

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**ÜZERİNDE OVAL DELİKLER BULUNAN SAC LEVHALARIN V
BÜKME İŞLEMİNDEKİ GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

HAZIRLAYAN

MÜGE ACAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2020

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**ÜZERİNDE OVAL DELİKLER BULUNAN SAC LEVHALARIN V
BÜKME İŞLEMİNDEKİ GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

HAZIRLAYAN

MÜGE ACAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. BEDRİ TUÇ

ANKARA - 2020

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

..... Anabilim Dalı Tezli
Yüksek Lisans / Doktora Programı çerçevesinde
tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans / Doktora Tezi
olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: ... / ... /

Tez Adı:
(Tez konusunun başlığı, kelimelerin baş harfleri büyük olacak şekilde "bold" yapılmadan yazılacaktır.)

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu) **İmza**
(Jüri üyelerinin Unvanı, Adı-Soyadı ve Kurumları "bold" yapılmadan yazılacaktır.)

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

ONAY

Prof.Dr. Faruk ELALDI
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: ... / ... / 20...

Öğrencinin Adı, Soyadı :

Öğrencinin Numarası :

Anabilim Dalı :

Programı :

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı :

Tez Başlığı :

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam sayfalık kısmına ilişkin, / / 20... tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %'dır.

Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

... / ... / 20...

Öğrenci Danışmanı Unvan, Adı, Soyadı,

TEŞEKKÜR

Çalıőmamda bana destek olan mesleki bilgilerini benden esirgemeyen tez danışmanı hocam Prof.Dr.Bedri TUÇ'a teőekkürlerimi sunarım. Deney kalıplarınnın tasarımı ve gerçekteőtirilmesini sağlayan ALTES ALÜMİNYUM ve MERSAN METAL'e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Beni her zaman ileri taőımak isteyen ve her konuda bana destek olan sevgili eőim Güngör Orçun ACAR'a sonsuz teşekkür ederim. Deneyleerin gerçekteőtirilmesi için bana destek olan ağabeyim Merter GÜLEN'e, manevi desteğini üzerimden hiç eksik etmeyen annem Fersun GÜLEN'e, beni yüksek lisans yapmam için destekleyen ve manevi desteğini esirgemeyen babam Serdar GÜLEN'e teşekkür ederim.

ÖZET

Müge ACAR

ÜZERİNDE OVAL DELİKLER BULUNAN SAC LEVHALARIN V-BÜKME İŞLEMİNDEKİ GERİ YAYLANMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2020

Bükülerek şekillendirilen sac metal ürünler başta uçak ve otomotiv sektörü olmak üzere beyaz eşya, savunma sanayi, hassas cihaz, medikal cihazlar, uzay ve havacılık ve benzeri sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sac malzemelerin bükme işlemi sonucu karşılaşılan en önemli problemlerden biri de geri yaylanmadır. Sac parçaların bükme sonrasında istenilen açı dışında farklı bir açığa sahip olması (geri yaylanma) endüstride zaman ve maddi kayba yol açmaktadır. Bu nedenle geri yaylanmayı minimize etmek için bazı yöntemler kullanılmaktadır. Geri yaylanmanın ortadan kaldırılabilmesi için bükme prosesi sonrasında meydana gelen geri yaylanmanın tahmin edilmesi gerekmektedir. Geri yaylanmanın doğru bir şekilde tahmin edilmesinin ardından geri yaylanmayı giderici yöntemler uygulanmaktadır. Bunlar fazladan bükme, ters bükme gibi yöntemlerdir.

Bu çalışmada ise farklı kalınlıklardaki delikli ve deliksiz saclarda deliklerin geri esnemeye olan etkileri incelenmiştir. Deney malzemesi olarak DKP sac kullanılmıştır. Parçalar lazer kesim ile 60mmx80mm boyutunda kesilmiştir. Parçaların boyutlarının küçük seçilmesinin nedeni ise geri yaylanma olayını daha net bir şekilde görebilmektir. Numunelerdeki delik oranları, deliğin boyunun numunenin boyuna oranı şeklinde belirlenmiştir. Bu bağlamda delik oranları %30, %40 ve %50 olarak belirlenip lazer kesim ile delinmiştir. Parçaların kalınlıkları ise 1mm, 1,5mm ve 2mm olarak belirlenmiştir. V bükme işlemi sırasında sıcaklık, zımba radyüsü, kuvvet gibi parametreler sabit olup kalınlık ve delik oranları değişken parametre olarak seçilmiştir. Bu çalışmada her bir numune için 5 adet deney yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar üzerinden delikli malzemelerin geri yaylanmasıyla deliksiz malzemelerin geri yaylanması kıyaslanmış ve malzemedeki açılan deliklerin geri yaylanmaya olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile Simufact programından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Geri yaylanma, DKP sac, delikli sac malzeme, V bükme, bükme açısı

ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS OF SPRING BACK BEHAVIOUR IN V-BENDING SHEET PLATES WITH OVAL HOLES

Müge ACAR

Başkent University Institute of Science

Department of Mechanical Engineering

Sheet metal materials which are shaped by bending are used in many areas such as aerospace, household appliances, defence, automotive, medical device industries. Sheet metals experience a few problems after bending. By far, the most important problem is bending. After bending, the sheet bends into a different angle than the desired angle which is called springback. In order to overcome springback, it must be correctly predicted before bending. Springback results with time and financial loss. So some processes are done in order to minimize springback like overbending or reverse bending. In this thesis, hole and thickness effect on springback is investigated. As testing material DKP sheet metal is used. Parts are cut by laser which are 60x80 cm in size. Parts are selected in a way that springback effect can be seen clearly. The holes in materials are cut according to the ratio of hole length divided by material length. In this manner hole ratios are selected as 30, 40 and 50% and holes are also cut by laser cutter. Material thicknesses are selected as 1, 1.5 and 2 mm. Parameters such as bending radius, temperature, punch radius are constant while thickness and hole ratios are chosen as parameters. In this dissertation, 5 experiments are conducted for each specimen. Results are interpreted with respect to the hole ratios and thicknesses. The results are compared with the results in the computer simulations which are done with Simufact.

KEY WORDS: Spring back, DKP sheet metal, sheet plates with circular holes, V bending, bending angle

Thesis Supervisor: Prof.Dr. Bedri TUÇ, Başkent University, Department of Mechanical Engineering.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
SEMBOLLER.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	2
3. OVAL DELİKLİ SAÇLARIN KULLANIM ALANLARI	6
4. BÜKME.....	7
4.1. Bükme İşleminin Matematiksel Modeli	8
4.1.1. Bükme işlemi için farklı malzeme modelleri.....	11
4.1.1.1. Tamamen plastik bükme.....	11
4.1.1.2. Tamamen elastik bükme	12
4.1.1.3. Elastik ve plastik bükme	14
4.1.1.4. Pekleşen (Deformasyonla Sertleşen) malzemede bükme modeli	15
4.2. Bükme Yöntemleri.....	16
4.2.1. V Bükme yöntemi:	16
4.2.2. U Bükme yöntemi:	17
4.2.3. Kenar bükme yöntemi:	19
4.2.4. Katlama ve kenet bükme:.....	20
4.2.5. Oluklama bükme (Ondülin Yapma) :	21
4.2.6. Kabartma bükme:	22
5. GERİ YAYLANMA DAVRANIŞI VE MATEMATİKSEL MODEL	23
5.1. Geri Yaylanmanın Matematiksel Modeli.....	24
5.2. Geri Yaylanma Davranışını Etkileyen Faktörler	25
5.2.1. Kalınlık	25
5.2.2. Bükme yarıçapı.....	25
5.2.3. Kalıp açıklığı	26
5.2.4. Sıcaklık.....	26
5.2.5. Şekillendirme hızı	27
5.2.6. Sürtünme.....	27
5.2.7. Baskı plakası kuvveti	27
5.2.8. Akma dayanımı.....	28
5.2.9. Elastiklik modülü.....	28

5.2.10.	Pekleşme üsteli.....	29
5.2.11.	Anizotropi.....	29
5.2.12.	Bauschinger etkisi	30
5.2.13.	Tane boyutu.....	30
5.2.14.	Ütüleme süresi (Zımbanın sac üzerinde bekleme süresi).....	30
5.2.15.	Pres hızı	31
5.3.	Geri Yaylanmanın Telafisi	31
5.4.	Geri Yaylanmadan Kaynaklanan Sorunlar	32
6.	DENEYSEL ÇALIŞMA.....	34
6.1.	V Deney Bükme Numuneleri.....	34
6.2.	Deney Tasarımı ve V Bükme Deneyleri	36
6.3.	Deneyin Yapılışı	37
6.4.	Ölçüm Çalışmaları.....	38
6.5.	Deney Verileri	38
6.6.	Sonlu Eleman Analizi.....	47
6.7.	DeneySEL Sonuçlar	55
7.	SONUÇLAR.....	62
	KAYNAKLAR.....	63

EKLER

- EK 1: %30 DELİK ORANINA SAHİP SAC PARÇANIN TEKNİK RESMİ**
- EK 2: %40 DELİK ORANINA SAHİP SAC PARÇANIN TEKNİK RESMİ**
- EK 3: %50 DELİK ORANINA SAHİP SAC PARÇANIN TEKNİK RESMİ**
- EK 4: V BÜKME İŞLEMİNDE KULLANILAN KALIBIN TEKNİK RESMİ**
- EK 5: V BÜKME İŞLEMİNDE KULLANILAN ZIMBANIN TEKNİK RESMİ**
- EK 6: KALINLIĞI 1MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 60 DERECE V BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AÇI DEĞERLERİ**
- EK 7: KALINLIĞI 1MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 90 DERECE V BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AÇI DEĞERLERİ**
- EK 8: KALINLIĞI 1MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 120 DERECE V BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AÇI DEĞERLERİ**
- EK 9: KALINLIĞI 1,5 MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 60 DERECE V BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AÇI DEĞERLERİ**
- EK 10: KALINLIĞI 1,5 MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 90 DERECE V BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AÇI DEĞERLERİ**
- EK 11: KALINLIĞI 1,5 MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 120 DERECE V BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AÇI DEĞERLERİ**
- EK 12: KALINLIĞI 2MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 60 DERECE V BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AÇI DEĞERLERİ**
- EK 13: KALINLIĞI 2MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 90 DERECE V BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AÇI DEĞERLERİ**
- EK 14: KALINLIĞI 2MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 120 DERECE V BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AÇI DEĞERLERİ**

TABLolar LİSTESİ

Sayfa

Tablo 6.1. DeneY parametreleri	34
Tablo 6.2. DKP sacın mekanik özellikleri	36
Tablo 6.3. DKP sacın kimyasal özellikleri.....	36
Tablo 6.4. Dijital Açık Ölçerin Teknik Özellikleri.....	38
Tablo 6.5. Kalınlığı 1mm olan 5 DKP sac numunesinin 60 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı	39
Tablo 6.6. Kalınlığı 1mm olan 5 DKP sac numunesinin 90 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı	39
Tablo 6.7. Kalınlığı 1mm olan 5 DKP sac numunesinin 120 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı	40
Tablo 6.8. Kalınlığı 1,5 mm olan 5 DKP sac numunesinin 60 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı	41
Tablo 6.9. Kalınlığı 1,5 mm olan 5 DKP sac numunesinin 90 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı	42
Tablo 6.10. Kalınlığı 1,5 mm olan 5 DKP sac numunesinin 120 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı	43
Tablo 6.11. Kalınlığı 2 mm olan 5 DKP sac numunesinin 60 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı	44
Tablo 6.12. Kalınlığı 2 mm olan 5 DKP sac numunesinin 90 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı	45
Tablo 6.13. Kalınlığı 2 mm olan 5 DKP sac numunesinin 120 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı	46
Tablo 6.14. Kalınlığı 1 mm olan DKP sacların 60 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması	52
Tablo 6.15. Kalınlığı 1 mm olan DKP sacların 90 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması	53
Tablo 6.16. Kalınlığı 1 mm olan DKP sacların 120 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması	53
Tablo 6.17. Kalınlığı 1,5 mm olan DKP sacların 60 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması	53
Tablo 6.18. Kalınlığı 1,5 mm olan DKP sacların 90 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması	54

Tablo 6.19. Kalınlığı 1,5 mm olan DKP sacların 120 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması	54
Tablo 6.20. Kalınlığı 2 mm olan DKP sacların 60 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması	54
Tablo 6.21. Kalınlığı 2 mm olan DKP sacların 90 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması	55
Tablo 6.22. Kalınlığı 2 mm olan DKP sacların 120 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması	55



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 4-1. Bükme işlemi sırasında oluşan parça geometrisi.....	7
Şekil 4-2. Parçanın bükme işleminden önceki ve sonraki şekli	8
Şekil 4-3. Birim şekil değiştirme dağılımının şekli	9
Şekil 4-4. Birim genişlikte bir eksen boyunca bükülmüş malzeme.....	10
Şekil 4-5. Birim genişlikte oluşan moment	11
Şekil 4-6. Tamamen plastik bükmedeki gerilim dağılımı	12
Şekil 4-7. Tamamen elastik bükmede oluşan moment-eğri grafiği.....	13
Şekil 4-8. Elastik ve Plastik Bükme Modelinde Moment – Eğrilik Grafiği	14
Şekil 4-9. Pekleşen malzemede bükme modeli için moment – eğrilik grafiği.....	15
Şekil 4-10. V bükme işlemi.....	16
Şekil 4-11. V bükme Sürecinin Aşamaları.....	17
Şekil 4-12. U bükme sürecinin aşamaları.....	18
Şekil 4-13. U - Bükme İşleminin Süreçleri	18
Şekil 4-14. Kenar Bükme yöntemi	19
Şekil 4-15. Kenar Bükme çeşitlerine örnekler	20
Şekil 4-16. Katlama ve Kenet Bükme çeşitlerine örnekler	21
Şekil 4-17. Oluklama Bükme	21
Şekil 4-18. Kabartma Bükme İşleminin Gösterimi	22
Şekil 5-1. Bükme işleminde geri yaylanmanın gösterimi	23
Şekil 6-1. 1 mm kalınlığındaki DKP saclar.....	35
Şekil 6-2. 1.5 mm kalınlığındaki DKP saclar.....	35
Şekil 6-3. 2mm kalınlığındaki DKP saclar.....	36
Şekil 6-4. Lazer kesim makinası.....	37
Şekil 6-5. Abkant Presin V Bükme Prosesi.....	37
Şekil 6-6. 1mm’lik numunelerin 60 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği ..	39
Şekil 6-7. 1mm’lik numunelerin 90 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği ..	40
Şekil 6-8. 1mm’lik numunelerin 120 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği	41
Şekil 6-9. 1,5mm’lik numunelerin 60 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği	42
.....	42
Şekil 6-10. 1,5mm’lik numunelerin 90 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği	43
.....	43

Şekil 6-11. 1,5mm'lik numunelerin 120 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği	44
Şekil 6-12. 2mm'lik numunelerin 60 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği	45
Şekil 6-13. 2mm'lik numunelerin 90 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği	46
Şekil 6.14. 2mm'lik numunelerin 120 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği	47
Şekil 6.15. 2mm kalınlığında %30 delik oranına sahip DKP sacın Space Claim 3D İle modellenmesi.....	47
Şekil 6.16. 3D analiz modülü	48
Şekil 6.17. Simufact programına parça aktarma.....	48
Şekil 6.18. Hidrolik Pres tipi seçimi	49
Şekil 6.19. Sürtünme modeli belirleme.....	49
Şekil 6.20. Sıcaklık belirleme.....	50
Şekil 6.21. Simufact programına parça konumlandırma.....	50
Şekil 6.22. Malzeme seçimi	51
Şekil 6.23. Mesh belirleme.....	51
Şekil 6.24. Zımba hareket yönünün belirlenmesi	52
Şekil 6.25. 60 dereceyle bükülen 1, 1,5 ve 2mm kalınlığındaki numunelerin geri esneme – delik oranı grafiği.....	55
Şekil 6.26. 90 dereceyle bükülen 1, 1,5 ve 2mm kalınlığındaki numunelerin geri esneme – delik oranı grafiği.....	56
Şekil 6.27. 120 dereceyle bükülen 1, 1,5 ve 2mm kalınlığındaki numunelerin geri esneme – delik oranı grafiği.....	56
Şekil 6.28. Delik oranı 0 olan numunelerin 60, 90 ve 120 derecelerdeki geri esneme – kalınlık grafiği	57
Şekil 6.29. Delik oranı %30 olan numunelerin 60, 90 ve 120 derecelerdeki geri esneme – kalınlık grafiği	57
Şekil 6.30. Delik oranı %40 olan numunelerin 60, 90 ve 120 derecelerdeki geri esneme – kalınlık grafiği	58
Şekil 6.31. Delik oranı %50 olan numunelerin 60, 90 ve 120 derecelerdeki geri esneme – kalınlık grafiği	58
Şekil 6.32. 1mm kalınlığında farklı delik oranlarına sahip numunelerin 60,90 ve 120 derece ile V bükülmesiyle oluşan geri esneme dereceleri	59

Şekil 6.33. 1,5 mm kalınlığında farklı delik oranlarına sahip numunelerin 60,90 ve 120 derece ile V bükülmesiyle oluşan geri esneme dereceleri.....59

Şekil 6.34. 2mm kalınlığında farklı delik oranlarına sahip numunelerin 60,90 ve 120 derece ile V bükülmesiyle oluşan geri esneme dereceleri60



SEMBOLLER

t	Sac kalınlığı
w	Sac genişliği
θ	Bükme açısı
R	Bükme yarıçapı
ρ	Tarafsız eksen yarıçapı
l	Şekillendirilmiş lif boyu
l_0	İlk boy
l_s	Son boy
ε	Birim şekil değişimi
ε_a	Parçanın merkezinde oluşan birim şekil değişirme miktarı
ε_b	Merkezden y uzaklığından geçen yayın birim şekil değişimi
ε_w	Genişlikte meydana gelen birim şekil değişimi
S	Düzlem birim şekil değişimi durumundaki akma dayanımı
σ	Gerilme
y	Tarafsız eksenden uzaklık
y_e	Tarafsız eksenden elastik sınıra kadar olan uzaklık
ν	Poisson oranı
E	Elastisite (Young) modülü
E'	Düzlem birim şekil değişim halindeki elastisite modülü
M_e	Elastik moment
M_p	Plastik moment
M	Moment
I	Eylemsizlik momenti
K	Mukavemet sabiti
T	Bükme işleminin sonucu oluşan radyal gerilim
n	Pekleşme üsteli

1. GİRİŞ

Bükülerek şekillendirilen sac metal ürünler başta uçak ve otomotiv sektörü olmak üzere beyaz eşya, savunma sanayi, hassas cihaz, medikal cihazlar, uzay ve havacılık ve benzer sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sac şekillendirme işlemi genel olarak şekillendirilecek sac levhanın, birbirini tamamlayan erkek kalıp ve dişi kalıp olarak adlandırılan, baskı yüzeylerinde istenen form bulunan ve çelik malzemeden imal edilmiş kalıp parçaları arasına yerleştirilerek presleme kuvveti uygulamak suretiyle yapılan şekillendirmedir. Şekillendirme prosesinde presleme kuvveti etkisiyle sac levhada deformasyonlar meydana gelir. Presleme kuvveti uygulanırken meydana gelen deformasyon sac levhaya istenen şekli verirken, presleme kuvveti kalktığı (sıfırlandığı) zaman oluşan deformasyon ise malzemenin bükülme açısını değiştirir. (Geri yaylanma) Sac malzemelerin bükme ile şekillendirilmesinde karşılaşılan en temel problem geri yaylanmadır. Belirli bir açısal değere kadar deforme edilen sac malzeme, üzerindeki yükün kaldırılması ile birlikte bir miktar toparlanmaya çalışmaktadır. Elastik olarak gerçekleşen bu toparlanma geri yaylanma olarak adlandırılmaktadır. Sacların kalıplar kullanılarak deformasyona uğrattılmak suretiyle şekillendirilmeleri prosesinde sac levhanın geri yaylanma davranışının önceden bilinmesi halinde proses süresinin kısaltılması ve maliyetinin düşürülmesi mümkündür. Sac levhaların şekillendirilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntem sac levhaların bükme kalıpları kullanılarak değişik açılarda bükülerek V şeklinin verilmesidir. Sac levhaların V-bükme prosesiyle şekillendirilmelerinde bükme, uzama ve ters bükme gibi işlemler birlikte gerçekleşmektedir. Sac levhaların V-bükme yoluyla şekillendirilmelerinde en önemli sorun bükülen sacın geri yaylanması yani bükme prosesi tamamlandığında bükme açısında bir artışın meydana gelmesidir. Bu konuda yapılan çalışmalara göre geri yaylanmayı etkileyen ana parametreler; sacın malzemesi, sac kalınlığı, bükme kalıbı ve bükme sürecidir. Tez çalışmasında; üzerinde oval delikler bulunan sac levhaların V-bükme yoluyla şekillendirilmelerinde sac malzemesinin kalınlığı, bükme açısı ve oval deliğin geri yaylanmaya etkilerinin deneysel olarak incelenmesidir. Yapılan bu çalışmanın amacı ise farklı kalınlıklarda, deliksiz ve farklı boyutlarda oval delik olan sac malzemelerin geri yaylanmaya etkilerinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Son yıllarda yapılan araştırmalarda, geri esnemenin sac metal endüstrisinde önemli bir kavram olduğu ve nasıl önlenebileceği incelenmektedir. Yapılan çalışmalarda geri esnemenin önceden tahmin edilmesi ve kalıp tasarımı yapılırken geri esneme değeri dikkate alınarak kalıp tasarlanması gerektiği ifade edilmiştir[1]. Daha önce yapılan çalışmalarda delikli sacların geri esnemesinin çok fazla incelenmediği göz önüne alınarak bu tez çalışmasında belirli oranlarda deliklere sahip olan DKP sacların geri esnemesi incelenmiştir.

