
- [48]Farsi M. A., Arezoo B., (2011), “Bending Force and Spring-Back in V-Die-Bending of Perforated Sheet-Metal Components”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 33 (1), 45-51
- [49]Özdemir M., Gökmeşe H., Dilipak H., Yılmaz V., (2015), “Characterization of Microstructure and Bending Response of Sheet Material: Influence of Thickness”, *Journal of Advanced Materials and Processing* 3 (1), 3-14
- [50]Özdemir M., Gökmeşe H., Dilipak H., Yılmaz V., (2014), “Farklı Isıl İşlemlerin 16Mo3 (1.5415) Sac Malzemenin İleri-Geri Esneme Miktarına Etkisinin Deneysel ve Mikroyapısal Olarak İncelenmesi”, 2. Uluslararası Mühendislik ve Bilim Alanında Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, Türkiye 18-20 Haziran
- [51]Bakhshivash S., Sadeghi B. M., Rahimi F., Haghshenas M., (2016), “Effect of Bending Angle and Punch Tip Radius on Spring-forward in an Al-Mg-Si Alloy”, XXVIII International Mineral Processing Congress, Quebec, Canada, 11-15 September
- [52]Işıktaş A., Ay İ., (2015), “Farklı Kalınlıklardaki Dkp Sacın Farklı Açılarda Yapılan V-Bükme İşlemindeki Geri Esnemelerinin İncelenmesi”, BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 17 (1), 59-69

- [53]Buang M. S., Abdullah S. A., Saedon J., (2015), “Effect of Die and Punch Radius on Springback of Stainless Steel Sheet Metal in the Air V-Die Bending Process”, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences* 8, 1322-1331
- [54]Özdin K., Büyük E., Abdalov F., Bayram H., Çini A., (2014), “Investigation of Spring-back and Spring-go of AISI 400 S Sheet Metal in “V” Bending Dies Depending on Bending Angle and Punch Radius”, *Applied Mechanics and Materials* 532, 549-553
- [55]Altan T., Livatyali H., (2001), “Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer aided design methods Part 1. Experimental investigations”, *Journal of Materials Processing Technology* 117, 262-268
- [56]Kattimani K. D., Kakamarim P. K., Tavildar R. K., (2015), “Springback Analysis of Wipe Bending Process by Ansys”, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research* 2 (8), 3253-3267
- [57]Ma N., (2013), “Prediction of springback for ultra high strength steel sheets”, *Doctoral Thesis, RWTH Aachen University*
- [58]Tang B., Zhao G., Wang Z., (2008), “A mixed hardening rule coupled with Hill48’ yielding function to predict the springback of sheet U-bending”, *International Journal of Material Forming* 1 (3), 169
- [59]Gau J. T., Kinzel G. L., (2001), “A new model for springback prediction in which the Bauschinger effect is considered”, *International Journal of Mechanical Sciences* 43, 1813-1832
- [60]Gau J. T., Principe C., Yu M., (2007), “Springback behavior of brass in micro sheet forming”, *Journal of Materials Processing Technology* 19, 7-10
- [61]Chen C. C., Jiang C. P., (2011), “Grain Size Effect in the Micro-V-Bending Process of Thin Metal Sheets”, *Materials and Manufacturing Processes* 26 (1), 78-83
- [62]Özdemir M., Gökmeşe H., Dilipak H., Yılmaz V., (2015), “Aşınmaya Karşı Dirençli Sac Malzemenin Mikro Yapısal Karakterizasyonu ve Şekillendirilebilirliğinin İncelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji* 3 (1), 385-393
- [63]Lee J., Lee K., Kim D., Choi H., Kim B., (2015), “Spring-back and spring-go behaviors in bending of thick plates of high-strength steel at elevated temperature”, *Computational Materials Science* 100, 76-79
- [64]Kim H. S., Koç M., (2008), “Numerical investigations on springback characteristics of aluminum sheet metal alloys in warm forming conditions”, *Journal of Materials Processing Technology* 204 (1), 370-383
- [65]Lazim D., (2003), “Springback in Draw-Bending on Aerospace Alloys”, *Master’s Thesis, McGill University*