Salih Emrah Turan'ın 2009 yılında yazdığı tezde beyaz eşyalarda (buzdolabı kapısının ve yan panellerinin şekillendirilmesi) yaşanan geri yaylanma olayı incelenmiştir. Araştırmada düz kenar bükme ve döner kalıpta bükme yöntemlerinden yararlanılmıştır. Her bir yöntem için karbon sacı ve paslanmaz elik malzemeler kullanılmıştır. Geri yaylanmanın; değişken bükme radyüsü, kalıp açıklığı, hadde yönü ve flanş yükseklerini nasıl etkilediği deneysel olarak gözlemlenmiştir. Yapılan bu deneyler sonucunda düz kenar bükme prosesinde bükme radyüsünün büyümesiyle geri yaylanmanın artış gösterdiği, döner kalıpta bükme ile geri yaylanma değerleri daha dar bir aralıkta yer almakta olduğu gözlemlenmiştir. Döner kalıpla yapılan bükme işleminde kalıp açıklığı arttıkça geri yaylanma miktarı da artmaktadır. Dolayısıyla nihai parça geometrilerine yaklaşmak ve bu geometri sapmalarını en düşük seviyede tutabilmek için döner kalıpta bükme yönteminin tercih edilmesinin daha doğru olacağı düşünülebilir [2].

Ali Işıktaş ve İrfan Ay, DKP saclardaki geri yaylanmayı analiz etmişlerdir. 60, 90 ve 120 derece olan V-bükme kalıp ağlarında farklı zımba yarıçapları kullanılarak her bir deney için 5'er adet numune kullanmışlardır. Yapılan deneyler neticesinde zımba yarıçapı büyüdükçe geri yaylanma değerinin arttığını ortaya koymuştur. Ayrıca yine aynı çalışmada malzeme kalınlığının ve bükme açısının artmasının geri yaylanmayı azalttığını gözlemlenmiştir [3].

Slota ve Juricisin, otomotiv sanayiinde yoğun olarak kullanılan AHSS ve UHSS çeliklerinin geri yaylanma özelliklerini nümerik ve deneysel olarak incelemiştir. Aynı kalınlıkta ancak farklı türlerde çelikler kullanılarak V-bükme ile şekillendirilen saclardaki geri yaylanmalar ölçülmüştür. 3 farklı haddeleme yönü olan numuneler kullanılarak araştırmada hadde yönünün geri yaylanma üzerindeki etkisi modellenerek deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Deney neticesinde AHSS ve UHSS çelikler için en gerçekçi modellemenin Hill 90-Hollomon malzeme modeli olduğu ortaya konmuştur [4].

Cheng Chen, zımba yarıçapı ve malzemenin tanecik yapısının geri yaylanmaya olan etkisini incelemiştir. Chen malzeme olarak saf demir kullanmış ve geri yaylanmayı mikro düzeyde ele almıştır. Zımba yarı çapı (R)'nin malzeme kalınlığına (t) oranı ile geri yaylanmanın olmayacağı bir optimum seviyeyi hesaplamak isteyen Chen R/T oranının artmasıyla geri yaylanmanın arttığını göstermiştir ve ayrıca belirli tanecik boyutları için geri yaylanmanın olmadığı R/t oranlarını hesaplamıştır [5].

Cumin ve arkadaşları yaptığı çalışmada zımba yarıçapı ve kalıp genişliğinin geri yaylanmaya olan etkisinin malzeme kalınlığına göre daha önemli bir faktör olduğu hipotezini savunmuşlardır. Deneyde HC260Y çeliği kullanılırken, malzeme kalınlığı, zımba yarıçapı ve kalıp genişliği süreç değişkenleri olarak seçilmiştir. Yapılan deneylerin ardından regresyon yöntemiyle %1 hata payıyla HC260Y malzemesi için geri yaylanmayı analitik olarak modelleme konusunda başarılı olmuşlardır [6].

Özgür Tekaslan, Nedim Gerger ve Ulvi Şeker ise geri yaylanmayı incelerken kalıp etkisini ön planda tutmuşlardır. 18 değişik kalıpta 3 farklı kalınlıktaki bakır malzeme için en az 10'ar numune üstünde deney gerçekleştiren araştırmacılar toplada 720 adet deney yapmışlardır. Sonuçları bilgisayar ortamında değerlendirerek zımbanın bükülen malzeme üzerinde bekletilmesinin geri yaylanmayı azalttığını ve bükme açısının artmasının geri yaylanma değerini arttırdığını ortaya koymuşlardır [7].

İbrahim Karaağaç ve Onuralp Uluer ise Erdemir'den temin edilen otomotiv ve beyaz eşyada sık kullanılan DC01 çelik sac üzerinde deneyler yaparak malzemenin geri yaylanma özelliklerini incelemişlerdir. Süreç parametreleri olarak ütüleme süresi, bükme açısı ve zımba ucu yarıçapını seçen araştırmacılar, ütüleme süresinin geri yaylanmayı azalttığını, diğer yandan ise zımba ucu yarıçapı ve bükme açısının artmasının geri yaylanmayı arttırdığını iddia etmişlerdir [8].

Stefan ve arkadaşları alüminyum malzemenin geri yaylanması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma esnasında bükme işlemini sonlu elemanlar metoduyla ANSYS ile modellemişler ve geri yaylanma ve gerilim analizi yapmışlardır. Farklı malzeme kalınlıklarında sabit bükme açısıyla yapılan çalışmalarda hangi bükme açılarında malzemenin kırılacağı konusunda analiz sonuçları ile deneysel çalışma karşılaştırılmıştır [9].

Gautam ve arkadaşları 2016'da yayınladıkları makalede soğuk haddelenmiş çelik kullanmışlardır. 2mm ve 4mm kalınlıklarındaki malzemeleri V bükme ile 60 derece bükmüşlerdir. Yapmış oldukları çalışmada bükme açısını ve zımba yarıçapını (2mm) sabit tutmuşlardır. Burada inceledikleri geri yaylanmanın kalınlık etkisi olmuştur. Simülasyon programı olarak Hyperform yazılımından yararlanmışlardır. Kalınlığın artmasının geri yaylanmayı azalttığı sonucuna varmışlardır. [10].

Mohamad Ali Farsi ve Behrooz Arezoo'nun yaptıkları çalışmada ise düşük karbonlu çelik kullanmışlardır. Bu malzemeye belirli oranlarda delik açmışlardır. Delikli ve deliksiz malzemelerin geri esnemeye etkisinin yanı sıra kuvvet ve zımba radiusunu da değiştirerek geri esneme olayını incelemişlerdir. Deney sonuçlarını grafiksel olarak analiz etmişlerdir [11].

Emin Uslu yazmış olduğu tezde DP800, DP600, DC01, DC04 ve DC05 malzemelerini 3 farklı kalınlıkta kullanmıştır. Bu malzemeleri 60,90,120 derece V bükme işlemine tabii tutmuştur. Autoform programı kullanarak sonuçları analiz etmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlarla sayısal sonuçları karşılaştırmıştır [12].

Yunus Aslan ve İbrahim Karaağaç V bükmede geri esneme davranışlarını dolaylı olarak incelemişlerdir. Yazarlar literatürde yer alan V bükme ile alakalı çalışmaları derleyerek bu çalışmalardan ortak bir sonuç çıkarmışlardır. Ütüleme süresinin (zımbanın sac üzerinde bekleme süresi) geri esnemeyi azalttığı, sürtünmenin geri esnemeye etkisinin az olmasına rağmen bazı malzemeler için geri esnemeyi azalttığı, bükme kuvvetinin artması ile geri esnemenin azaldığı sonuçlarına varmışlardır [13].

Venkatachalam ve arkadaşları ise aliminyum malzemelerin geri yaylanmaya delik etkisi, boyut ve modelin etkilerini araştırmışlardır. Deneyin sonucu olarak delik oranı arttıkça geri yaylanmanın da azaldığını tespit etmişlerdir. Bu parametreleri sonlu elemanlar yöntemi ile modellemişlerdir [14].

Noriega ve arkadaşları geri yaylanmanın tahmin edilebilmesi için birden fazla model ortaya koymuştur. Bu denklemlerin V bükme deneyleri gerçekleştirerek ve geri yaylanmalarını ölçerek performansını incelemişlerdir. Yapmış oldukları deney neticesinde Damian'ın modelinin düşük bükme açılarında daha iyi sonuç verdiği, Kalpakjian'ın modelinin ise büyük bükme açılarında gerçeğe daha yakın sonuç verdiği görülmüştür [15].

Yukarıda verilmiş olan literatür çalışmaları incelendiğinde genel olarak bükme radyüsü, zımba yarıçapı, haddeleme yönü, kalıp genişliği, kalıp etkisi gibi parametrelerin deneysel ya da sonlu elemanlar yöntemiyle geri esnemeye etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada ise üç farklı kalınlık, üç farklı bükme açısı ve üç farklı delik oranına sahip DKP sacların geri esneme etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafik ve tablolar halinde karşılaştırılmıştır.

3. OVAL DELİKLİ SACLARIN KULLANIM ALANLARI

Delikli sacların endüstride sıkça tercih edilmesinin en önemli nedenleri ekonomik ve dayanıklı olmasıdır. Ayrıca, ham malzemesinden kesilmesinin ardından kullanılacağı ürünlere genellikle kaynak ve benzeri işlemlerden geçmediği için kalitesi ve görüntüsü bozulmaz. Ekonomik olan bu malzemeler delikli olarak kullanıldığında hava ve ısı da geçirebildikleri için maliyetleri oldukça düşerek tasarruf edilmesini sağlar [16].

Delikli saclar günümüzde pek çok alanda kullanılmaktadır. Delikli saclar kullanıldığı yere estetik bir görüntü kattığı için iç ve dış mekanlarda rahatlıkla kullanılmaktadır. Ev ve alışveriş merkezleri gibi kapalı mekânlarda merdiven korkulukları, panjur, yürüyen merdivenler, klima ve havalandırma ızgaraları gibi geniş bir alanda bu saclar kullanılır [17]. Özellikle alışveriş merkezlerinde iç mekânları geniş ve ferah göstermeye yardımcı olur. Yalnızca tasarım amaçlı kullanılmayan delikli saclar, ilaç sanayinde, otomotiv sektöründe, elektrikli alet yapımında, panolarda da tercih edilir. Makine imalat (özellikle inşaat, tarım ve gıda makineleri), madencilik ve iklimlendirme soğutma sektörlerinde genişletilmiş sac ve delikli sac kullanımı yaygındır [18].

Delikli sacların en büyük avantajlarından biri de üzerinde herhangi bir kaynak ve ek yeri olmamasıdır. Yani tek parça bir malzemedir. Kullanım alanları da oldukça çeşitlidir. Şekilde görülebileceği üzere konveyörlerde, oturaklarda ve ısıtıcılarda dahi delikli sac kullanılmaktadır.



Resim 3-1



Resim 3-2



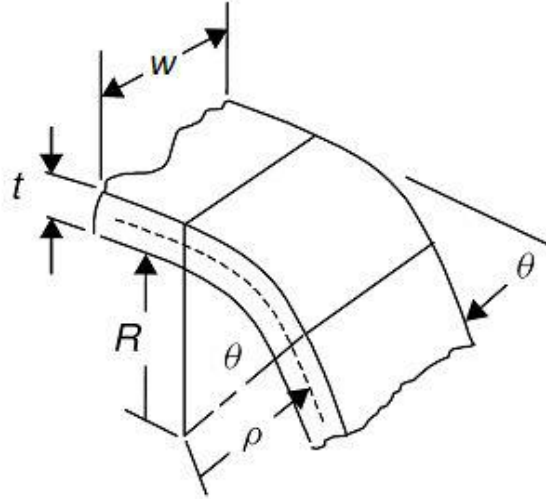
Resim 3-3

4. BÜKME

Bükme işlemi uzun süredir kullanılan bir metal şekillendirme yöntemidir. Bükme işlemi ile sadece sac metal değil şerit, boru, tel ve benzeri birçok formda malzeme şekillendirilebilmektedir. Bükme işlemleri metal malzemelerin süneklik özelliğinden dolayı genellikle oda sıcaklığında gerçekleştirilir. Ancak büyük malzemelerde ya da düşük yarıçaplarda gerçekleştirilecek bükme işlemleri yüksek sıcaklıkta gerçekleşmektedir. Bunun nedeni malzemenin pekleşmesinin önlenmesi ve kırılabilirliğinin azaltılmasıdır [19].

Endüstride kullanılacak olan ürünün sac metal ham malzemesi önce istenilen ölçüde kesilir. Ardından bu parçaya kullanılacağı doğrultuda şekillendirme ve mukavemetini arttırmak için yapılan işleme bükme işlemi denir. Bükme işlemi en çok delinen, boşaltılan veya kanal açılan parçalar üzerindeki bu kısımların şekil değiştirmelerini önlemek için uygulanır [20].

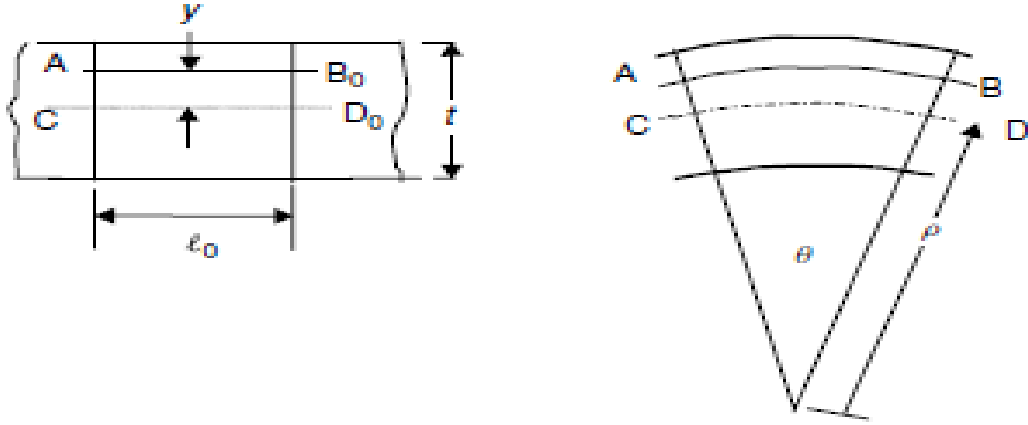
Bükme işlemi sırasında parçada meydana gelen bükme geometrisi şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekilde parça kalınlığı t , parça genişliği w , bükme açısı θ , bükme yarıçapı R ve tarafsız eksen yarıçapı ρ ile gösterilmiştir [21].



Şekil 4-1. Bükme işlemi sırasında oluşan parça geometrisi [21]

4.1.Bükme İşleminin Matematiksel Modeli

Bükme işlemini analiz edebilmek için malzemenin içerisindeki katmanlarda ya da liflerde meydana gelen deformasyonlar incelenmektedir. Şekil 4.2.'de görüleceği üzere bükme işleminden önce malzemenin bir kesitiyle, bükme işleminin ardından aldığı şekil yer almaktadır.



Şekil 4-2. Parçanın bükme işleminden önceki ve sonraki şekli [21]

Şekil 4.2 'de yer alan CD_0 yayı, bükülecek malzemenin ortasında yer alır ve tarafsız eksen olarak adlandırılır. Tarafsız eksen kesiti alınan bölgeyi basma ve çekme olmak üzere ikiye ayırmaktadır. Tarafsız eksen üzerinde çekme ya da basma kuvveti bulunmamaktadır. Bükme işleminin ardından CD_0 yayı CD haline gelmektedir. CD_0 yayının uzunluğu l_0 , θ bükülme açısı, ρ ise tarafsız eksen yarıçapı olarak tanımlanmıştır. CD yayının uzunluğu (l_s) ise aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$l_s = \rho * \theta \quad (4.1)$$

Tarafsız eksenden y uzaklığında yer alan AB yayının uzunluğu (l) ise aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$l = \theta * (y + \rho) = \rho * \theta * (1 + \frac{y}{\rho}) \quad (4.2)$$

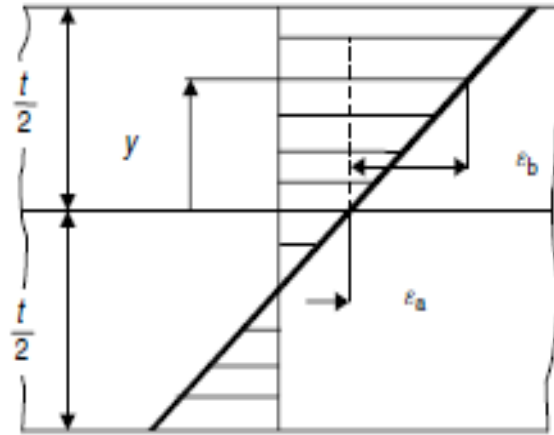
4.1’de yer alan ifadeler 4.2’deki denkleme yazılırsa

$$l = l_s * (1 + \frac{y}{\rho}) \quad (4.3)$$

eşitliği elde edilir. AB yayında oluşan şekil değişimi (ε_1) aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{l}{l_o} = \ln \frac{l_s}{l_o} + \ln(1 + \frac{y}{\rho}) = \varepsilon_a + \varepsilon_b \quad (4.4)$$

4.4’teki denklemden yer alan ifadelerden ε_a parçanın merkezinde oluşan birim şekil değiştirme miktarıdır. ε_b ise merkezden y uzaklığından geçen yayın birim şekil değiştirme miktarıdır. Birim şekil değiştirme dağılımı şekil 4-3’te gösterilmiştir.



Şekil 4-3. Birim şekil değiştirme dağılımının şekli [21]

Bükme yarıçapı (ρ) kalınlıkla kıyaslandığında çok daha büyük olduğu için birim uzama miktarı aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\varepsilon_b = \ln \left(1 + \frac{y}{\rho} \right) \approx \frac{y}{\rho} \quad (4.5)$$



Şekil 4-4. Birim genişlikte bir eksen boyunca bükülmüş malzeme [21]

Şekil 4-4'te M birim genişlikteki moment miktarını, T ise bükme kuvvetinin oluşturduğu gerilimi göstermektedir. Yukarıdaki şekilde olduğu gibi malzemenin kenarlarının deforme olmadığı durumda bükme yönüne paralel herhangi bir şekil değişimi gözlemlenmez. Bu durumda malzeme için von Mises denklemleri yazılırsa;

$$\varepsilon_1; \varepsilon_2 = 0; \varepsilon_3 = \varepsilon_1 \quad (4.6)$$

$$\sigma_1; \sigma_2 = \frac{\sigma_1}{2}; \sigma_3 = 0 \quad (4.7)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (4.8)$$

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{9} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]} \quad (4.9)$$

4.6 ve 4.7'deki denklemler 4.8 ve 4.9'da yerine yazıldığında ve malzemenin akma sınırına geldiği varsayıldığında von Mises akma kriterlerine göre malzemenin dayanımı şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$\sigma_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} * \sigma_f = S \text{ ve } \varepsilon_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} * \bar{\varepsilon} \quad (4.10)$$

4.10'daki denklemde S malzemenin düzlemsel akma gerinimini göstermektedir. Tresca akma kriterlerine göre $\sigma_2 = 0$ ve $\sigma_3 = 0$ olacağından $\sigma_1 = \sigma_s = S$ halini alacaktır [21].

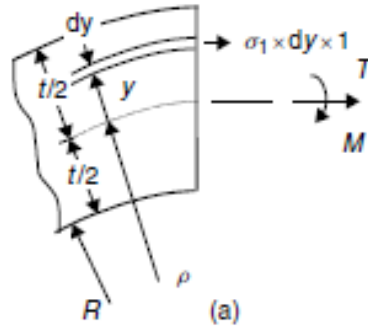
4.1.1. Bükme işlemi için farklı malzeme modelleri

Bükme işlemi sırasında malzeme elastik, plastik ve pekleşen davranış göstermektedir. Bu nedenle yapılacak matematiksel modelde bu üç faktörün göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Ancak çoğunlukla bu üç faktör kullanılmadan daha basitleştirilmiş metotlar kullanılmaktadır. Hangi metodun uygulanacağını seçerken malzemenin gerinim değeri en önemli kriterdir. Gerinimi etkileyen en önemli faktör ise “bükülme oranı” yani bükme yarıçapının kalınlığa oranıdır. ($\frac{\rho}{t}$) Bükme işlemi için seçilecek malzeme modeli bu orana göre belirlenmektedir [19].

4.1.1.1. Tamamen plastik bükme

Bir malzeme bükülürken bükme yarıçapı eğer elastik bükme yarıçapından en az beş kat büyükse malzemenin tamamen plastik büküldüğü varsayılabilir [21]. Bu bükme modelinde elastik bükülmenin olmadığı ve bu nedenle geri yaylanmanın da olmadığı varsayılır. Tamamen plastik bükme modelinde gerilim sabit olacağından malzemenin eğriliği değişse de bükme momenti sabit kalmaktadır.

Aşağıda yer alan şekilde M momenti, R malzemenin bükümünün ardından oluşan iç yarıçapı, t kalınlığı, y malzeme içinden geçtiği varsayılan yayın tarafsız eksen den uzaklığını, ρ bükülme yarıçapını ve T de bükme işlemi sonucu oluşan radyal gerilimi göstermektedir.



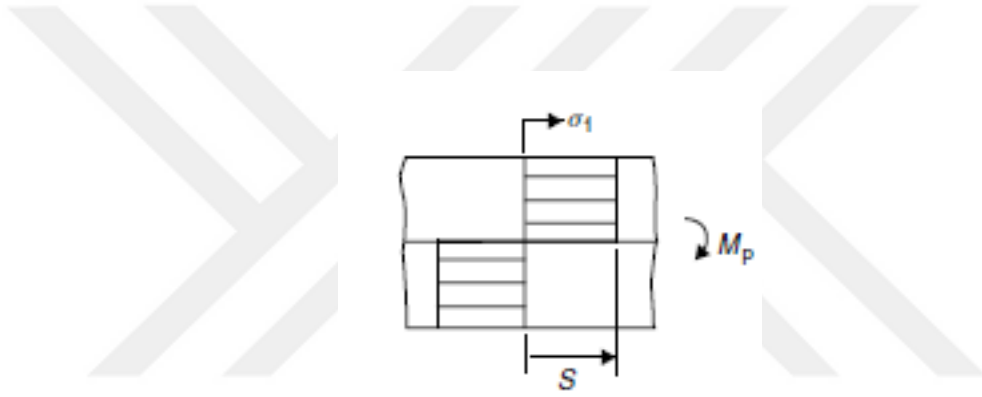
Şekil 4-5. Birim genişlikte oluşan moment [21]

Malzeme üzerindeki birim genişlikte oluşan moment aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$M = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_1 * dy * y \quad (4.11)$$

4.11'de sabit gerilim göz önüne alındığında tamamen plastik bükme için plastik moment aşağıdaki şekilde ortaya çıkmaktadır.

$$M_p = \frac{S * t^2}{4} \quad (4.12)$$



Şekil 4-6. Tamamen plastik bükmedeki gerilim dağılımı [21]

4.1.1.2. Tamamen elastik bükme

Herhangi bir malzemeye akma dayanımından az bir gerilim uygulanırsa malzeme deformasyona uğramaktadır. Ancak gerilim ortadan kalktığında ilk şeklini almaktadır. Bu şekilde meydana gelen şekil değişimlerine elastik şekil değişimi adı verilmektedir. Malzeme bükülürken eğer gerilim malzemenin akma değerini aşmıyorsa bükme işlemi için tamamen elastik model kullanılmaktadır.

Malzeme üzerindeki tarafsız eksenden y uzaklığındaki herhangi bir noktadaki gerilim şu şekilde ifade edilir.

$$\sigma_1 = E' \frac{y}{\rho} \quad (4.13)$$

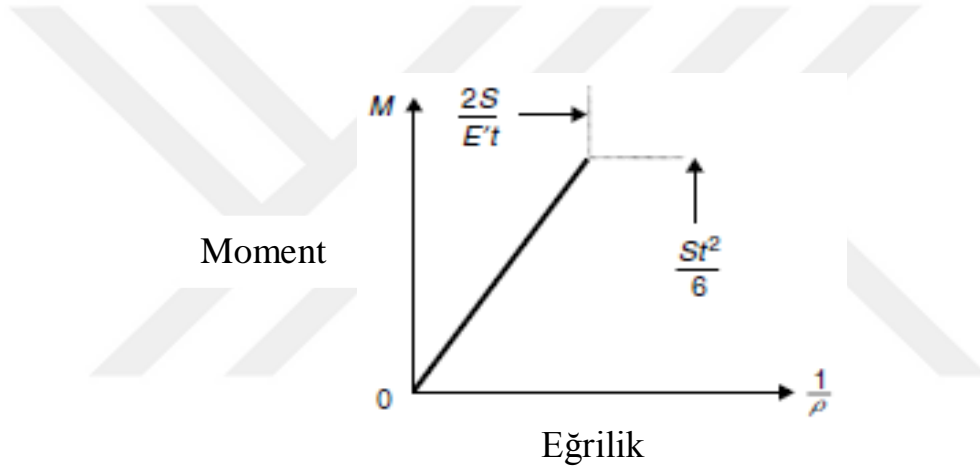
4.13, 4.11'de yer alan moment denklemi içerisinde yazılırsa

$$M = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} E' * \frac{y}{\rho} * y * dy = \frac{E' * t^3}{\rho * 12} \quad (4.14)$$

4.13 ve 4.14 birlikte yazıldığında tamamen elastik bükme için aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma_1}{y} = E' \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad (4.15)$$

4.15'te yer alan I, malzemenin birim genişlik için atalet momentidir.



Şekil 4-7. Tamamen elastik bükmede oluşan moment-eğri grafiği [21]

Malzeme tamamen elastik bükülürken en büyük akma gerilimi malzemenin en dışında yer alan katmanda ($y=t/2$) oluşur. Bu noktadaki sınır limit elastik moment ve sınır eğrilik aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$M_e = \frac{S * t^2}{6} \quad (4.16)$$

$$\left(\frac{1}{\rho} \right)_e = \frac{2 * S}{E' * t} \quad (4.17)$$

4.1.1.3. Elastik ve plastik bükme

Bükme işlemi sırasında, eğer bükme momenti 4.15'te yer alan sınır elastik momentinden büyükse ve eğrilik, sınır eğrilik değerinden büyükse Elastik ve Plastik malzeme modeli tercih edilmektedir. Bu modelde malzemenin önce elastik sonra da plastik deformasyona uğradığı varsayılır. Modelde düzlem gerilimi için denklem 4.9 kullanılır. Bu modelde malzemenin hem elastik hem plastik büküldüğü göz önüne alındığı için bükme prosesi esnasında bükülmenin elastikten plastiğe geçtiği bir değer vardır. Tarafsız eksenden bükme işleminin elastikten plastiğe geçtiği sınır değer y_e ile gösterilir. Bu değer eğriliğin (ρ) artmasıyla birlikte azalmaktadır.

$$(\varepsilon)_{y=y_e} = \frac{y}{\rho} = \frac{S}{E'} \quad (4.18)$$

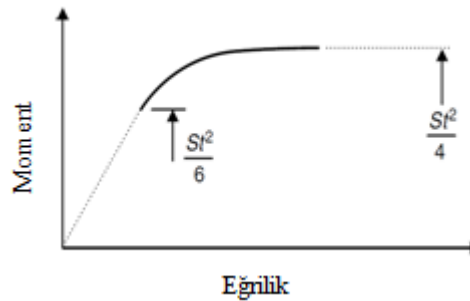
$$y_e = \frac{S}{E'} * \frac{1}{\left(\frac{1}{\rho}\right)} = m \frac{t}{2} \quad (4.19)$$

4.17 ve 4.19 birlikte yazılırsa m değeri için aşağıdaki denklem elde edilir.

$$m = \frac{\left(\frac{1}{\rho}\right)_e}{\left(\frac{1}{\rho}\right)} \quad 1 \leq m \leq 0 \quad (4.20)$$

Moment denklemi hem elastik hem plastik bükme için iki aşamalı olarak yazılmaktadır.

$$M = 2 * \left[\left(\int_0^{y_e} E' * \frac{y}{\rho} * y * dy \right) + \left(\int_{y_e}^t S * y * dy \right) \right] = \frac{S * t^2}{12} * (3 - m^2) \quad (4.21)$$



Şekil 4-8. Elastik ve Plastik Bükme Modelinde Moment – Eğrilik Grafiği [21]

4.1.1.4. Pekleşen (Deformasyonla Sertleşen) malzemede bükme modeli

Bükülen malzemede oluşan gerinimler çok büyük olduğunda malzemenin pekleşme özelliği bükme işlemini önemli bir şekilde etkilemektedir. Bu nedenle büyük gerinimli bükme işlemlerinde Pekleşen Malzemede Bükme Modeli kullanılmaktadır. Bu model malzemenin pekleşme özelliğini Hollomon Denklemi ile göstermektedir.

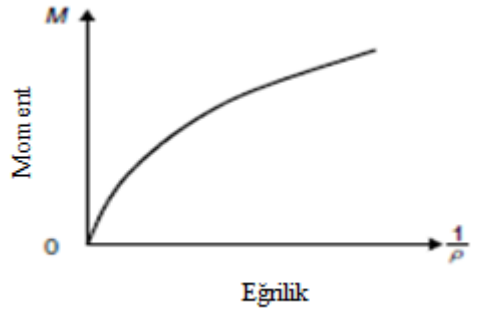
$$\sigma_1 = K' * \epsilon_1^n \approx K' * \left(\frac{y}{\rho}\right)^n \quad (4.22)$$

4.22 kullanılarak moment denklemi aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$M = 2K' * \left(\frac{1}{\rho}\right)^n \int_0^t y^{n+1} * dy = K' \left(\frac{1}{\rho}\right)^n \frac{t^{n+2}}{(n+2)*2^{n+1}} \quad (4.23)$$

$$\frac{M}{I_n} = \frac{\sigma_1}{y^n} = K' * \left(\frac{1}{\rho}\right)^n \quad (4.24)$$

$$I_n = \frac{t^{n+2}}{(n+2)*2^{n+1}} \quad (4.25)$$



Şekil 4-9. Pekleşen malzemede bükme modeli için moment – eğrilik grafiği [21]

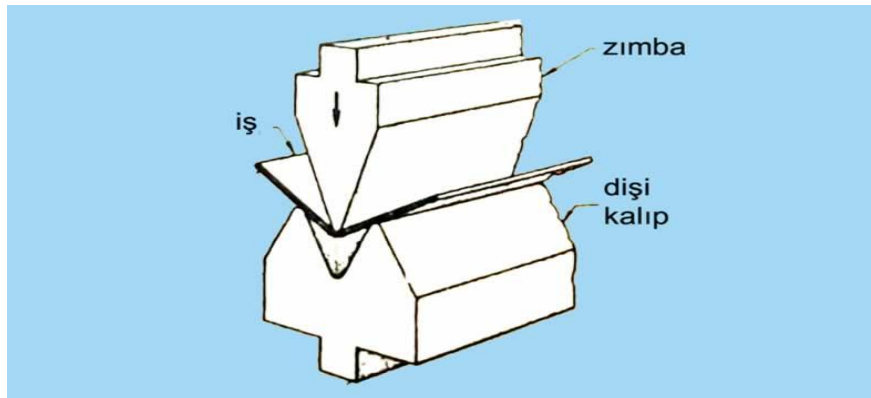
4.2.Bükme Yöntemleri

Sac metal şekillendirme yöntemlerinden biri olan bükme, endüstride pek çok alanda yaygın olarak kullanılır. Bükme işlemi sac malzemeyi talaş kaldırmadan önceden belirli bir eksen etrafında döndürülerek istenilen şekle getirme olarak tanımlanabilir. Bükme işlemi sadece sac malzemeler için değil boru ve tel gibi malzemelerde de bir şekillendirme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Bükme işlemi genel olarak kalıp maliyetinin ucuzluğu, birden fazla şekilde bükülerek şekillendirebilir olması nedeniyle tercih edilen bir işlemdir.

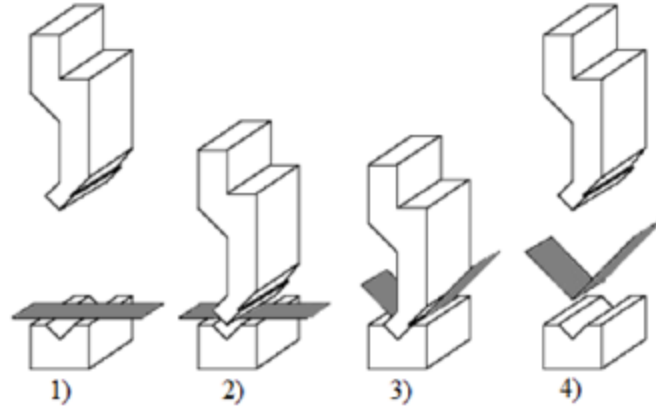
4.2.1. V Bükme yöntemi:

Sac bükme operasyonları içerisinde en yaygın kullanım alanına sahip bükme işlemlerinden biri V-kalıpta bükmedir. V – Bükme prosesinde bükme üst kalıbı (erkek kalıp) aşağı doğru inerken malzemenin desteksiz yüzeyiyle temas eder. Ardından zımba, aşağı hareketine devam eder ve malzeme ile temasını kaybetmeden belirlenen yere kadar aşağı iner. Parçanın bükme kolları zımbanın yüzeyine temas edene kadar işlem devam edebilir [22].

Malzemenin bükülmesi esnasında malzemenin akma gerilimi aşıldığı anda malzeme plastik olarak şekil değiştirmeye başlamaktadır [19]. Böylece malzeme, zımba yardımı ile kalıp içerisinde şekil değiştirmeye zorlanmaktadır. V – Bükme işleminin genel gösterimi Şekil 4-10'da, aşamaları ise Şekil 4-11'de gösterilmiştir.



Şekil 4-10. V bükme işlemi [20]



Şekil 4-11. V bükme Sürecinin Aşamaları [12]

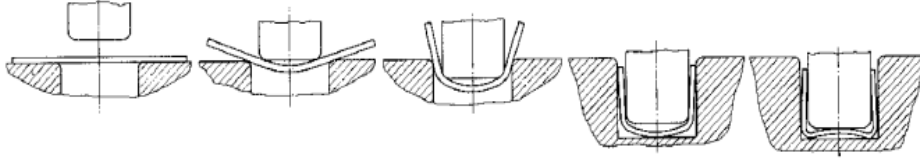
Şekil 4.11’de V bükme işleminin dört farklı aşaması yer almaktadır. İlk aşamada parça kalıba yerleştirilir. İkinci adımda erkek kalıp bükülecek parçaya temas ettirilir ve bükme işlemine başlanır. Üçüncü aşamada parçaya istenilen şekli vermek için zımba istenilen ölçüde aşağı yönlü olarak malzemeyi kalıbın içine bastırır ve malzeme bu aşamada deformasyona uğrar. Dördüncü ve son aşamada ise zımba malzemenin üzerinden kaldırılır. Geri yaylanma bu aşamada gerçekleşir.

Özellikle kalın ve dayanımı yüksek malzemelerin bükülmesinde, V-kalıpta ihtiyaç duyulan yüksek kuvvet değerleri, yöntemi kısıtlayıcı etkidedir. Bu bakımdan açık kalıpta bükmenin daha avantajlı olduğu söylenebilir. Açık kalıpta bükmenin V-kalıpta bükme işlemine göre bir diğer avantajı da, az sayıda parça ve kalıp kombinasyonları ile çok sayıda bükme açısı elde edilmesine imkân tanınmasıdır [2].

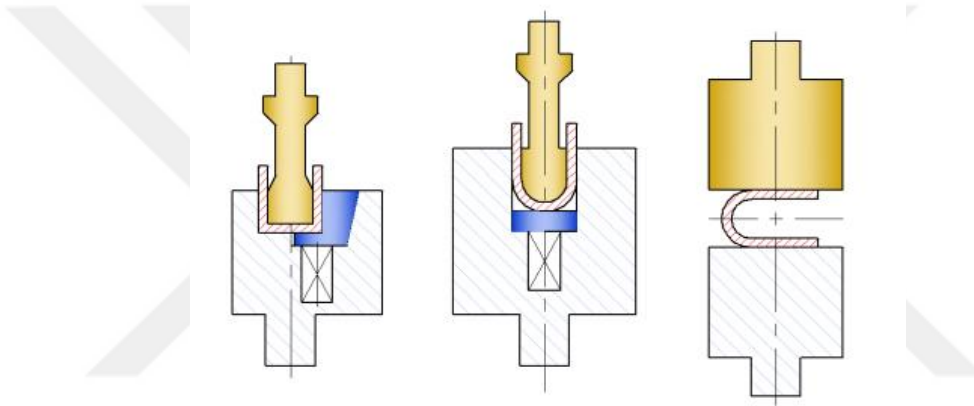
4.2.2. U Bükme yöntemi:

U – bükme yöntemi adından da anlaşılacağı üzere sac malzemeyi U şekline getirmek için kullanılır [23]. Bu yöntemde süreç sac metalin U şeklinde bir kalıp üzerine yerleştirilmesiyle başlar. Ardından zımba aşağı yönlü hareket ederek malzemeye temas eder. Ardından kalıbın dibine doğru hareket eden zımba malzemeye kalıbın şeklini verir. U kalıpta yapılan bükme işlemi, zımbanın uyguladığı kuvvetin, kalıp derinliğinin, kalıp açıklığının ve zımba yarıçapının bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir [19].

Aynı bükme açısında işlem yapıldığında, U – bükmedeki şekil değişim miktarı, V – bükmeye göre daha fazla olmaktadır [10]. U – Bükme ile alakalı süreçler Şekil 4-12 ve Şekil 4-13’de gösterilmektedir.



Şekil 4-12. U bükme sürecinin aşamaları [19]



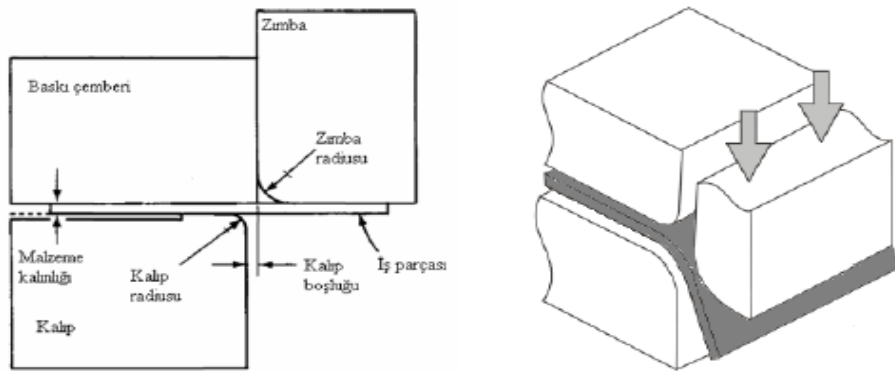
Şekil 4-13. U - Bükme İşleminin Süreçleri

Bükülen parçanın ve bükme kalıbının şekli U harfine benzediği için bu tipteki işlemler U bükme olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.12’de görüldüğü gibi U bükme işlemi üç safhadan oluşur. İlk safhada malzeme V bükmede olduğu gibi bükülecek malzemeye temas ettirilir ve kalıbın içine doğru bastırılır. Ardından ikinci adımda ise V bükmeden farklı olarak malzemenin serbest kenarları da kalıbın içine bastırılarak U şeklinin verilmesi sağlanır. Üçüncü ve son adımda ise erkek kalıp malzemeyi dişi kalıbın sonuna kadar bastırarak malzemenin istenilen şekli almasını sağlar. Şekil 4.13’te farklı kalıplarda gerçekleşen U bükme işlemleri belirtilmiştir. U bükmede malzemenin alması istenilen şekle göre erkek ve dişi kalıp seçimi yapılarak bükme işlemi yapılmaktadır.

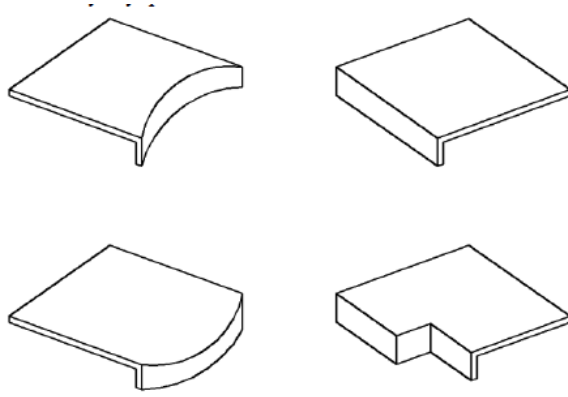
U-kalıpta bükme işlemi, uygulanan kuvvetin, bükme radyüsünün, kalıp açıklığının, kalıp derinliğinin ve kalıp radyüsünün fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Aynı bükme açısı değerinde, U-kalıpta bükmede karşılaşılan şekil değişim miktarı, V-kalıpta bükmede karşılaşılandan daha fazla olmaktadır [2].

4.2.3. Kenar bükme yöntemi:

Kenar bükme prosesinde diğer bükme yöntemlerinin aksine iki farklı yükleme vardır. Malzeme baskı plakası tarafından sabit pozisyonda tutulurken, zımba ise aşağı doğru hareket ederek malzemeye şeklini verir. Malzemenin baskı plakası tarafından sabit tutulması kenar bükmenin diğer süreçlerden en önemli farkıdır. Kenar bükme işlemleri genelde malzemenin kenarında yer alan dar bir bölgede gerçekleştirilmektedir ancak farklı türlerde kenar bükme süreçleri de mevcuttur. [12]. Şekil 4.14'te gösterilen kenar bükme sürecinde diğer bükme işlemlerinde olduğu gibi zımba malzemeye sabitlenir ve aşağı yönlü kuvvet uygulanır. Şeklin solunda kalan baskı plakası malzemeyi sabit tutmaktadır ve zımba, malzemenin boşta olan kısmına aşağı yönlü kuvvet uygulayarak malzemeyi deforme etmektedir. Şekil 4.14'te zımba radyüsü R_p , kalıp radyüsü R_d , zımba ve kalıp arasındaki boşluk c , sac kalınlığını ise t parametreleriyle ifade edilmektedir [24]. Kenar Bükme işleminin temsili bir gösterimi Şekil 4-15'te görülmektedir.



Şekil 4-14. Kenar Bükme yöntemi [12]



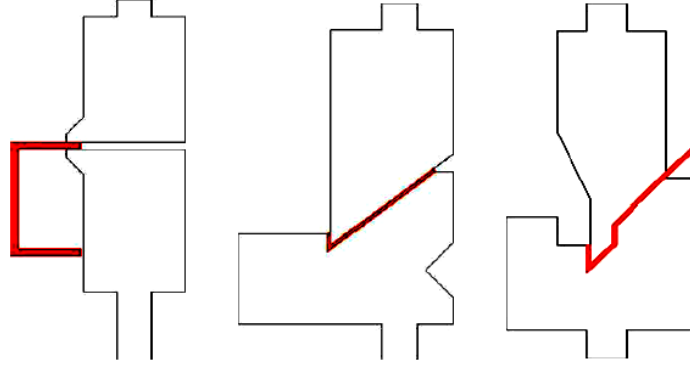
Şekil 4-15. Kenar Bükme çeşitlerine örnekler [20]

Kenar bükme işlemi;

- Kalıplanan parça veya sac malzemenin kenar mukavemetini artırmak,
- Kenar kısımlarda hafif kavis yapmak suretiyle parçanın dış görünüşünü güzelleştirmek,
- Nokta kaynağı veya benzeri birleştirmelerde meydana gelen kaba görümlü yüzeyin giderilmesi amacıyla yapılır [20].

4.2.4. Katlama ve kenet bükme:

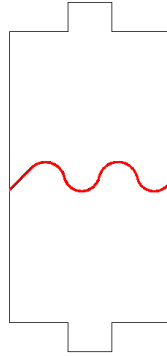
Katlama ve kenet bükme işlemleri genellikle giyim eşyası sanayisinde kullanılan sac malzemeden yapılacak makine parçalarına uygulanır. Katlama, sac malzeme ucundaki çapağı giderme ve parçaya dayanım kazandırma amacıyla yapılır. Katlama ve Kenar Bükme işleminin aşamaları Şekil 4-16'da görülmektedir. Katlama işleminde katlanacak uç 180° döndürülür ve birbiri üzerine bindirilir. Katlama işlemi daha çok malzemenin kenarlarına uygulanırken kenet bükme iki ucu birleştirilecek silindir, kazan ve benzeri parçalara uygulanır [20]. Tutma çenelerine sabitlenen parça boşta olan köşesinden yüklenerek istenilen şekli alması sağlanır. Şekil 4-16'da katlama ve kenet bükme işlemlerine örnek sac parçalar gösterilmiştir.



Şekil 4-16. Katlama ve Kenet Bükme çeşitlerine örnekler [20]

4.2.5. Oluklama bükme (Ondülin Yapma) :

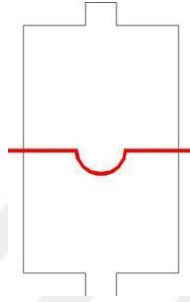
Düz sac levhaların dayanımını artırmak ve biçimlendirildikten sonra şekil değiştirmesini önlemek amacıyla yapılan kalıplama işlemine oluklama bükme denir. En çok duvar panoları, çatı levhaları, hangar, gölgelik ve benzeri yerlerde kullanılan alüminyum ve galvanizli sac levhalara uygulanan kalıplama işlemidir [20]. Oluklama bükme işlemi ile şekillendirilmiş saclara bazı örnekler Şekil 4-17’de görülmektedir.