- [66]Vasudevan D., Srinivasan R., Padmanabhan P., (2011), "Effect of process parameters on springback behaviour during air bending of electrogalvanised steel sheet", *Journal of Zhejiang University-Science A* 12 (3), 183-189
- [67]Jabbari A., Shokoohi S. S., (2014), "Springback reduction in sheet metal bending process", *Indian Journal of Scientific Research* 1 (2), 400-403
- [68]Aso T., Iizuka T., Ota T., (2015), "A New Method of Producing Bend Angle by Applying Sheet Forging to V-bending Process", *Key Engineering Materials* 651-653, 1066-1071
- [69]Marcondes P. V. P., Santos R. A. D., Haus S. A., (2016), "The coining force influence on springback in TRIP800 steel V and L-bending processes", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 38 (2), 455-463
- [70]Leu D. K., (2015), "Position deviation and springback in V-die bending process with asymmetric dies", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 79 (5-8), 1095-1108
- [71]Liu X., Zhao S., Qin Y., Zhao J., Nawang W. A. W., (2017), "A parametric study on the bending accuracy in micro W-bending using Taguchi method", *Measurement* 100, 233-242
- [72]Murena E., Mpofu K., Trimble J., Manjoro E., (2016), "A Methodology to Improve Sheet Metal Bending CAPP for Reconfigurable Bending Press Machines Using Web Based System", 7th International Conference on Appropriate Technology 'Sustainable Technologies to Empower Communities', Victoria Falls, Zimbabwe, 23-26 November
- [73] Aslan Y., Karaağaç İ., (2014), "V Bükmede Geri Esneme Davranışları", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji* 2 (3), 255-263
- [74] Qudeiri J. A., Khadra F. A., Ahmari A. A., Umar U., (2013), "Effect of Material and Geometrical Parameters on the Springback on Metallic Sheets", *Life Science Journal* 10 (2), 1531-1536
- [75] Tekaslan Ö., Gerger N., Şeker U., (2008), "Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in "V" bending dies", *Materials and Design* 29 (5), 1043-1050

ÖZGEÇMİŞ

Çağlar Altuğ 1988 yılında Bursa’da doğdu. 2006 yılında başladığı Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünü 2011 yılında başarıyla tamamlayarak 2014 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2015 yılından bu yana Tekso Teknik Soğutma San. ve Tic. A.Ş. firmasında kalite sorumlusu olarak çalışmaktadır.

EKLER

Ek A: 1. Çekme Testi Sonuçları Numune Değerleri

Tablo A1.1: 1. Çekme testi çekme mukavemet değerleri.

Çekme Mukavemeti (MPa)						
Hadde Yönü	2,5 mm Paslanmaz Çelik					
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	5. Numune	6. Numune
Paralel	636,75008	635,27904	635,97408	643,6352	634,97184	635,11936
Dik	649,58624	651,38784	654,21504	659,22336	650,27264	649,9392
Hadde Yönü	2,5 mm DKP					
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	5. Numune	6. Numune
Paralel	326,27232	326,15168	329,976	327,48096	327,25376	328,70208
Dik	325,568	326,14368	326,68928	326,50208	326,50368	326,6784
Hadde Yönü	2,5 mm Galvaniz					
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	5. Numune	6. Numune
Paralel	363,51424	364,43872	364,95968	364,50336	365,45216	365,29312
Dik	364,40768	361,44352	364,87776	363,7136	365,15584	363,58304
Hadde Yönü	1,5 mm Galvaniz					
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	5. Numune	6. Numune
Paralel	400,07765	399,82224	399,95856	400,26016	400,06869	400,12341
Dik	397,44592	397,11504	396,76752	397,87152	397,18021	397,37733
Hadde Yönü	1 mm Galvaniz					
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	5. Numune	6. Numune
Paralel	389,78872	389,73336	389,23928	389,93024	389,0708	389,32608
Dik	388,87448	389,32904	388,76272	388,52512	388,79968	388,02464

Tablo A1.2: 1. Çekme testi akma mukavemet değerleri.