Şekil 4-17. Oluklama Bükme [20]

4.2.6. Kabartma bükme:

Kenar, kıvrırma, katlama ve benzeri bükme işlemleri genellikle sac malzemelerin uç kısımlarına uygulanır. Kabartma bükme, sac malzemelerin kenar kısımlarından uzak olan yerlerde yapılan çökertme işlemidir [20]. Ayrıca kabartma bükme işlemi, simetrik biçimde kalıplanmayan parça çevresine uygulanır. Şekil 4-18’de kabartma bükme işleminin temsili bir gösterimi bulunmaktadır.

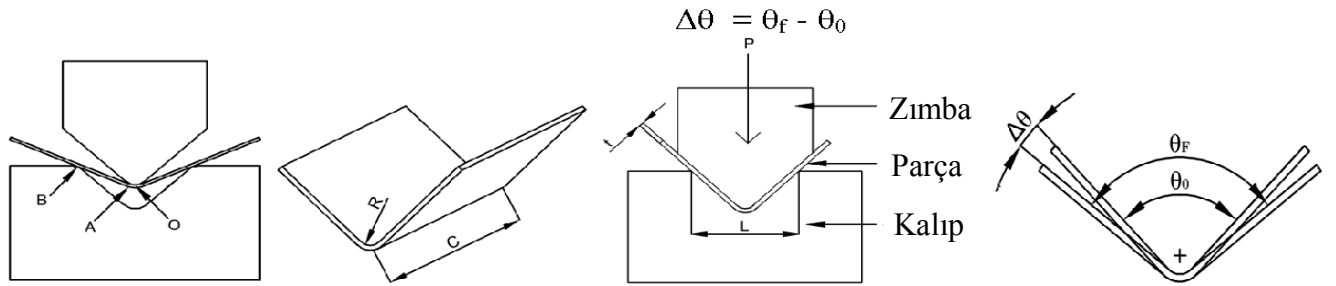


Şekil 4-18. Kabartma Bükme İşleminin Gösterimi [20]

5. GERİ YAYLANMA DAVRANIŞI VE MATEMATİKSEL MODEL

Bir malzeme akma dayanımının üzerinde olacak şekilde yüklendiğinde şekil değişimine uğramaktadır. Malzemeye uygulanan yük kaldırıldığında ise malzemenin elastik özelliklerinden dolayı malzeme ilk haline dönmeye çalışmakta ve uygulanan kuvvetin yarattığı şekil değişimine aksi yönde bir miktar hareket etmektedir. Bu olaya geri yaylanma adı verilmektedir.

Geri yaylanma şekil almış malzemenin nihai formunda bir değişim meydana getirdiğinden, parçanın imal süreçlerini etkileyebilmektedir. Bu nedenle malzeme şekillendirilirken geri yaylanma özellikleri de göz önünde bulundurularak uygun şekilde imal edilmelidir. Şekil 5-1'de sac malzemedeki bükme işlemi sonrasında meydana gelen geri yaylanma temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 5-1. Bükme işleminde geri yaylanmanın gösterimi

Geri yaylanma, malzemelerin mekanik özellikleri, proses parametreleri, boyutsal faktörler gibi birçok değişkenin çoklu etkileşiminin söz konusu olduğu bir şekillendirme problemidir. Yükleme ve boşaltma sırasında malzemede gerilme oluşumuyla ilgili olan değişkenler, şekillendirilmiş parçaların geri yaylanma davranışlarını etkilemektedir. Ayrıca, parça geometrisi ve malzeme türüne bağlı olduğundan, geri yaylanmanın telafi edilmesinde genel bir kuraldan söz edilememektedir [25].

Proses parametreleri, malzemelerin mekanik özellikleri, boyutsal özellikleri vs. etkileşerek gerilme dağılımında değişikliğe yol açtığından geri yaylanmayı etkilemektedir [26]. Bu değişiklikler, geri yaylanma miktarı tahminin ve telafisinin uygulanabilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Dolayısıyla, geri yaylanma davranışının incelenmesinin istendiği durumlarda, sağlıklı çözümlerinin yapılabilmesi için, bu değişkenlerin bağımsız etkilerinin yanı sıra, çoklu etkilerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Zira, çoklu etkileşim nedeniyle, parametreler ve geri yaylanma arasında lineer olmayan ilişkilerle karşılaşmak mümkün olmaktadır [27].

5.1. Geri Yaylanmanın Matematiksel Modeli

Geri yaylanma elastik deformasyon kaynaklı bir durum olduğundan geri yaylanmayı modellerken elastik-plastik bükme modeli kullanılmaktadır.

$$M_e = \frac{E' * t^3}{12} * \left(\frac{1}{\rho}\right) \quad (5.1)$$

$$M = \frac{S * t^2}{4} \quad (5.2)$$

5.1'de malzemenin elastik momenti, 5.2'de ise malzemenin plastik momenti yer almaktadır. Elastik moment malzemenin elastik olarak deforme olduğu moment olarak tanımlanır, plastik moment ise malzemenin tamamen plastik olarak deforme olmaya başladığı moment olarak tanımlanmaktadır. 4.1'de yer alan eşitliğin diferansiyel formu aşağıdaki şekildedir.

$$\frac{\Delta \theta}{\theta} = \frac{\Delta \left(\frac{1}{\rho}\right)}{\left(\frac{1}{\rho}\right)} \quad (5.3)$$

Malzemenin geri yaylanmasının ardından elastik ve plastik moment birbirine eşitlenmektedir.

$$\Delta \left(\frac{1}{\rho}\right) = \frac{3 * S}{E' * t} \quad (5.4)$$

5.3 ve 5.4'deki denklemlerin birleştirilmesiyle geri yaylanma açısı elde edilmektedir.

$$\Delta \theta = \frac{2*S}{E} * \frac{\rho}{t} * \theta \quad (5.5)$$

5.5'deki denklem incelendiğinde geri yaylanmanın bükme oranına ve büküm açısına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmektedir.

5.2.Geri Yaylanma Davranışını Etkileyen Faktörler

5.2.1. Kalınlık

Bükme işleminin en kritik parametrelerinden biri olan kalınlık geri yaylanmaya önemli derecede etki etmektedir. Kalınlık değişkeni genel olarak bükme radyüsü/kalınlık (R/t) oranı şekliyle kullanılmaktadır. R/t oranının azalması ile malzemede gerçekleşen geri yaylanma azalmaktadır. Diğer bir deyişle malzemenin kalınlığının artması geri yaylanmayı azaltmaktadır. Literatür incelendiğinde bu durumun tersinin de geçerli olduğu görülmektedir. Yani diğer tüm şartlar sabitken malzeme kalınlığının azalması geri yaylanmaya ters bir etki yaparak geri yaylanmayı arttırmaktadır [28].

5.2.2. Bükme yarıçapı

Bükme yarıçapı bükme işlemini ve geri yaylanmayı etkileyen çok önemli bir değişkendir. Bükme yarıçapı malzemenin bükülüp bükülemeyeceğini belirleyen bir değişken olmasının yanı sıra malzemenin bükme işlemi esnasında kırılıp kırılmayacağını da belirlemektedir. Bükme yarıçapının küçük olduğu durumlarda malzeme elastik deformasyona uğrayacağından bükme işlemi gerçekleşmemektedir. Dolayısıyla bükme işlemleri ancak büyük bükme yarıçaplarında gerçekleştirilmektedir. Yapılan araştırmalarda, malzeme elastik deformasyona uğradıktan sonra bükme yarıçapı arttıkça geri yaylanmanın da paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir.

Araştırmalarda gözlemlenen bir başka önemli sonuç ise bükme yarıçapının bükme kuvvetine olan etkisidir. Literatürde bükme yarıçapının artmasının uygulanması gereken bükme kuvvetini azalttığını gösteren çalışmalar bulunmaktadır [29].

5.2.3. Kalıp açıklığı

Bükme işleminde kullanılan malzeme ile zımbanın arasında zımba tam olarak malzemeyi bükükten sonra bir boşluk kalmaktadır. Bu boşluğa kalıp açıklığı adı verilmektedir. Kalıp açıklığının geri yaylanmaya olan etkisi ile alakalı literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar ışığında kalıp açıklığının sac malzemeye göre kalınlığının oranındaki değişimin, neredeyse doğrusal olarak geri yaylanmayı etkilediği ortaya çıkmıştır. Kalıp açıklığının artması geri yaylanmayı arttırırken azalması da geri yaylanması azaltmaktadır. Kalıp açıklığının azalması malzemedeki plastik deformasyonu arttırıcı etkiye sahiptir. Daha fazla plastik deformasyona uğrayan malzeme daha az geri yaylanmaktadır. Bu nedenle geri yaylanmanın telafisi için kalıp açıklığı önemli bir değişken olarak karşımıza çıkmaktadır [30].

5.2.4. Sıcaklık

Malzemenin şekillendirilmesi sürecinde sıcaklık önemli bir değişken olarak ön plana çıkmaktadır. Özellikle metal şekillendirme esnasında işlem yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilir. Sıcaklığın artması malzemenin mukavemetini azaltacağı için daha kolay şekillendirilebilirler. Bu nedenle metal şekillendirme süreçlerinin yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilmesi sıkça karşılaşılan bir durumdur. Sıcaklığın geri esnemeye etkisi ise birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu araştırmalarda yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen bükme işlemlerinde oda sıcaklığında gerçekleştirilen bükme işlemlerine göre geri yaylanmanın etkisinin daha az olduğu gözlemlenmiştir. Oda sıcaklığında ve 300 derecede gerçekleştirilen deneylerde geri yaylanmanın yüksek sıcaklıklarda %70'e yakın oranda azaldığı gözlemlenmiştir [31].

Diğer yandan malzeme oda sıcaklığında iken yalnızca zımbanın ya da kalıbın ısıtılmasının da geri yaylanmayı azalttığı gözlemlenmiştir. Bu şekilde gerçekleştirilen deneylerde geri yaylanma en az %20 oranında azalmıştır [32].

5.2.5. Şekillendirme hızı

Geri yaylanmayı etkileyen faktörler incelenirken kullanılacak malzemenin şekillendirilme hızı da bir parametre olarak kabul edilmiştir. Malzemeyi farklı hızlarda şekillendirerek yapılan çalışmalarda şekillendirme hızının geri yaylanma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ancak çalışmalar göstermiştir ki malzemenin şekillendirme hızının geri yaylanma üzerinde anlamlı bir etkisi yoktur. Ancak aynı araştırmalar göstermiştir ki malzeme şekillendirilme hızından ziyade şekillendirilme sıcaklığı, geri esneme konusunda önemli bir rol oynamaktadır [33].

5.2.6. Sürtünme

Bükme esnasında oluşan sürtünme kuvvetleri geri yaylanmayı etkileyen bir değişken olarak ortaya çıkmaktadır. Zimba malzemeye temas edip kuvvetin uygulamaya başlamasıyla birlikte zimbayla malzeme arasında bir sürtünme oluşur. Ayrıca malzeme kalıbın içine doğru akarken malzeme ile kalıp arasında da bir sürtünme kuvveti oluşur. Ancak yapılan araştırmalarda sürtünme kuvvetinin geri yaylanma üzerine yaptığı etkisi ile alakalı çelişkili sonuçlar ortaya çıkmıştır. Sürtünme katsayısının artmasının geri yaylanmayı arttırdığı deneyler mevcutken diğer yandan da artan sürtünme kat sayısının geri yaylanmayı azaltıcı etki gösterdiği deneyler mevcuttur [34].

5.2.7. Baskı plakası kuvveti

Sac malzemeler şekillendirilirken yaşanan geri yaylanmanın en önemli değişkenlerinden biri de baskı plakası kuvvetidir. Kenar bükme ve kenet bükme işlemlerinde malzemeyi sabit tutan bir baskı plakası mevcuttur ve baskı plakasının malzemeye uyguladığı kuvvet geri yaylanmayı etkilemektedir.

Literatürde baskı plakası kuvvetinin geri yaylanmaya olan etkisi ile alakalı birçok çalışma bulunmaktadır. Baskı plakasının kuvvetinin artmasının geri yaylanmayı azaltıcı bir özelliğe sahip olduğu görülmüştür.

Yine aynı şekilde baskı plakası kuvvetinin azalması da geri yaylanmayı azaltmaktadır. Bunun temel nedeni baskı plakası kuvvetinin artması malzemede daha büyük gerilmelere neden olmaktadır.

Aynı nedenden plastik deformasyonun arttığı da gözlemlenmiştir. Plastik deformasyon arttıkça malzeme daha az geri yaylanmaktadır [35].

5.2.8. Akma dayanımı

Malzemenin elastik deformasyonunun bitip plastik olarak deforme olmaya başladığı nokta akma dayanımı olarak adlandırılır. Malzemenin akma dayanımının altında bir gerilmeye maruz kaldığında eski şekline geri dönmektedir. Ancak akma dayanımından daha fazla bir gerilmeye maruz kaldığında ise malzeme eski şekline dönememekte ve kalıcı bir deformasyona uğramaktadır. Buradan yola çıkarak malzemenin akma dayanımının geri yaylanma üzerinde önemli bir etkisi olduğu söylenebilir. Konu ile alakalı yapılan araştırmalar göstermiştir ki malzemenin akma dayanımı arttıkça geri yaylanma miktarı da artmaktadır. Bükme süreçlerinde malzeme seçimi yaparken kullanılması planlanan malzemenin akma dayanımı büyük önem taşımaktadır [36].

5.2.9. Elastiklik modülü

Elastiklik Modülü malzeme şekillendirilmesi esnasında dikkate alınması gereken önemli parametrelerden biridir. Malzeme şekillendirme esnasında elastiklik modülü çoğunlukla sabit olarak hesaplamalara dâhil edilse de elastiklik modülünün deformasyon arttıkça azaldığı bilinmektedir. Bu nedenle geri yaylanmanın isabetli bir şekilde tahmin edilebilmesi için değişken elastiklik modülünün de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu konuda literatürde yapılan araştırmalar neticesinde araştırmacılar değişken bir elastiklik modülünü göz önünde bulundurarak simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Yapılan bu simülasyonlarda değişken elastik modülü ile elde edilen sonuçların sabit elastik modülüyle elde edilen sonuçlara göre gerçeğe daha yakın olduğunu belirlemişlerdir. Değişken elastik modülü ile yapılan simülasyonlarla elde edilen sonuçlar gerçek değerlere %10 daha fazla yakınsamıştır [37].

5.2.10. Pekleşme üsteli

Malzeme plastik deformasyona uğradığı esnada tanecik yapılar hareket ederler. Bu esnada plastik deformasyon sonucunda yeni tanecik yapılar oluşur. Malzeme deformasyona uğramaya devam ederken bu tanecik yapılar, hareket ettikleri ve yeni tanecik yapıları oluştuğu için malzeme içinde daha zor hareket ederler. Bu nedenle malzemenin aynı ölçüde plastik deformasyona uğraması için daha yüksek gerilmeler gerekir. Bu duruma deformasyon sertleşmesi ya da pekleşme adı verilir. Pekleşme malzemenin özgün özelliklerinden biridir. Genelde Hollomon denklemi aracılığıyla ifade edilmektedir.

$$\sigma = K * \epsilon^n \quad (5.6)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan “n” ifadesi pekleşme üstelidir. Pekleşme üsteli her malzeme için farklı bir değer almaktadır. Pekleşme üsteli değeri arttıkça, geri yaylanmanın da arttığı gözlemlenmiştir [38].

5.2.11. Anizotropi

Malzemelerin mekanik özellikleri çoğu zaman homojen bir özellik göstermemektedir. Hadde yönü, malzeme içi süreksizlikler gibi birçok değişken malzemenin mekanik özelliğini etkileyebilmektedir. Örneğin bir sac malzeme hadde yönüne dik ya da paralel işlemlerde farklı mekanik özellik gösterirler. Bu duruma anizotropi denmektedir. Anizotropi malzeme özelliklerini etkilediği gibi geri yaylanma konusunda da etkisi olan bir malzeme özelliğidir. Yapılan çalışmalarda gösterildiği üzere malzemenin anizotropisi arttıkça geri yaylanma da artmaktadır. Çünkü malzemenin deformasyon direnci, anizotropinin artmasıyla artmaktadır. Diğer yandan anizotropiyi oluşturan temel nedenlerden olan haddeleme yönü de geri yaylanmayı etkilemektedir [39]. Bükme prosesi esnasında malzeme hadde yönüne dik olarak işlem görmelidir. Hadde yönüne dik yapılan bükme işlemlerinde malzemenin geri yaylanmasının hadde yönüne paralel yapılan bükme işlemlerine göre daha az olduğu gözlemlenmiştir [40].

5.2.12. Bauschinger etkisi

Metal malzemelere belirli bir yönde kuvvet uygulandıktan sonra malzeme içerisindeki dislokasyonlar artmaktadır. Bu dislokasyonların artması ve birbirinin üzerine yığılması nedeniyle malzeme sertleşmektedir. Bu andan itibaren malzemeyi en baştaki gibi deforme edebilmek için daha fazla kuvvet uygulamak gerekmektedir. Ancak malzemeye belirli bir yönde kuvvet uygulandıktan sonra bu kuvvete ters yönde bir kuvvet uygulanırsa bu dislokasyonlar daha kolay hareket ederler. Başka bir deyişle malzeme ilk kuvvetten daha düşük bir kuvvetle ters yönde deforme edilebilir. Malzemenin akma ya da çekme değerleri bu sebeplerden ötürü değişiklik gösterebilmektedir. Bu etkiye Bauschinger Etkisi denmektedir. Bauschinger Etkisi malzemenin mekanik özelliklerini değiştirebildiği için geri yaylanmayı da etkilemektedir. Dolayısıyla geri yaylanma ile ilgili analiz ya da hesaplamalarda Bauschinger Etkisini de göz önünde bulundurmak gerekmektedir [41].

5.2.13. Tane boyutu

Bükmeyi etkileyen faktörlerden biri de tanecik boyutlarıdır. Aynı malzemenin farklı tanecik boyutlarına sahip numunelerinde bile geri yaylanma değerleri birbirinden farklılık göstermektedir. Pirinç sac malzeme üzerinde yapılan deneylerde geri yaylanmanın tane boyutunun artmasıyla azaldığı gözlenmiştir. Diğer yandan demir malzeme üzerinde yapılan deneylerde ise durumun tam tersi olduğu sonucuna varılmıştır. Demirin tanecik boyutu arttıkça akma dayanımı düşmektedir. Bu nedenle de geri yaylanma azalmaktadır. Diğer yandan küçük tanecikli yapılı olan demirde ise akma dayanımı yüksek olduğundan geri yaylanma azalmaktadır [42].

5.2.14. Ütüleme süresi (Zımbanın sac üzerinde bekleme süresi)

Bükme işlemi sırasında zımba malzemeyi aşağı yöne doğru deforme etmektedir. İstenilen derinliğe ulaşıldıktan sonra zımbanın parça üzerinde kaldığı süreye ütüleme süresi denmektedir. Ütüleme süresi de bükme işleminin ardından meydana gelen geri yaylanmayı etkileyen bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır.

Yapılan araştırmalar göstermektedir ki uzun ütüleme süresi geri yaylanmayı azaltmaktadır. Ütüleme süresinin artması malzemedeki sürtünme deformasyonunu arttırmakta ve böylece parçadaki iç gerilimler azalmaktadır. İç gerilimlerin azalması ise malzemenin elastik geri kazanımını azaltmaktadır. Böylece geri yaylanma azalmaktadır [8]. Ancak ütüleme süresinin artmasının getirdiği bazı sorunlar bulunmaktadır. Ütüleme süresinin artması malzemenin büküm süresinin artmasına böylece de parçanın üretim maliyetinin artmasına sebep olmaktadır.

5.2.15. Pres hızı

Bükme işlemleri esnasında zımba malzemeye temas ettikten sonra belirli bir hızda aşağı iner ve istenilen noktaya geldiğinde durur. Bu proses sırasında zımba hızının geri yaylanmaya etkisinin olup olmadığı birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu araştırmalar göstermektedir ki zımba hızının oda sıcaklığında geri yaylanmaya belirgin bir etkisi bulunmamaktadır. Malzemenin akma hızının mekanik özelliklerine etkisi metaller için oldukça düşüktür. Bu nedenle zımba hızının geri yaylanmaya etkisi de düşüktür. Diğer yandan yüksek sıcaklıkta yapılan bükme işlemlerinde zımba hızının oda sıcaklığına göre daha fazla etki gösterdiği ortaya çıkmakla birlikte, bu işlemin geri yaylanmaya etkisinin %1 civarında olduğu gözükmektedir [33].

5.3.Geri Yaylanmanın Telafisi

Sac malzemeler şekillendirildikten sonra istenilen ölçülerde olması için geri yaylanmanın telafi edilmesi gerekmektedir. Bükmeyle şekillendirilen malzemedeki oluşan geri yaylanmanın miktarından bağımsız olarak bükme esnasında çeşitli işlemlerle geri yaylanma azaltılabilmekte ancak sıfırlanamamaktadır. Bu nedenle malzemenin belirlenen toleranslar içinde kalmasına dikkat edilmektedir. Geri yaylanmayı etkileyen çok fazla sayıda parametre bulunmaktadır. Başlık 5.2’de yer alan tüm değişkenler üzerinde yapılacak değişiklikler ile geri yaylanma azaltılabilmektedir. Bu faktörlerin optimum olduğu seviyede ise geri yaylanmanın telafisi için ek yöntemler bulunmaktadır. Geri yaylanmanın azaltılması için en sık kullanılan yöntem aşırı bükmedir. Malzeme işleme alınmadan önce oluşacak geri yaylanma miktarı çeşitli modellemelerle tahmin edilmektedir.

Aşırı bükme metodu bu tahminlere göre malzemeyi istenenden daha fazla bükerek oluşacak geri yaylanmayı azaltmayı amaçlamaktadır. Bu nedenle bükme işlemi buna göre ayarlanarak malzeme istenen ölçüden daha fazla bükülür ve parça geri yaylanmasının ardından istenilen ölçüye yaklaşarak istenen geometri ortaya çıkmaktadır [24].

V-kalıpta bükme işleminde, geri yaylanmanın giderilmesi amacıyla uygulanabilecek bir diğer yöntem de, bükme bölgesinin ezilerek deforme edilmesidir. [43]. Bu yöntemde, zımba geometrisinde yapılacak değişiklikle zımba, parçaya temas eden bölgeyi ezerek plastik deformasyonu arttırmaktadır. Büküm bölgesinde daha fazla deformasyona uğrayan parça daha az geri yaylanma eğilimi göstermektedir.

Geri yaylanmayı azaltmanın yollandıran biri de çift bükme olarak adlandırılan procestir. Çift bükme tekniği U bükmede kullanılmaktadır. Bu işlemde U şeklindeki kalıbın içerisinde aşağı yönlü hareket edebilen ve ilk anda malzemeye temas eden ikinci bir zımba daha bulunur. Üstteki zımba parçayı aşağı yönlü hareket ettirdiğinde alttaki zımba parçayla temasını kaybetmeden aşağı yönlü hareket eder. Bu şekilde ek bir sürtünme oluşmakta ayrıca parçanın ütüleme süresi artmaktadır. Bu nedenlerle bükme prosesinin sonunda geri yaylanma miktarı azalmaktadır [44] .

Gererek bükme işlemi de en sık kullanılan geri yaylanmayı giderme metotlarından bir diğeridir. Bu yöntemde, tıpkı kenar bükme işleminde olduğu gibi baskı plakaları aracılığıyla malzeme bükülmeden önce akma sınırına kadar yüklenir. Ardından zımba aşağı yönlü hareket uyguladığında baskı plakaları yanal yönlerde hareket eder. Böylece sürekli olarak gerilime maruz kalan parçanın geri yaylanma miktarı azaltılmaktadır [45].

5.4.Geri Yaylanmadan Kaynaklanan Sorunlar

- 1) Parçanın üretilmesi için gereken kalıbın tasarlanması esnasında da geri yaylanma önemli bir rol oynamaktadır. Bükme kalıbı tasarımcısı deneysel metotları kullanarak bir kalıp tasarlayabilir. Ancak bu durum hem üretimi yavaşlatacaktır hem de maddi kayba yol açmaktadır. Geri esnemenin isabetli tahmini kalıp maliyetlerini de düşürebilecektir.

- 2) Ölçüleri değiştireceği için malzemelerde ciddi bir montaj sorunu yaratır.
- 3) Üretilen parçalarda geri yayanmanın telafisi ya da tahmininde çıkacak sorunlar hurda miktarını artırır.
- 4) Hurda miktarının artması boşa giden bir maliyet olurken üretimin verimliliğini de azaltmaktadır.

Geri yayanmanın tahmin edilmesi ve giderilmesi maliyeti arttırmaktadır. Bu nedenle geri yayanmanın telafisi için etkin bir çözüm ortaya koyularak ürünün kalitesini arttırırken maliyetini düşürmek gerekmektedir [20]



6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmaların genel amacı, V bükme işlemi esnasında farklı parametrelerin sac malzemelerin geri yaylanma davranışı üzerine etkisinin incelenmesidir. Bu çalışmadaki parametreler ise kalınlık, bükme açısı ve levha üzerindeki farklı ölçüdeki deliklerdir. Deney parametreleri ve değişkenler aşağıdaki tabloda detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 6.1. Deney parametreleri

DENEY PARAMETRELERİ				
Malzeme	DKP SAC			
Delik oranı	%0	%30	%40	%50
Bükme açısı	60	90	120	
Kalınlık	1mm	1,5mm	2mm	

6.1.V Deney Bükme Numuneleri

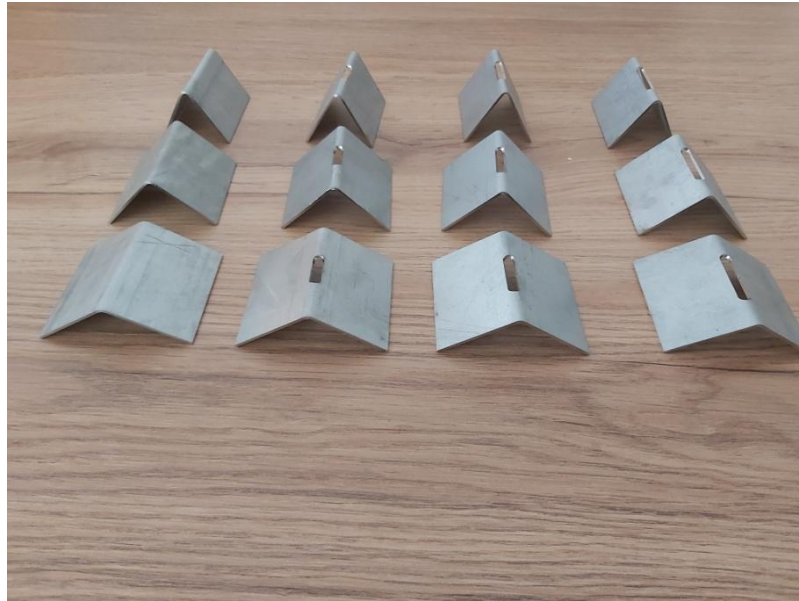
Yapılan deneylerde galvanizli DKP sac kullanılmıştır. Malzemenin paslanmaması için erimiş çinkonun içine daldırılarak kaplanmasına galvanizleme denir. Deneyde kullanılacak DKP saclar da bu nedenle galvanizli olarak temin edilmiştir. Deneylerde 1mm, 1,5mm ve 2mm olmak üzere 3 farklı kalınlıkta sac malzeme kullanılmıştır. Numuneler lazer kesim ile kesilerek 60 mm x 80 mm boyutlarında dikdörtgen levhalar haline getirilmiştir. Numunelerdeki delik oranları, deliğin boyunun numunenin boyuna oranı şeklinde belirlenmiştir. Bu bağlamda delik oranları %30, %40 ve %50 olarak belirlenip lazer kesim ile delinmiştir. Delik oranların bu şekilde seçilmesinin nedeni delik oranlarının geri yaylanma üstündeki etkisinin net olarak belirlenebilmesidir. Ayrıca artan delik oranının da geri yaylanmaya etkisinin belirlenebilmesi için üç farklı delik oranı tercih edilmiştir. Delik oranı Ek 1, Ek 2 ve Ek 3'te yer alan teknik resimlerde belirtilen l/a oranı ile ifade edilmiştir. Parçalar lazer kesim ile istenilen ölçülere getirilirken numunelerin hadde yönü aynı olacak biçimde kesilmiştir. Aynı şekilde bükme işlemi sırasında hadde yönü aynı olacak şekilde bükülmüştür.

Hadde yönünün sabit tutulmasının nedeni ise geri yaylanma üzerinde bir etkisinin olmamasının istenmesidir.

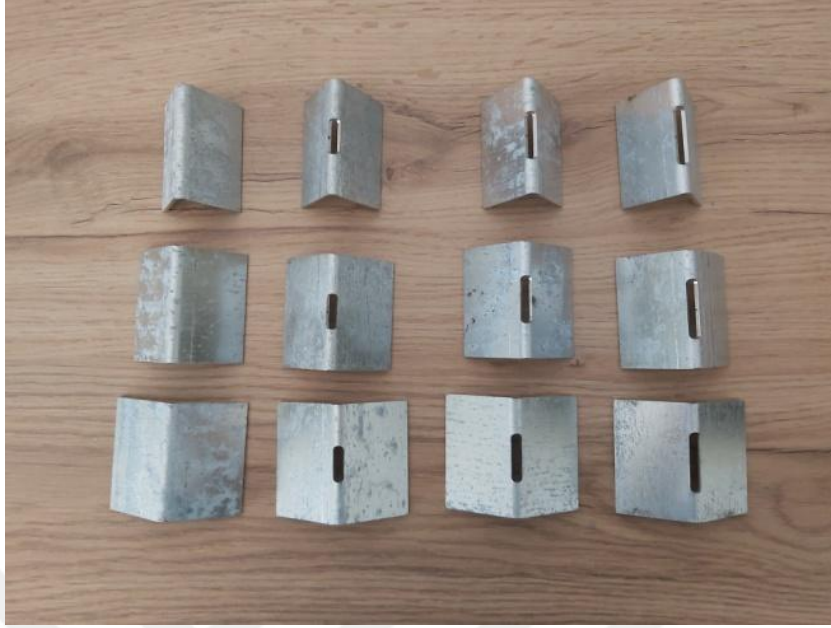
Farklı kalınlıktaki bu numuneler 60, 90 ve 120 derece değerlerindeki kalıp açıları ile V bükme yöntemiyle bükülmüştür. Elde edilen sonuçların güvenilirliği bakımından her bir delik oranı, kalınlık ve büküm açısı için 5'er adet deney yapılmış ve deneylerin ortalaması alınarak bir sonuç elde edilmiştir. Malzeme boyutlarının küçük seçilmesinin nedeni ise dar alanda geri esnemenin daha doğru tespit edilmesinden kaynaklanmaktadır. Parçaların teknik resimleri Ek 1, Ek2 ve Ek3'te verilmiştir.



Şekil 6-1. 1mm kalınlığındaki DKP saclar



Şekil 6-2. 1.5 mm kalınlığındaki DKP saclar



Şekil 6-3. 2mm kalınlığındaki DKP saclar

6.2. Deney Tasarımı ve V Bükme Deneyleri

Bükme ile şekil verme prosesinde geri yaylanmayı etkileyen parametreler olarak bükme açısı, delik oranı ve farklı kalınlığa sahip malzemeler kullanılmıştır. Farklı kalınlıklara sahip olan DKP sac malzemesinin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşenleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 6.2. DKP sacın mekanik özellikleri

MEKANİK ÖZELLİKLER				
Standart	Kalite	Akma Muk.(MPa)	Çekme Muk.(MPa)	Uzama
EN 10130	DC01	220-250	340-350	33% - %35

Tablo 6.3. DKP sacın kimyasal özellikleri

KİMYASAL ÖZELLİKLER							
Standart	Kalite	%C	%Mn	%P	%S	%SI	%Al
EN 10130	DC01	0.040	0.237	0.015	0.012	0.020	0.029

V bükme işleminde 150 tonluk Abkant Pres kullanılmıştır. Yapılan deneylerde uygulanan kuvvet 0.8 ton, zımba radyüsü 1mm, presin hızı 0,05m/sn, kalıp açıklığı 20cm, ütüleme süresi 2 saniye olup bu parametreler bütün numuneler için sabittir. Zımba ve kalıba ait teknik resimler Ek4 ve Ek 5'te yer almaktadır.



Şekil 6-4. Lazer kesim makinası



Şekil 6-5. Abkant Presin V Bükme Prosesi

6.3.Deneyin Yapılışı

Numune, deney başlamadan önce kalıba yerleştirilir. Deneyde kullanılan abkant pres nümerik kontrollü olduğundan parça geometrisi ve istenilen bükme açısı prese tanımlanmıştır. Ardından pres, malzemenin hizalanması için Şekil 6-5'te görülen tablasını istenilen ölçüye getirmiştir. Parça delikli kısmı ortaya gelecek şekilde hizalandıktan sonra pres çalıştırılmış ve bükme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney aynı büküm açısı, kalınlık ve delik oranındaki yani aynı parametrelere sahip parçalar için beş kez gerçekleştirilmiştir.

6.4.Ölçüm Çalışmaları

Bükme prosesleri sonucunda elde edilen DKP sac parçaların bükümle açıları dijital açıölçer ile ölçülmüştür. Ölçüm sırasında malzemelerin aynı yerden ölçülmesine dikkat edilmiştir. Daha hassas bir ölçüm elde edebilmek için açıölçerin katlanır kolu duvara düz bir şekilde sabitlenmiştir. Daha sonra parça dijital açıölçerin arasına yerleştirilmiş ve açıölçerin hareket edebilen kolu malzemeye temas ettirilmiş ve açı değeri ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerde hassas sonuç elde edilebilmesi için aynı parça birkaç kez ölçülmüştür. Her parça için aynı işlemler uygulanmıştır. Ölçüm işlemi uygulanmadan önce açıölçer değeri sıfırlanmıştır. Dijital açıölçerin teknik özellikleri aşağıdaki tabloda detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 6.4. Dijital Açı Ölçerin Teknik Özellikleri

TEKNİK ÖZELLİKLER		
Model No.	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
5322-200	0° - 360°	± 0,5°

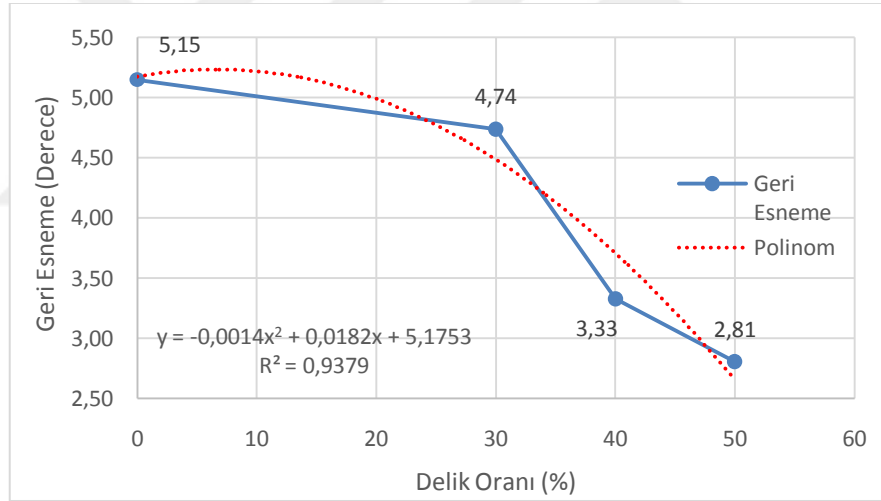
6.5.Deney Verileri

Yapılan deneyler neticesinde elde edilen veriler tablo ve grafik şeklinde incelenecektir. Tablolarda yapılan deneylerin ardından numunelerin büküm açıları ve geri esneme açıları belirtilecektir. Yapılan deneyler neticesinde bir kısım numunede oluşan ileri esneme tablolarında – geri esneme şeklinde gösterilmektedir. Grafiklerde ise geri esneme açısının numunelerdeki delik oranıyla değişimi gösterilecektir. Mavi ile belirtilen noktalar deney sonucunda elde edilen veriler iken kırmızı ile belirtilen çizgi ise regresyon ile elde edilen denklemin grafik üzerindeki halidir. Regresyon sonucu elde edilen denklem grafikte belirtilmiştir. Gerçek değerler ile regresyon sonucu elde edilen denklemin uyumu olarak adlandırabilecek determinasyon katsayısı olan R^2 değeri de grafikte yer almaktadır.

Tablo 6.5. Kalınlığı 1mm olan 5 DKP sac numunesinin 60 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı

	ORTALAMA (derece)	GERİ ESNEME (derece)
Deliksiz	65,15	5,15
%30 delik oranı	64,74	4,74
%40 delik oranı	63,33	3,33
%50 delik oranı	62,81	2,81

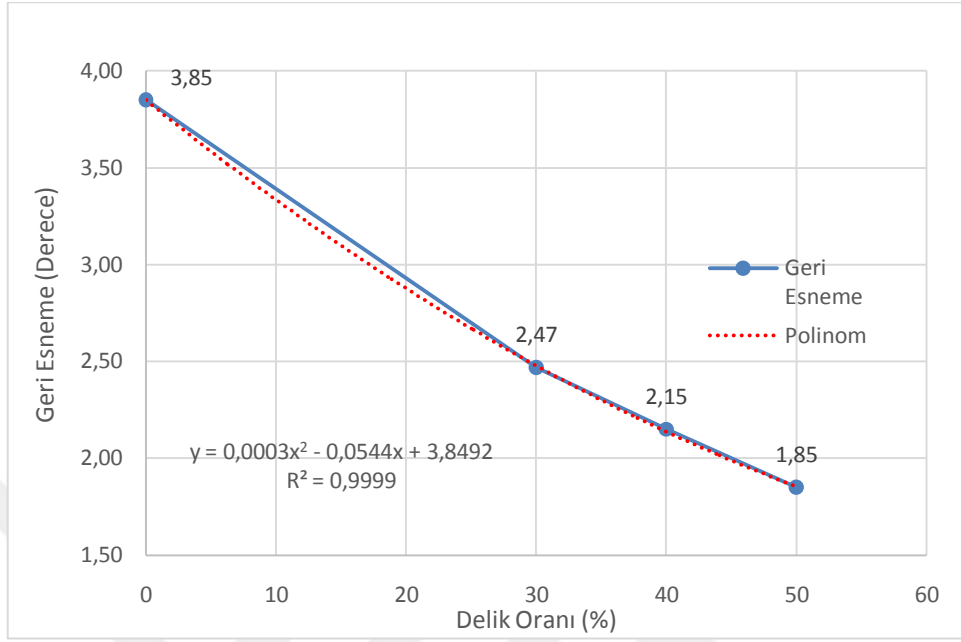
Şekil 6-6. 1mm'lik numunelerin 60 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği



Tablo 6.6. Kalınlığı 1mm olan 5 DKP sac numunesinin 90 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı

	ORTALAMA (derece)	GERİ ESNEME (derece)
Deliksiz	93,85	3,85
%30 delik oranı	92,47	2,47
%40 delik oranı	92,15	2,15
%50 delik oranı	91,85	1,85

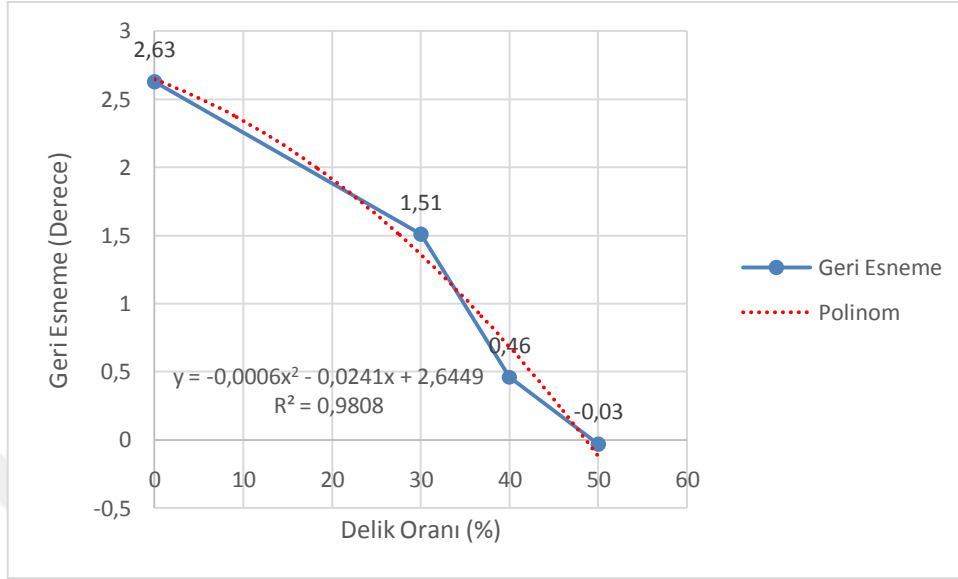
Şekil 6-7. 1mm'lik numunelerin 90 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği



Tablo 6.7. Kalınlığı 1mm olan 5 DKP sac numunesinin 120 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı

	ORTALAMA (derece)	GERİ ESNEME (derece)
Deliksiz	122,63	2,63
%30 delik oranı	121,51	1,51
%40 delik oranı	120,46	0,46
%50 delik oranı	119,97	-0,03

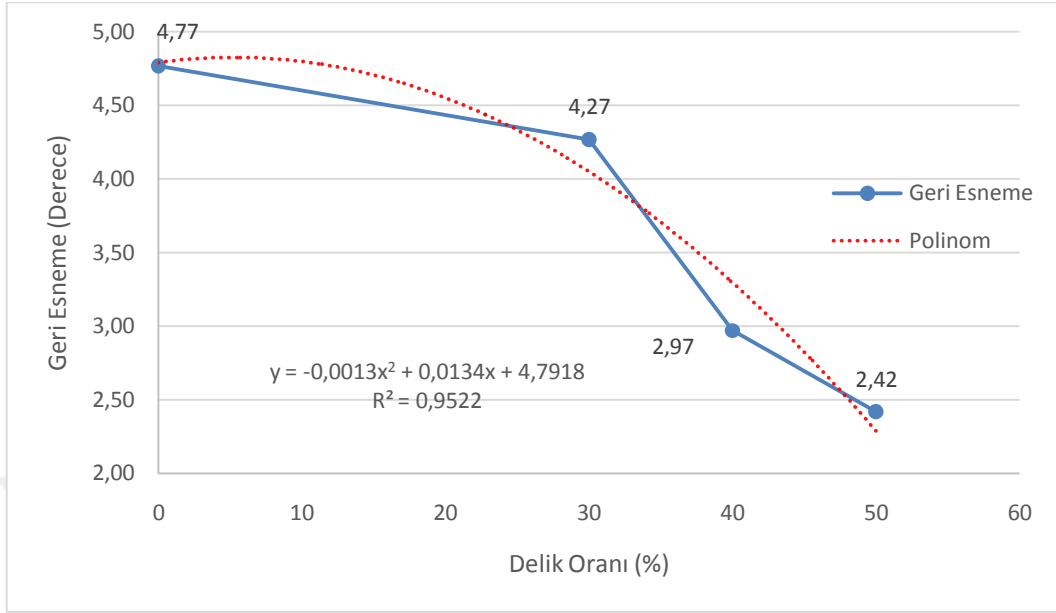
Şekil 6-8. 1mm'lik numunelerin 120 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği



Tablo 6.8. Kalınlığı 1,5 mm olan 5 DKP sac numunesinin 60 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı

	ORTALAMA (derece)	GERİ ESNEME (derece)
Deliksiz	64,77	4,77
%30 delik oranı	64,27	4,27
%40 delik oranı	62,97	2,97
%50 delik oranı	62,42	2,42