Akma Mukavemeti (MPa)						
Hadde Yönü	2,5 mm DKP					
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	5. Numune	6. Numune
Paralel	241,41491	241,12746	243,62528	251,33018	244,20406	244,1993
Dik	244,37341	241,13222	233,50211	234,82765	234,40458	235,39267
Hadde Yönü	2,5 mm Galvaniz					
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	5. Numune	6. Numune
Paralel	286,28426	284,6976	286,92368	285,75478	289,35152	287,00915
Dik	307,34061	310,29638	309,33712	301,36813	319,58026	308,83242
Hadde Yönü	1,5 mm Galvaniz					
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	5. Numune	6. Numune
Paralel	348,86405	341,04869	344,77936	350,46592	357,88693	346,85408
Dik	362,19797	359,42576	356,19211	386,18315	356,75467	361,91296
Hadde Yönü	1 mm Galvaniz					
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	5. Numune	6. Numune
Paralel	289,86096	301,57648	290,052	290,59776	293,06384	301,03672
Dik	299,06488	309,44304	300,7648	303,51096	300,4328	301,08216

Ek B: Bükme Açıları

Tablo B1.1: Hadde yönüne paralel kesilmiş Galvaniz levhaların büküm açıları.

	Büküm Açıları (°)					
	90			120		
Kalınlık (mm)	1	1,5	2,5	1	1,5	2,5
Ölçülen Büküm Açıları (°)	92,14	91,56	89,94	94,13	92,49	91,01
	92,13	91,55	90,44	94,14	92,44	91,08
	92,19	91,63	89,96	94,13	92,42	91,09
	92,08	91,64	89,89	94,02	92,49	91,08
	92,2	91,59	89,87	94,06	92,47	91,03
	92,2	91,61	90,44	94,02	92,46	91,07
	92,09	91,6	89,9	94,02	92,47	91,07
	92,2	91,58	90,46	94,09	92,44	91,09
Ortalama (°)	92,1538	91,595	90,1125	94,0763	92,46	91,065
Geri Yaylanma Miktarı (°)	2,15375	1,595	0,1125	4,07625	2,46	1,065

Tablo B1.2: Hadde yönüne dik kesilmiş Galvaniz levhaların büküm açıları.

	Büküm Açıları (°)					
	90			120		
Kalınlık (mm)	1	1,5	2,5	1	1,5	2,5
Ölçülen Büküm Açıları (°)	91,43	91,19	89,52	94,34	91,65	90,5
	91	91,1	90,05	94,35	91,45	90,44
	92,46	91,22	90,17	94,39	91,41	90,43
	92,25	91,11	88,5	94,4	91,42	90,55
	92,29	91,17	90,25	94,34	91,55	90,52
	92,49	91,11	88,81	94,37	91,43	90,4
	92,51	91,2	90,4	94,43	91,51	90,47
	92,24	91,14	88,96	94,34	91,44	90,53
Ortalama (°)	92,0838	91,155	89,5825	94,37	91,4825	90,48
Geri Yaylanma Miktarı (°)	2,08375	1,155	-0,4175	4,37	1,4825	0,48

Tablo B1.3: Hadde yönüne paralel kesilmiş DKP ve Paslanmaz levhaların büküm açıları.

Malzeme	Büküm Açıları (°)			
	90		120	
	DKP	Paslanmaz	DKP	Paslanmaz
Ölçülen Büküm Açıları (°)	90,23	95,28	92,44	94,4
	90,31	95,53	92,26	95,11
	90,11	95,25	92,3	94,49
	90,22	95,36	92,35	95,13
	90,26	95,31	92,39	94,55
	90,21	95,48	92,25	95,12
	90,16	95,3	92,31	94,5
	90,31	95,33	92,4	95,1
Ortalama (°)	90,2263	95,355	92,3375	94,8
Geri Yaylanma Miktarı (°)	0,22625	5,355	2,3375	4,8

Tablo B1.4: Hadde yönüne paralel kesilmiş DKP ve Paslanmaz levhaların büküm açıları.

Malzeme	Büküm Açıları (°)			
	90		120	
	DKP	Paslanmaz	DKP	Paslanmaz
Ölçülen Büküm Açıları (°)	90,22	96,5	91,55	94,34
	89,42	96,1	91,49	94,44
	90,28	96,4	91,52	94,37
	90,35	96,37	91,55	94,32
	90,16	96,45	91,52	94,42
	89,6	96,18	91,47	94,34
	90,28	96,32	91,54	94,38
	90,23	96,42	91,58	94,35
Ortalama (°)	90,0675	96,3425	91,5275	94,37
Geri Yaylanma Miktarı (°)	0,0675	6,3425	1,5275	4,37