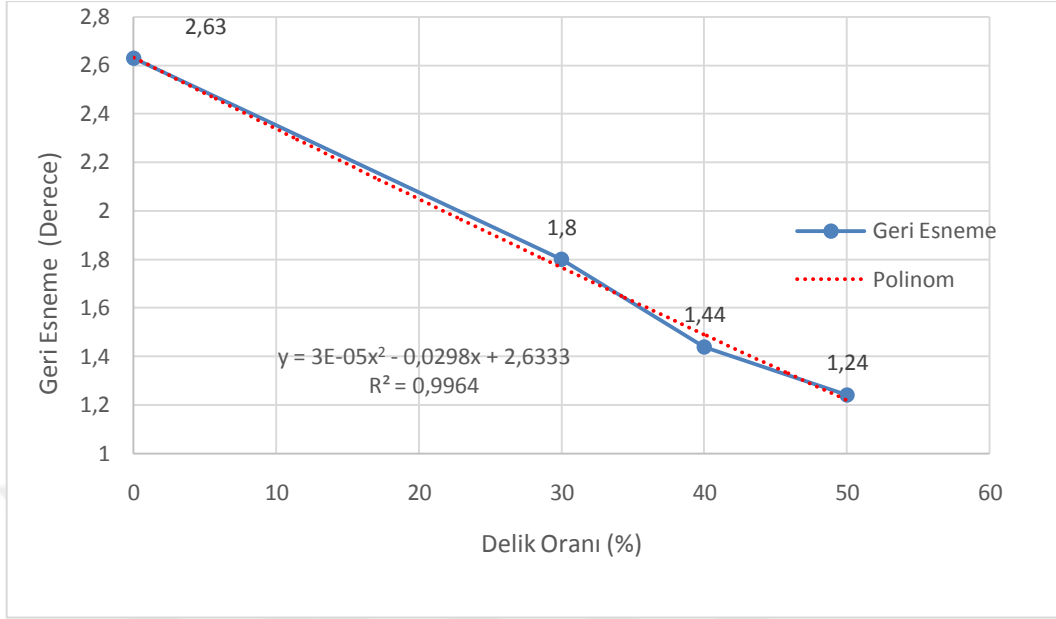
Şekil 6-9. 1,5mm'lik numunelerin 60 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği



Tablo 6.9. Kalınlığı 1,5 mm olan 5 DKP sac numunesinin 90 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı

	ORTALAMA (derece)	GERİ ESNEME (derece)
Deliksiz	92,63	2,63
%30 delik oranı	91,80	1,80
%40 delik oranı	91,44	1,44
%50 delik oranı	91,24	1,24

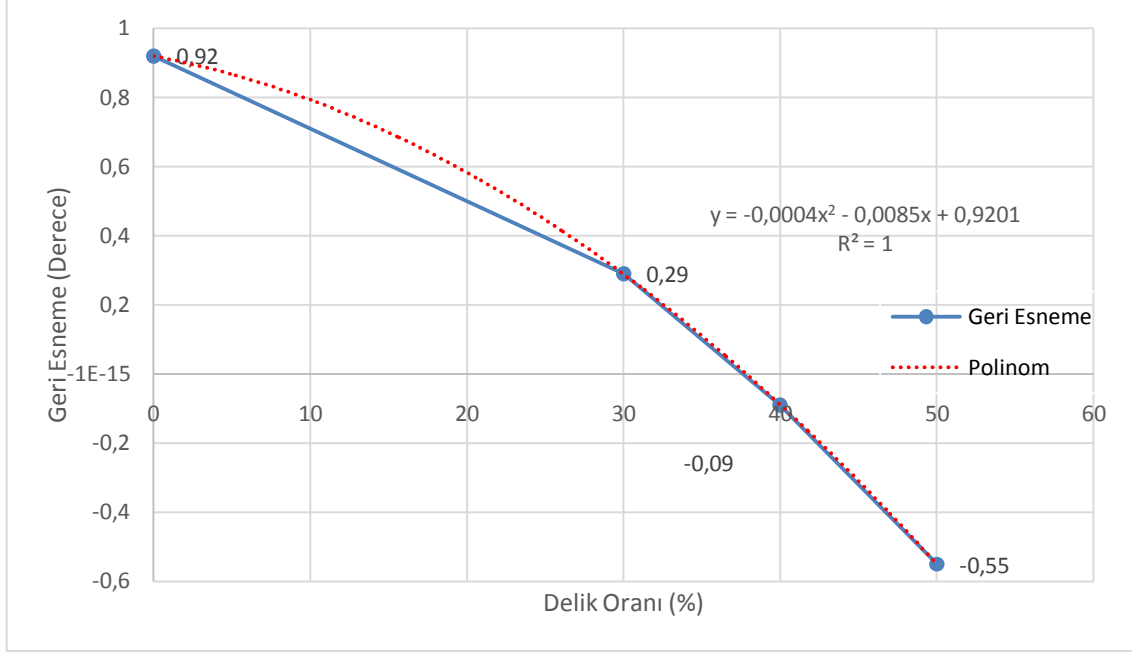
Şekil 6-10. 1,5mm'lik numunelerin 90 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği



Tablo 6.10. Kalınlığı 1,5 mm olan 5 DKP sac numunesinin 120 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı

	ORTALAMA (derece)	GERİ ESNEME (derece)
Deliksiz	120,92	0,92
%30 delik oranı	120,29	0,29
%40 delik oranı	119,91	-0,09
%50 delik oranı	119,45	-0,55

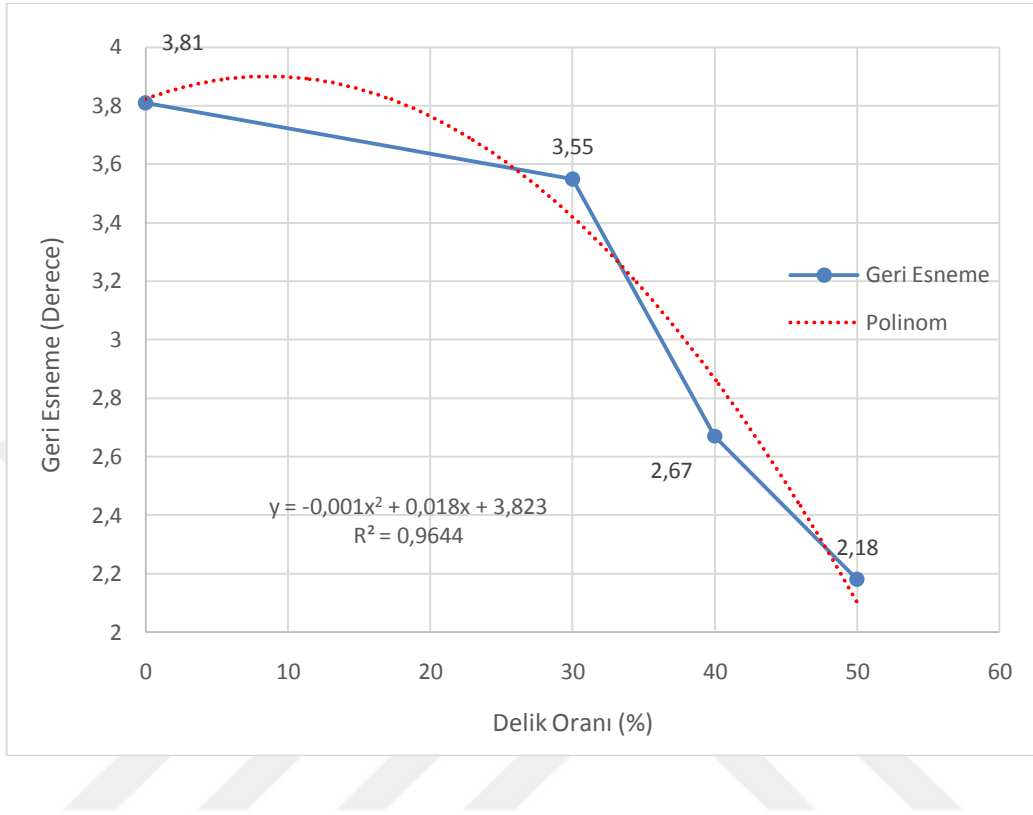
Şekil 6-11. 1,5mm'lik numunelerin 120 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği



Tablo 6.11. Kalınlığı 2 mm olan 5 DKP sac numunesinin 60 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı

	ORTALAMA (derece)	GERİ ESNEME (derece)
Deliksiz	63,81	3,81
%30 delik oranı	63,55	3,55
%40 delik oranı	62,67	2,67
%50 delik oranı	62,18	2,18

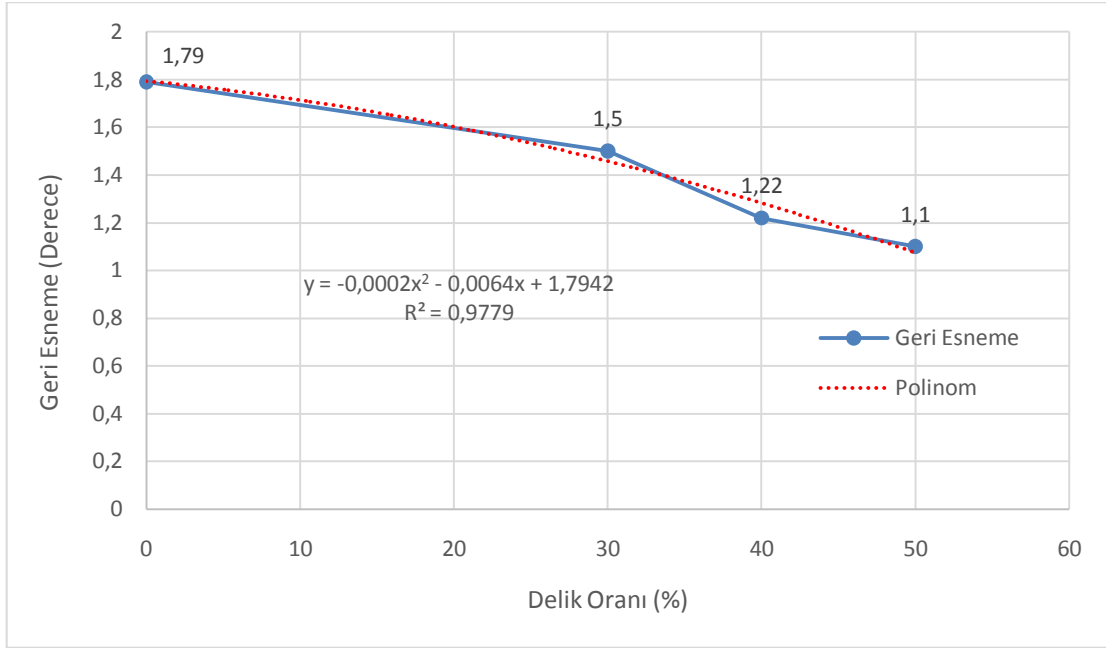
Şekil 6-12. 2mm'lik numunelerin 60 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği



Tablo 6.12. Kalınlığı 2 mm olan 5 DKP sac numunesinin 90 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı

	ORTALAMA (derece)	GERİ ESNEME (derece)
Deliksiz	91,79	1,79
%30 delik oranı	91,50	1,50
%40 delik oranı	91,22	1,22
%50 delik oranı	91,10	1,10

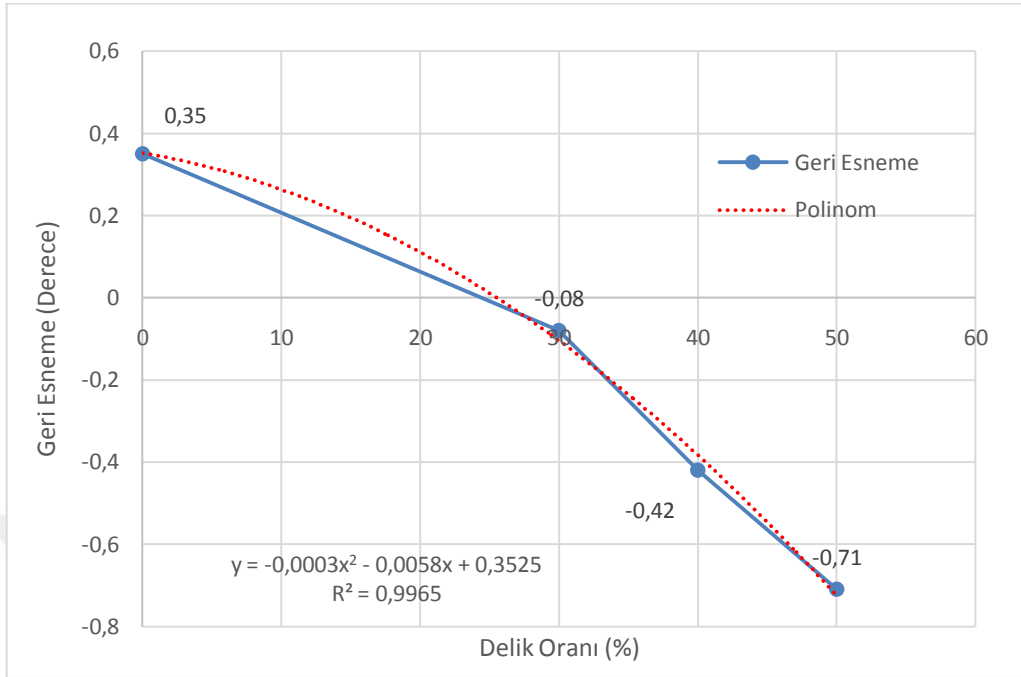
Şekil 6-13. 2mm'lik numunelerin 90 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği



Tablo 6.13. Kalınlığı 2 mm olan 5 DKP sac numunesinin 120 derece V bükülmesi sonucunda oluşan ortalama büküm açısı ve numunelerin ortalama geri esneme miktarı

	ORTALAMA (derece)	GERİ ESNEME (derece)
Deliksiz	120,35	0,35
%30 delik oranı	119,92	-0,08
%40 delik oranı	119,58	-0,42
%50 delik oranı	119,29	-0,71

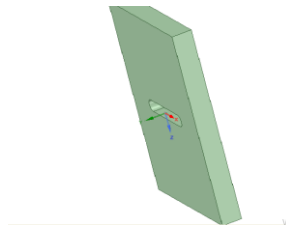
Şekil 6.14. 2mm'lik numunelerin 120 derece V Büküldüğünde oluşan geri esneme grafiği



6.6. Sonlu Eleman Analizi

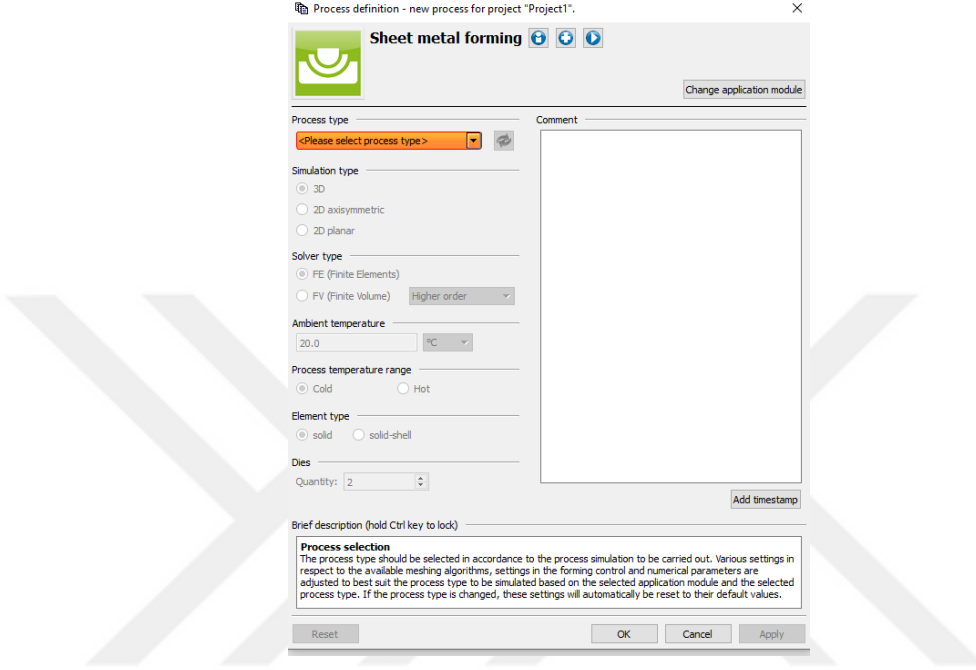
Analizlerde kullanılacak olan kalıp, zımba ve bükülecek olan parçalar ANSYS yazılımının Space Claim 3D modülü kullanılarak tasarlanmıştır. Analizde kullanılacak yöntemde kalıp sabit şekildeyken zımba aşağı yönlü hareket ederek parçayı şekillendirecektir. Ardından zımba ve kalıp parçadan ayrılarak parçanın geri yaylanması ölçülecektir.

Parçalar Space Claim 3D modülünde çizildikten sonra üç boyutlu hale getirilmiş ve “x_b” formatında kaydedilmiştir. Yapılan üç boyutlu çizimi Simufact programına aktarırken Simufact’ın açabildiği formatlardan biri olan “x_b” formatı tercih edilmiştir. Her parça için bu işlem yapıldıktan sonra Simufact programına ayrı ayrı aktarılmıştır.



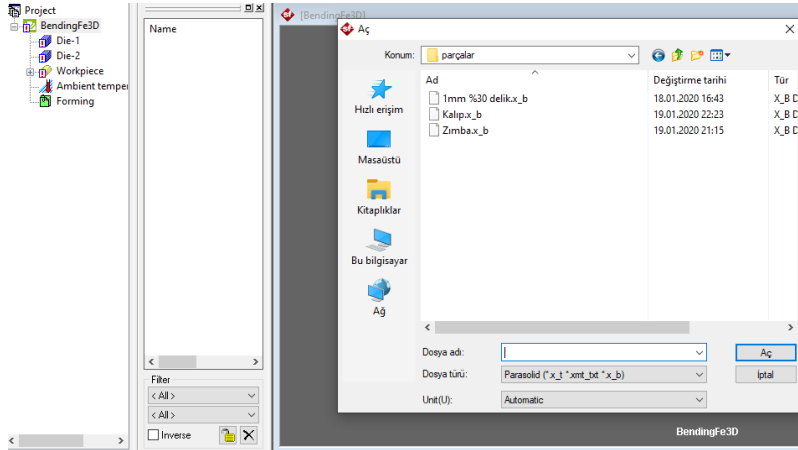
Şekil 6.15. 2mm kalınlığında %30 delik oranına sahip DKP sacın Space Claim 3D İle modellenmesi

Simufact programında yapılacak analiz için 3D analiz komutu seçilmiştir. Parçaların bir kısmı delikli olduğundan ve anizotropi etkisini göz ardı etmemek için 3D analiz modülü seçilmiştir.



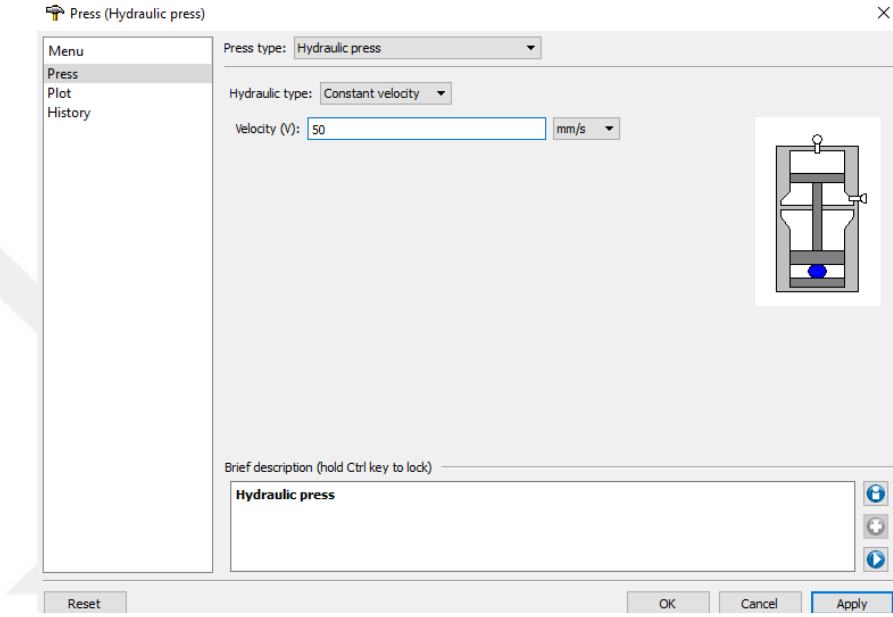
Şekil 6.16. 3D analiz modülü

3D analiz modülü seçildikten sonra Space Claim 3Ds'de çizilmiş olan parçalar Simufact programına aktarılmıştır.



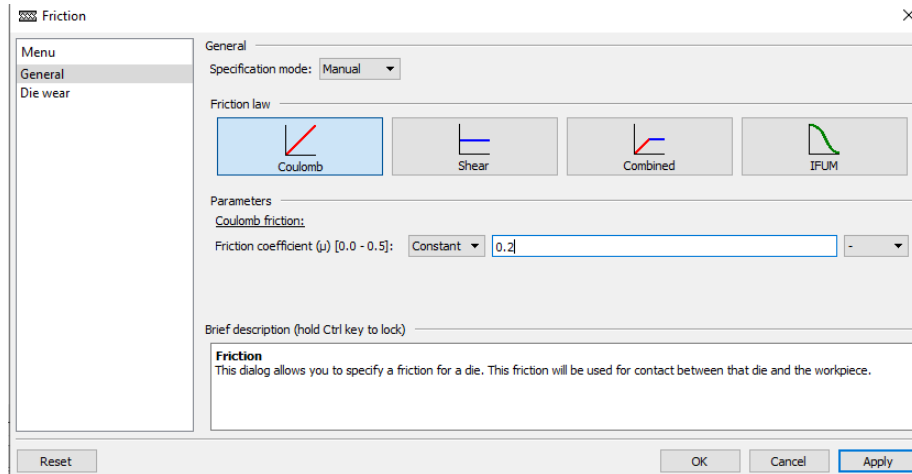
Şekil 6.17. Simufact programına parça aktarma

Yapılacak analizlerde kullanılmak üzere hidrolik pres tipi seçilmiştir. Presin basma hızı sabit olarak Mersan Metal'den alınan bilgi doğrultusunda 50 mm/s olarak seçilmiştir.



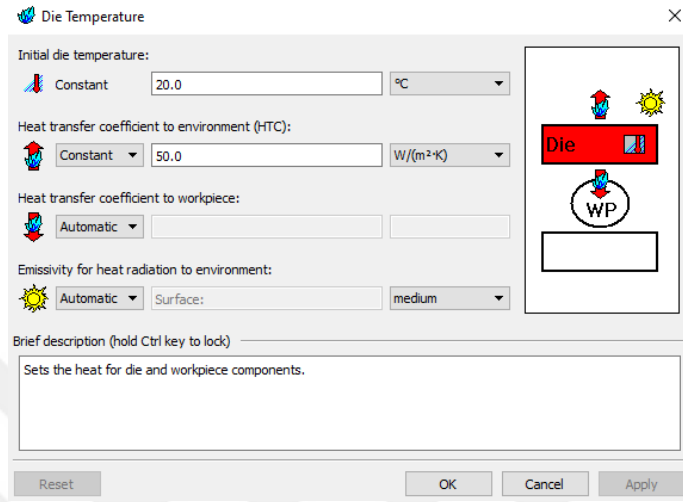
Şekil 6.18. Hidrolik Pres tipi seçimi

Pres tipi ve hızının belirlenmesinin ardından analizde kullanılacak sürtünme modeli belirlenmiştir. Simufact programında yer alan Coulomb sürtünme modeli seçilerek değer olarak 0.2 belirlenmiştir.



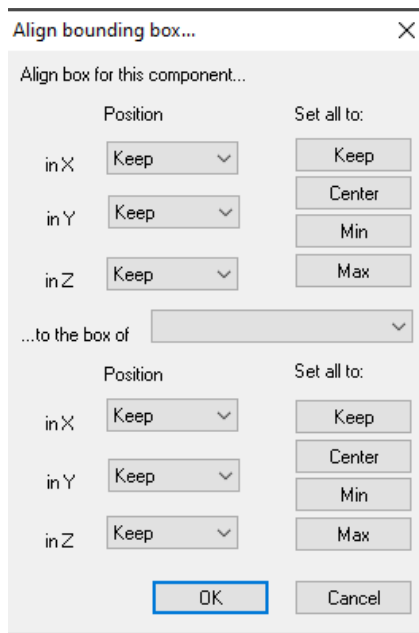
Şekil 6.19. Sürtünme modeli belirleme

Simufact programında ısı değişimleri de bükme işlemleri esnasında bir parametre olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle deneyler oda sıcaklığında gerçekleştiği ve herhangi bir ısı transferi olmadığı için hava, malzeme, kalıp ve zımba sıcaklığı olarak programda yer alan 20°C belirlenmiştir.



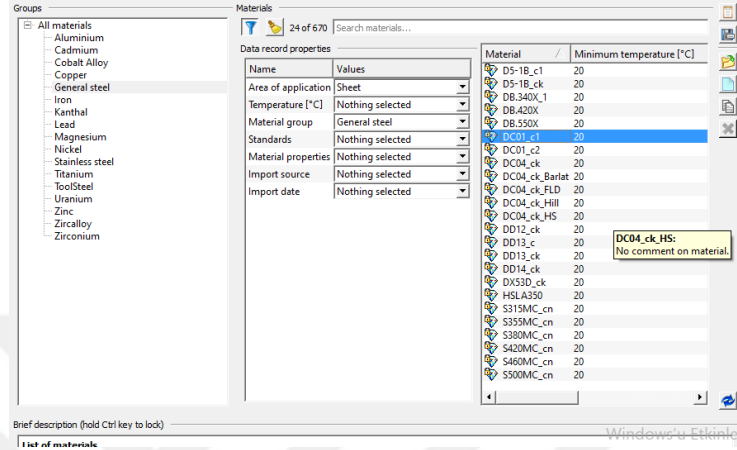
Şekil 6.20. Sıcaklık belirleme

Sıcaklık değerleri girildikten sonra malzemelerin konumlandırılması gerçekleştirilmiştir. Simufact programının arayüzünde yer alan kullanıcının kolay bir şekilde parçaları konumlandırabileceği “align bounding box” komutu ile üç parça da konumlandırılmış ve analize başlanacak noktalara getirilmiştir.



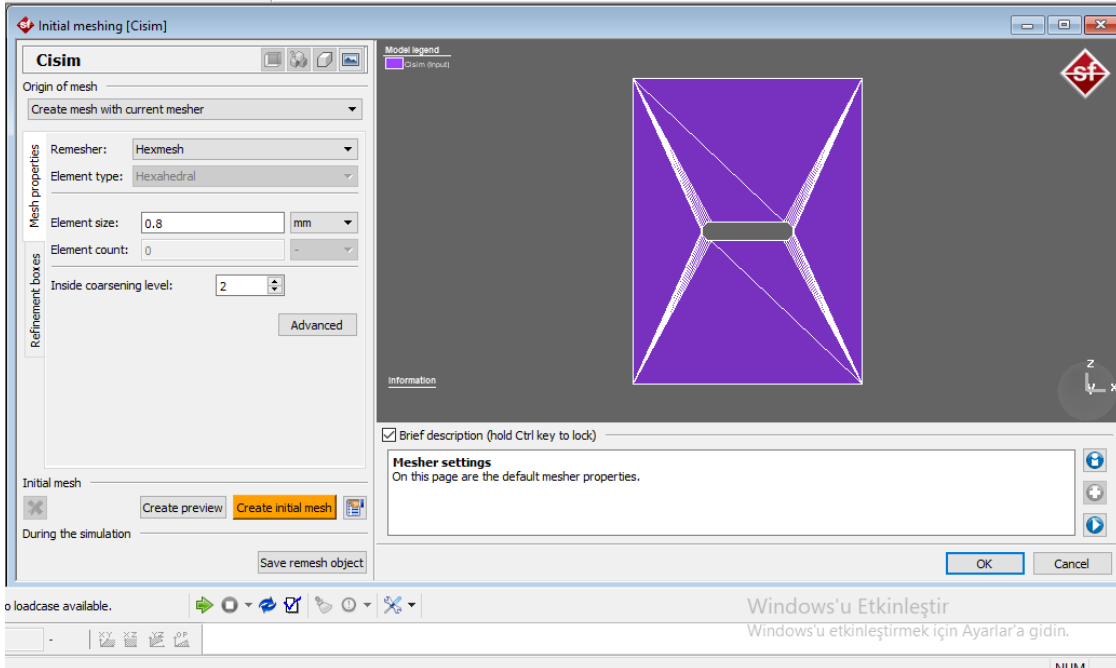
Şekil 6.21. Simufact programına parça konumlandırma

Deneysel parçalarının temin edildiği firma olan Altes Alüminyum'dan elde edilen malzemenin mekanik özellikleriyle benzeşen çelik alaşımı seçilerek malzemeye atanmıştır.



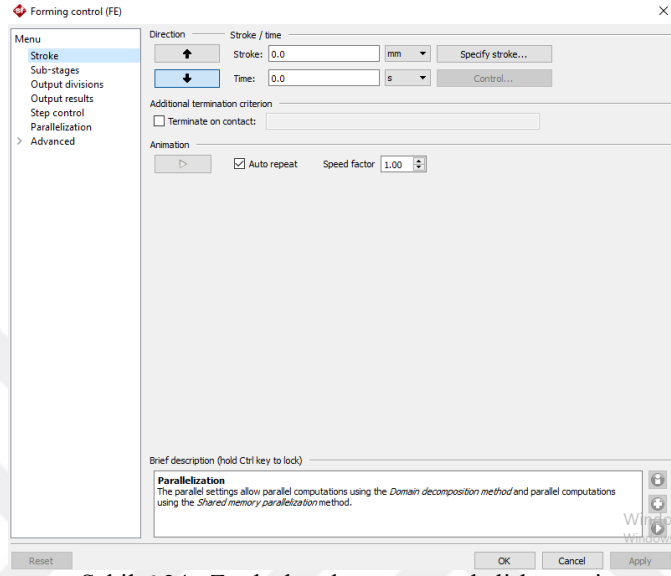
Şekil 6.22. Malzeme seçimi

Bu işlemler bittikten sonra parça üzerinde “mesh” ağı yapılmıştır. Ağ yapısı için programın önerdiği ve üç boyutlu kompleks şekillerin analizinde kullanılması için tavsiye edilen “Hexahedral” ağ yapısı kullanılmıştır. Ağların boyutu olarak 0.8 mm seçilmiştir.



Şekil 6.23. Mesh belirleme

Parçanın ağ yapısının oluşturulmasının ardından zımbanın hareketi için komutlar girilmiştir. Bu komut ekranında firmadan alınan bilgiler doğrultusunda zımbanın aşağı yöndeki hareketi ve kuvvet parametreleri belirlenmiştir.



Şekil 6.24. Zımba hareket yönünün belirlenmesi

Tablo 6.14. Kalınlığı 1 mm olan DKP sacların 60 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması

	Deneysel Geri Esneme Değerleri	Analiz Sonucu Geri Esneme
Deliksiz	5,15	5,22
%30 delik oranı	4,74	4,51
%40 delik oranı	3,33	3,89
%50 delik oranı	2,81	3,10

Tablo 6.15. Kalınlığı 1 mm olan DKP sacların 90 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması

	Deneysel Geri Esneme Değerleri	Analiz Sonucu Geri Esneme
Deliksiz	3,85	4,12
%30 delik oranı	2,47	3,35
%40 delik oranı	2,15	2,89
%50 delik oranı	1,85	2,41

Tablo 6.16. Kalınlığı 1 mm olan DKP sacların 120 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması

	Deneysel Geri Esneme Değerleri	Analiz Sonucu Geri Esneme
Deliksiz	2,63	2,72
%30 delik oranı	1,51	1,61
%40 delik oranı	0,46	0,96
%50 delik oranı	-0,03	0,14

Tablo 6.17. Kalınlığı 1,5 mm olan DKP sacların 60 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması

	Deneysel Geri Esneme Değerleri	Analiz Sonucu Geri Esneme
Deliksiz	4,77	5,48
%30 delik oranı	4,27	4,95
%40 delik oranı	2,97	4,26
%50 delik oranı	2,42	3,61

Tablo 6.18. Kalınlığı 1,5 mm olan DKP sacların 90 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması

	Deneysel Geri Esneme Değerleri	Analiz Sonucu Geri Esneme
Deliksiz	2,63	2,86
%30 delik oranı	1,80	2,24
%40 delik oranı	1,44	1,96
%50 delik oranı	1,24	1,75

Tablo 6.19. Kalınlığı 1,5 mm olan DKP sacların 120 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması

	Deneysel Geri Esneme Değerleri	Analiz Sonucu Geri Esneme
Deliksiz	0,92	1,11
%30 delik oranı	0,29	0,92
%40 delik oranı	-0,09	-0,39
%50 delik oranı	-0,55	-0,84

Tablo 6.20. Kalınlığı 2 mm olan DKP sacların 60 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması

	Deneysel Geri Esneme Değerleri	Analiz Sonucu Geri Esneme
Deliksiz	3,81	4,29
%30 delik oranı	3,55	4,16
%40 delik oranı	2,67	3,48
%50 delik oranı	2,18	3,17

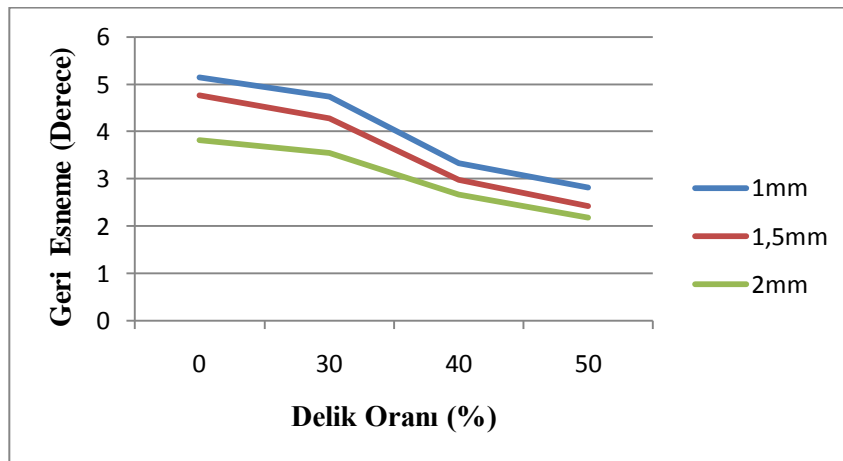
Tablo 6.21. Kalınlığı 2 mm olan DKP sacların 90 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması

	Deneysel Geri Esneme Değerleri	Analiz Sonucu Geri Esneme
Deliksiz	1,79	1,86
%30 delik oranı	1,5	1,63
%40 delik oranı	1,22	1,42
%50 delik oranı	1,10	1,58

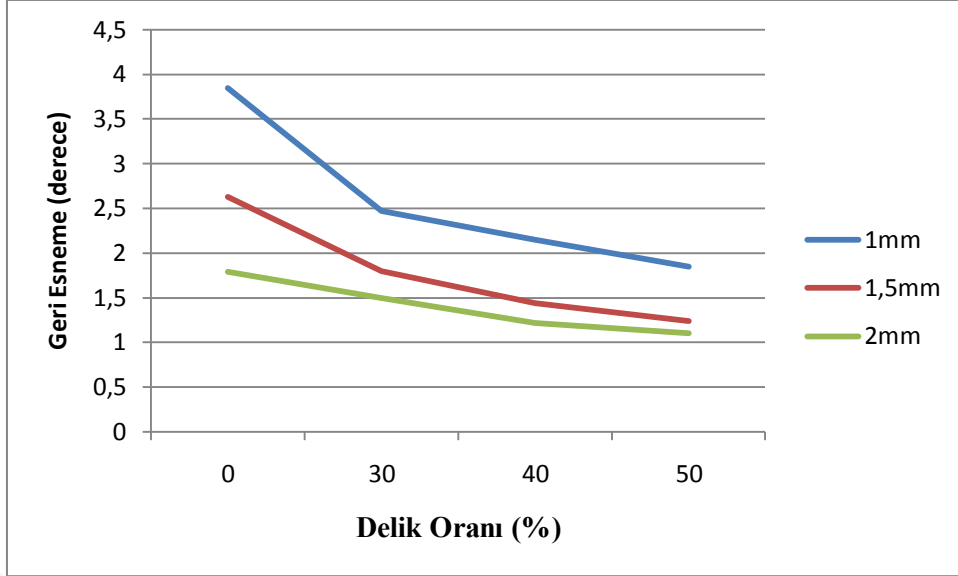
Tablo 6.22. Kalınlığı 2 mm olan DKP sacların 120 derecelik bükme açısında deneysel geri esneme değerleri ile analiz sonucu geri esneme değerlerinin karşılaştırılması

	Deneysel Geri Esneme Değerleri	Analiz Sonucu Geri Esneme
Deliksiz	0,35	0,46
%30 delik oranı	-0,08	0,10
%40 delik oranı	-0,42	-0,23
%50 delik oranı	-0,71	-0,86

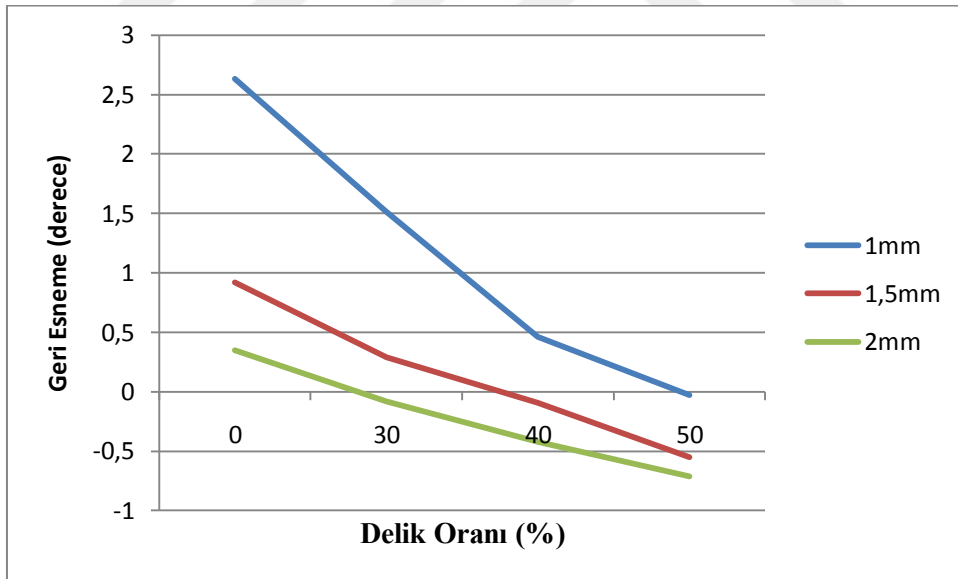
6.7.Deneysel Sonuçlar



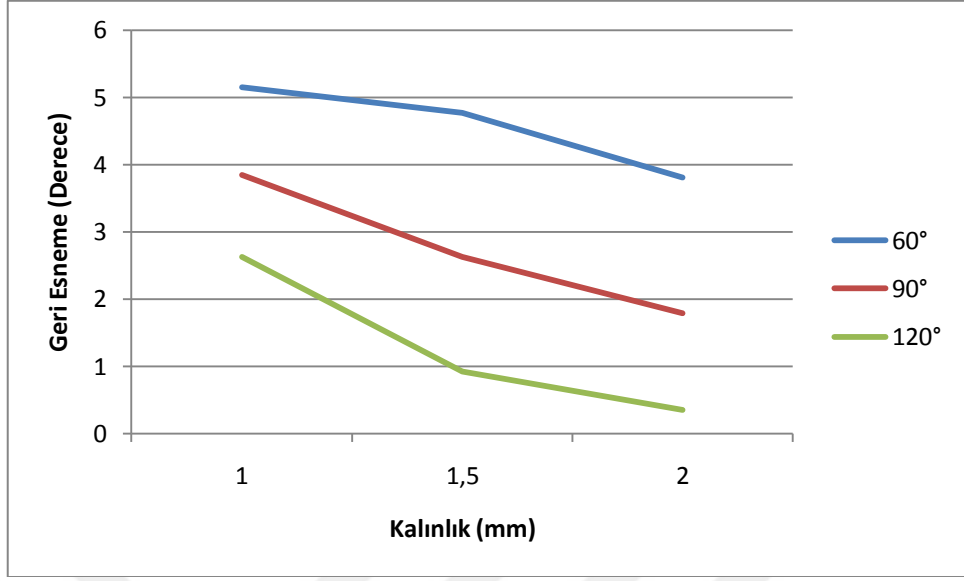
Şekil 6.25. 60 dereceyle bükülen 1, 1,5 ve 2mm kalınlığındaki numunelerin geri esneme – delik oranı grafiği



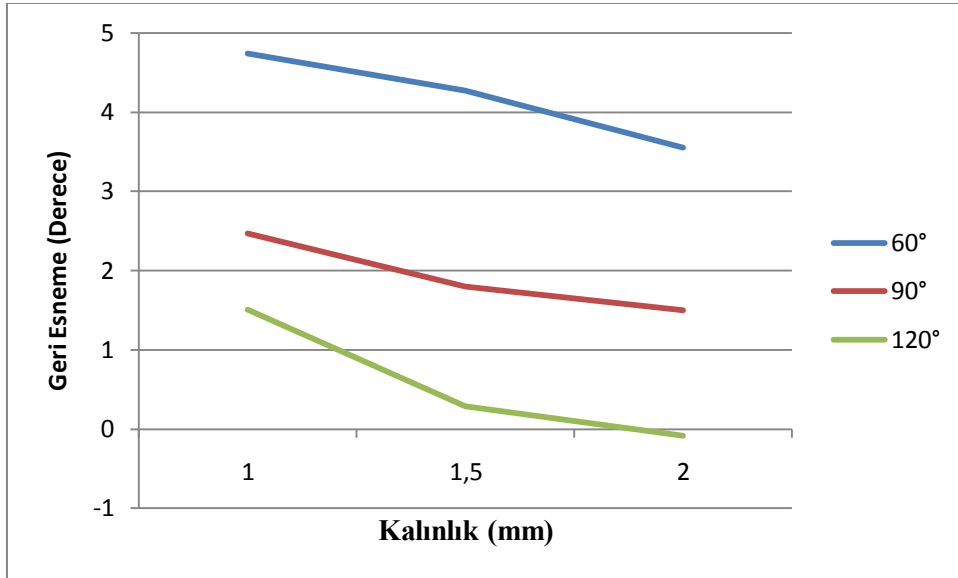
Şekil 6.26. 90 dereceyle bükülen 1, 1,5 ve 2mm kalınlığındaki numunelerin geri esneme – delik oranı grafiği



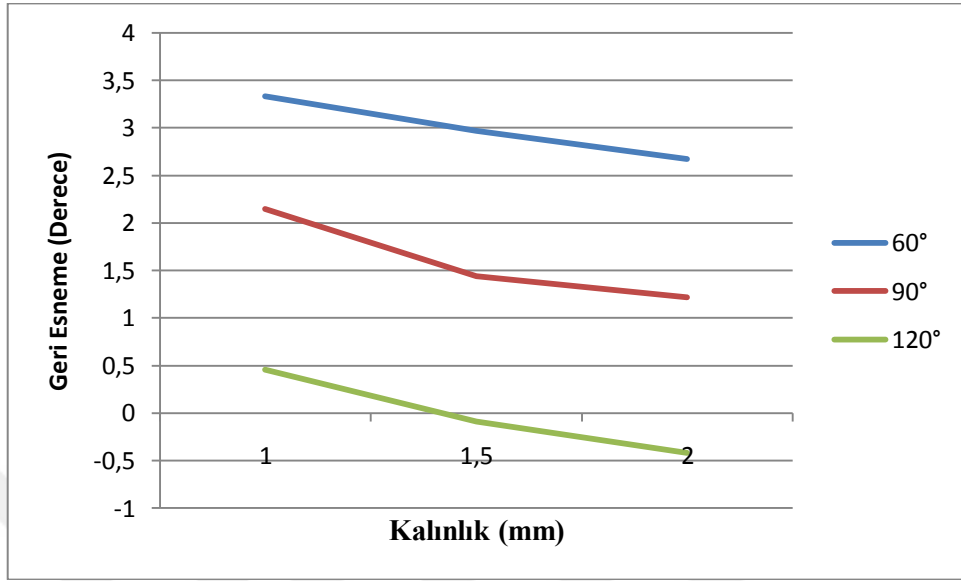
Şekil 6.27. 120 dereceyle bükülen 1, 1,5 ve 2mm kalınlığındaki numunelerin geri esneme – delik oranı grafiği



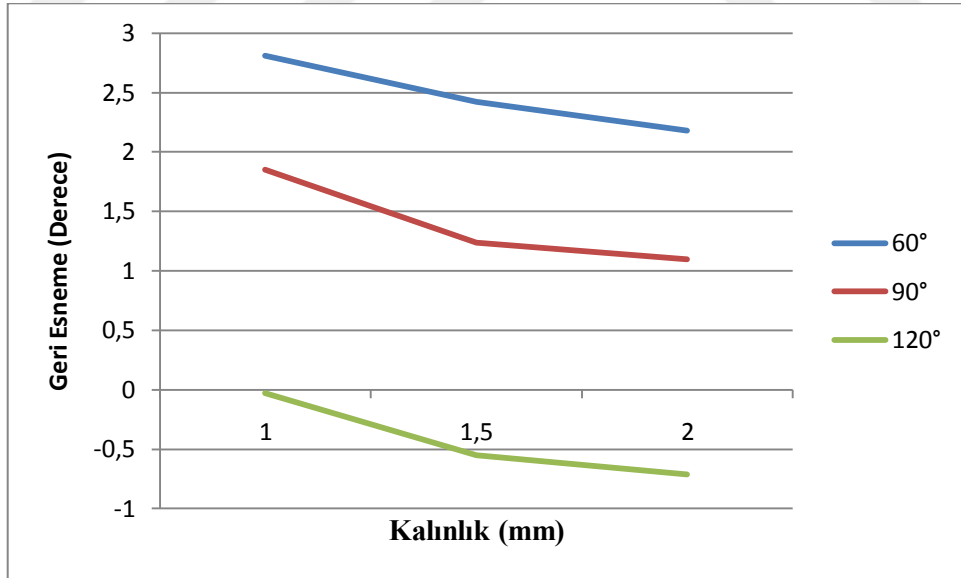
Şekil 6.28. Delik oranı 0 olan numunelerin 60, 90 ve 120 derecelerdeki geri esneme – kalınlık grafiği



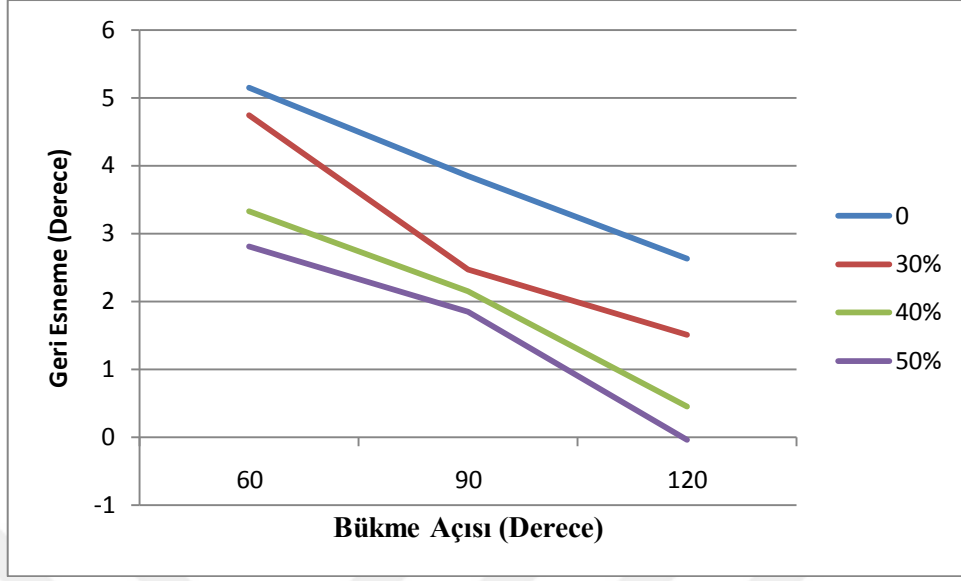
Şekil 6.29. Delik oranı %30 olan numunelerin 60, 90 ve 120 derecelerdeki geri esneme – kalınlık grafiği



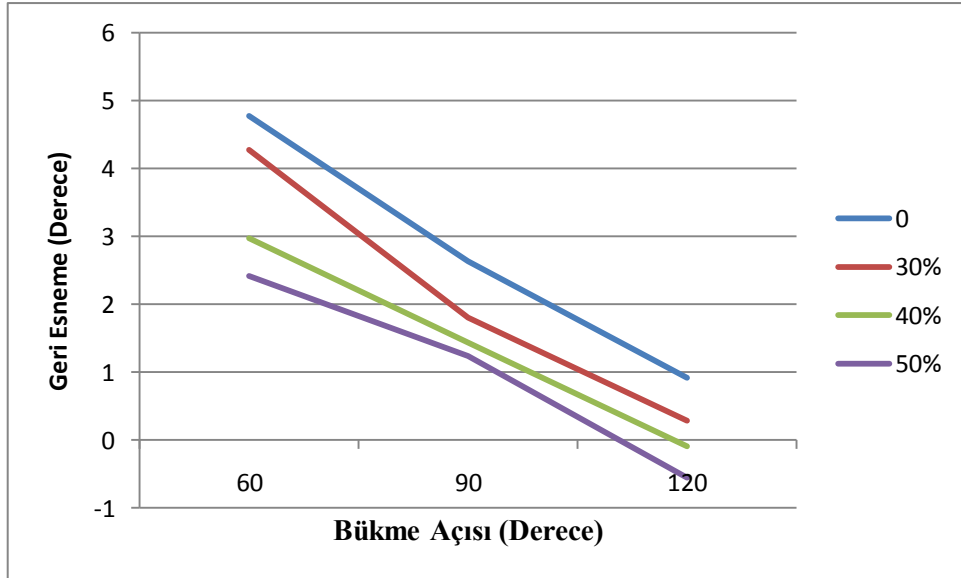
Şekil 6.30. Delik oranı %40 olan numunelerin 60, 90 ve 120 derecelerdeki geri esneme – kalınlık grafiği



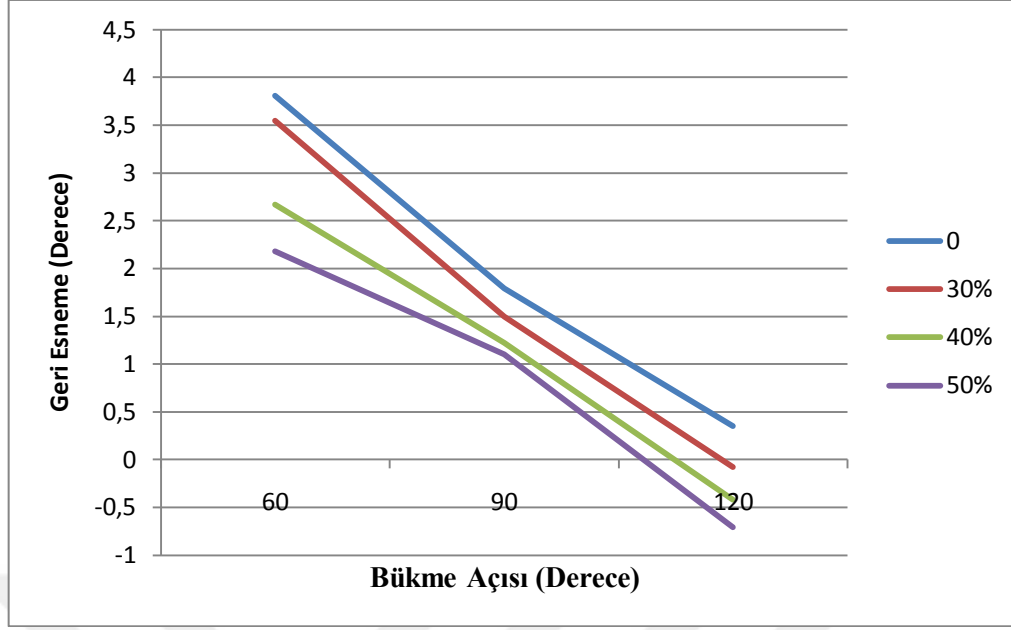
Şekil 6.31. Delik oranı %50 olan numunelerin 60, 90 ve 120 derecelerdeki geri esneme – kalınlık grafiği



Şekil 6.32. 1mm kalınlığında farklı delik oranlarına sahip numunelerin 60,90 ve 120 derece ile V bükülmesiyle oluşan geri esneme dereceleri



Şekil 6.33. 1,5 mm kalınlığında farklı delik oranlarına sahip numunelerin 60,90 ve 120 derece ile V bükülmesiyle oluşan geri esneme dereceleri



Şekil 6.34. 2mm kalınlığında farklı delik oranlarına sahip numunelerin 60,90 ve 120 derece ile V bükülmesiyle oluşan geri esneme dereceleri

Şekil 6.25, 6.26 ve 6.27’de 60, 90 ve 120 derecelik bükme açısına sahip olan parçalar için geri esneme – delik oranı grafiği çizilmiştir. Grafiklerde 1mm, 1,5mm ve 2mm kalınlıklarına sahip farklı delik oranları ve bükme açılara sahip DKP sacların geri esneme miktarları bulunmaktadır. Grafikler incelendiğinde üç bükme açısında ve tüm delik oranlarında en yüksek geri yaylanmanın 1mm kalınlığı olan parçada gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Aynı koşullarda en az geri yaylanmanın da 2mm kalınlığındaki parçada olduğu görülmektedir.

Şekil 6.28, 6.29, 6.30 ve 6.31’de 60, 90 ve 120 derece bükme açısına sahip olan parçalar için geri esneme – kalınlık grafiği çizilmiştir. Grafikler incelendiğinde aynı bükme açısına sahip kalınlıkları ve delik oranları farklı olan DKP sacların geri esneme miktarları bulunmaktadır. Tüm kalınlıklarda ve tüm delik oranlarında en yüksek geri yaylanma 60 derecede görülürken, en düşük geri yaylanma 120 derecede görülmüştür.

Şekil 6.32, 6.33 ve 6.34'te deliksiz, %30, %40 ve %50 delik oranına sahip olan parçalar için geri esneme – bükme açısı grafiği çizilmiştir. Üç grafik de incelendiğinde en yüksek geri yaylanmanın deliksiz olan parçalarda olduğu, en düşük geri yaylanmanın ise %50 delikli parçada olduğu belirlenmiştir.

Tablo 6-14 – tablo 6-22 arasında deneysel sonuçlarla analiz sonuçları kıyaslanmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde analiz ve deney sonuçlarındaki geri yaylanma açılarının paralel sonuçlar verdiği görülmektedir.

Her bükme açısı, kalınlık ve delik oranları için ayrı ayrı standart sapma değerleri ölçülmüştür. Standart sapma değerlerinin 0,3023-1,0027 arasında olduğu gözlemlenmiştir. Standart sapma değerlerinin düşük olması, her bir numunenin düşük hata payı içerisinde büküldüğüne işaret etmektedir.

7. SONUÇLAR

Yapılan tez çalışmasında V bükme kalıbı ile bükme prosesinde 1mm, 1,5mm ve 2mm kalınlığında DKP saclar kullanılmıştır. DKP sacın kullanılmasının temel nedenlerinden biri ise endüstride sıkça kullanılan bir malzeme olmasıdır. Bu saclar 60, 90 ve 120 derece ile V bükme işlemine tabii tutulmuş ve farklı delik oranlarının geri esneme değerleri incelenmiştir. Malzemelerin geri esnemesiyle ilgili daha doğru bir veri elde edebilmek için deneyler 5 kez tekrar edilmiştir. Bu deneyler doğrultusunda elde edilen sonuçların ortalaması alınarak bu çalışmada yer almıştır. Ayrıca yapılan analizlerle deney sonuçları kıyaslanmış ve sonuçların paralellik gösterdiği ortaya konmuştur.

Yapılan deneyler ve sayısal analiz sonucunda aşağıdaki veriler elde edilmiştir.

- Geri yaylanmanın kalınlık, delik oranı ve bükme açısına göre değiştiği gözlemlenmiştir.
- 60, 90 ve 120 derecelerde gerçekleşen V bükme işlemi sonucunda kalınlığın artmasının geri yaylanmayı azaltıcı bir etki yarattığı ortaya çıkmıştır.
- Farklı delik oranlarına sahip olan parçalarda gerçekleştirilen bükme işlemi sonucu bükme açısının artmasının geri yaylanmayı azalttığı incelenmiştir.
- 1mm, 1,5mm ve 2mm kalınlıklarında olan parçalar için yapılan bükme işlemi neticesinde delik oranının artmasının geri yaylanmayı azalttığı gözlemlenmiştir.
- Deneyler esnasında kullanılan parçalardaki delik oranının daha küçük olması halinde oluşacak geri yaylanmanın deliksiz parçada oluşan geri yaylanmaya daha yakın olacağı grafikler üzerinden değerlendirilmiştir. Delik oranının geri yaylanmaya etkisinin daha net gözlemlenmesi için %30, %40 ve %50 delik oranının tercih edilmesinin uygun olduğu ortaya konmuştur.
- Yapılan analizler sonucu elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla örtüştüğü görülmüştür.
- Çalışmada elde edilen bulgularla literatürdeki çalışmaların sonuçlarının paralel olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] V. Boljanovic, Sheet Metal Forming Processes and Die Design, New York: Industrial Press, 2004.
- [2] S. E. Turan, “Düz Kenar Bükme ve Döner Kalıpla Kenar Bükme İşlemlerinin Geri Yaylanma Üzerine Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [3] A. Işıktaş ve İ. Ay, «Farklı Kalınlıklardaki DKP Sacın Farklı Açılarda Yapılan V-Bükme İşlemindeki Geri Esnemelerinin İncelenmesi,» *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, pp. 59-69, 2015.
- [4] J. Slota ve M. Jurcisin, «Experimental and Numerical Prediction of Springback in V-Bending of Anisotropic Sheet Metals For Automotive Industry,» *Mechanika*, pp. 55-69, 2012.
- [5] C.-C. Chen, «Experimental Study on Punch Radius and Grain Effects in V-Bending Process,» *Materials and Manufacturing Processes*, pp. 461-465, 2014.
- [6] J. Cumin, I. Samardzic ve L. Maglic, «Statistical Analysis of the V-Tool Bending Process Parameters in the Bending of HC260Y Steel,» *Metallurgija*, cilt 2, no. 55, pp. 200-202, 2016.
- [7] Ö. Tekaslan, N. Gerger ve U. Şeker, «V Bükme Kalıplarında Bakır Sac Malzemelerin Geri Esneme Miktarlarının Tespiti,» *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 23, no. 1, pp. 231-238, 2008.
- [8] İ. Karaağaç ve O. Uluer, «V bükme Prosesinde Geri Esnemeye Etki Eden Proses Parametrelerinin Deneysel Araştırılması,» *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 8, no. 23, pp. 990-993, 2017.

- [9] M. Stefan, N. Gheorghe ve C. Dan, «The Springback Analyse on Sheet Aluminium V Bending Using an Systemic Analysis on Bending Operation,» *New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies*, pp. 178-185,2013.
- [10] B. Gautam, P. Kumar, V. Chandra ve K. Rawat, «Analysis of Springback Variation in V Bending,» *International Journal of Engineering Research & Technology*, pp. 555-561, 2016.
- [11] M. A. Farsi ve B. Arezoo, «Bending Force and Spring-Back in V-Die-Bending of Perforated Sheet Metal Components,» *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, pp. 45-51, 2011.
- [12] E. Uslu, “Sac Malzemelerin Bükülmesinde Geri Yaylanma Davranışının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2014.
- [13] Y. Aslan ve İ. Karağaç, «V Bükmede Geri Esneme Davranışları,» *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, cilt 2, no. 3, pp. 255-263, 2014.
- [14] G. Venkatachalam, S. Narayanan ve C. Sathya Narayanan, «Influence of hole size, hole shape and hole pattern on spring-back effect in perforated sheet metals using FEM,» *International Journal of Engineering Science and Technology*, pp. 2636-2640, 2012.
- [15] Z. Noriega, R. Moreno ve S. Pruneda, «A New Equation to Determine the Springback in the Bending Process of Metallic Sheet,» *ICCES*, pp. 25-30, 2008.
- [16] «EUROPERF,» 2017. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.euoperf.org/why-perforated-metal/applications/food-processing-industry/>. [Erişildi: 20 05 2019].
- [17] «The Advantages of Perforated Metals,» 2017. [Çevrimiçi]. Available: <https://euoperf.org/wp-content/uploads/2015/09/THE-ADVANTAGES-OF-PERFORATED-METALS.pdf>. [Erişildi: 20 05 2019].

- [18] S.R. Reid, *Metal Forming and Impact Mechanics*, Exeter: Pergamon Press, 1985.
- [19] K. Lange, *Handbook of Metal Forming*, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1985.
- [20] M. E. Bakanlığı, *Makina Teknolojisi, Bükme Kalıpları*, Ankara: MEB, 2013.
- [21] J. L. Duncan, Z. Marciniak ve S. J. Hu, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Oxford: Butterworth Heinemann, 2002.
- [22] J. F. Wang, R. H. Wagoner, W. D. Carden, D. K. Matlock ve F. Barlat, «Creep and Anelasticity in the Springback of Aluminum,» *International Journal of Plasticity*, no. 20, pp. 2209-2232, 2002.
- [23] B. A. Chirita, «Control of Springback in Sheet Metal U Bending Through Design Experiment,» *Numiform*, Porto, 2007.
- [24] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing*, Pensilvanya: John Wiley & Sons INC, 2007.
- [25] H. K. Yi, D. W. Kim, C. J. Van Tyne ve Y. H. Moon, «Analytical Prediction of Springback Based on Residual Differential Strain During Sheet Metal Bending,» *Journal of Mechanical Engineering Sciences* , cilt C, no. 222, pp. 117-129, 2008.
- [26] P. Chen ve M. Koç, «Simulation of Springback Variation in Forming of Advanced High Strength Steels,» *Journal of Materials Processing Technology*, no. 190, pp. 189-198, 2007.
- [27] L. Wei, Y. Yuying, X. Zhongwen ve Z. Lihong, «Springback Control of Sheet Metal Forming Based on the Response Surface Method and Multi Objective Genetic Algorithm,» *Material Science and Engineering* , cilt A, no. 499, pp. 325-328, 2009.

- [28] H. Livatyalı ve T. Altan, «Prediction and Elimination of Springback in Straight Flanging Using Computer Aided Design Methods,» *Journal of Materials Processing Technology*, cilt 2, no. 117, pp. 262-268, 2001.
- [29] S. G. Racz, S. Khan, H. Chalal, F. Abed-Meraim ve B. Tudor, «Prediction of Springback After Draw-Bending Test Using Different Material Models,» *International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies*, pp. 419-424, 2010.
- [30] S. B. Chikalthankar, G. D. Belurkar ve V. M. Nandedkar, «Factors Affecting on Springback in Sheet Metal Bending,» *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, cilt 3, no. 4, pp. 247-251, 2014.
- [31] Q. Zheng, T. Aoyama, T. Shimizu ve M. Yang , «Experimental and Numerical Analysis of Springback Behaviour Under Elevated Temperature in Micro Bending Assisted by Resistance Heating,» *International Conference on Technology of Plasticity*, Nagoya, 2014.
- [32] Y. Moon, S. Kang, J. Cho ve T. Kim, «Effect of Tool Temperature on the Reduction of the Springback of Aluminum Sheets,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 365-368, 2003.
- [33] H. S. Kim ve M. Koç, «Numerical Investigations on Springback Characteristics of Aluminum Sheet Metal Alloys in Warm Forming Conditions,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 370-383, 2008.
- [34] R. Srinivasan, P. Padmanabhan ve D. Vasudevan, «Influence of Friction Parameters on Springback and Bend Force in Air Bending of Electrogalvanised Steel Sheet: An Experimental Study,» *Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* , 2013.
- [35] I. Burchitz, Springback: improvement of its predictability, Twente: Netherlands Institute for Metals Research, 2005.

- [36] A. Forcellese, L. Fratini, F. Gabrielli ve F. Micari, «The Evaluation of Springback in 3D Stamping and Coining Processes,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 108-112, 1998.
- [37] H. Y. Yu, «Variations of Elastic Modulus during Plastic Deformation and Its Influence on Springback,» *Naterials and Design*, pp. 846-850, 2009.
- [38] S. K. Patel, R. K. Lal, J. Dwivedi ve V. Singh, «Springback Analysis in Sheet Metal Forming Using Modified Ludwik Stress-Strain Relation,» *ISRN Mechanical Engineering*, p. 11, 2013.
- [39] A. Mkaddem ve D. Saidane, «Experimental Approach and RSM Procedure on the Examination of Springback in Wiping Die Bending Processes,» *Journal of Materials Processing Technology* , pp. 325-333, 2007.
- [40] W.-A. Wan-Nawang, Y. Qin ve X. Liu, «An Experimental Study on the Springback in Bending of W Shaped Micro Sheet Metal Parts,» %1 içinde *MATEC Web of Conferences*, 2015.
- [41] C. K. Patel ve A. H. Gandhi, «Bauschinger Effect in Springback Prediction of High Strength Steel: A Theoretical Approach,» *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, pp. 689-695, 2018.
- [42] V. Gautam, R. Shukla, J. Singh ve D. R. Kumar, «Effect of Grain Size on Springback in V Bending of Interstitial Free Steel,» %1 içinde *Recent Advances in Mechanical Engineering* , Delhi, 2016.
- [43] J. E. Schey, *Introduction to Manufacturing Processes*, New York: McGraw-Hill, 1987.

[44] K. Lawanwong, H. Hamasaki, R. Hino ve F. Yosida, «A Novel Technology to Eliminate U Bending Springback of HSS Sheet by Using Additional Bending with Counter Punch,» *Procedia Engineering*, cilt 81, pp. 957-962, 2014.

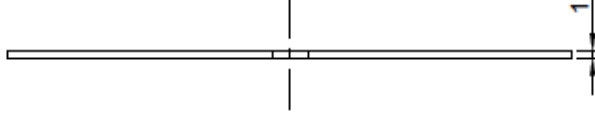
[45] T. Gülmez, «İmal Usulleri,» İTÜ Makina Fakültesi, İstanbul, 2011.



EKLER

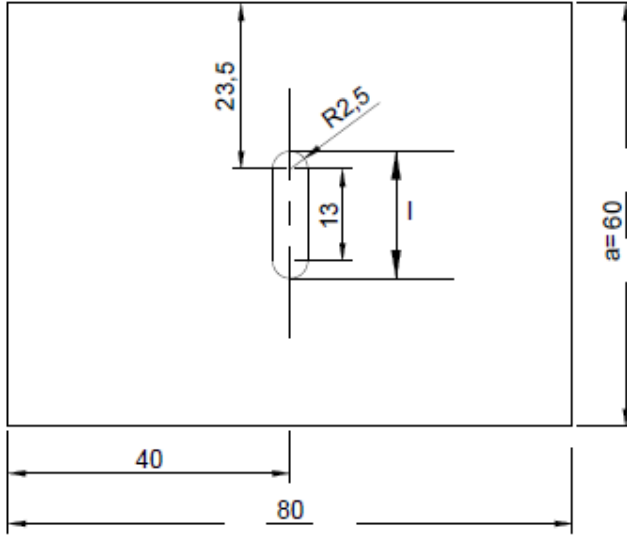


EK 1: %30 DELİK ORANINA SAHİP SAC PARÇANIN TEKNİK RESMİ

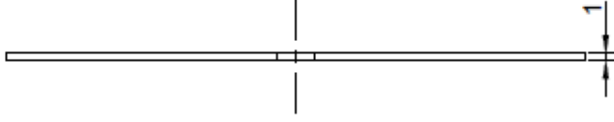


Kalınlıklar 1, 1,5 ve 2mm'dir.

$$l/a = 18/60$$

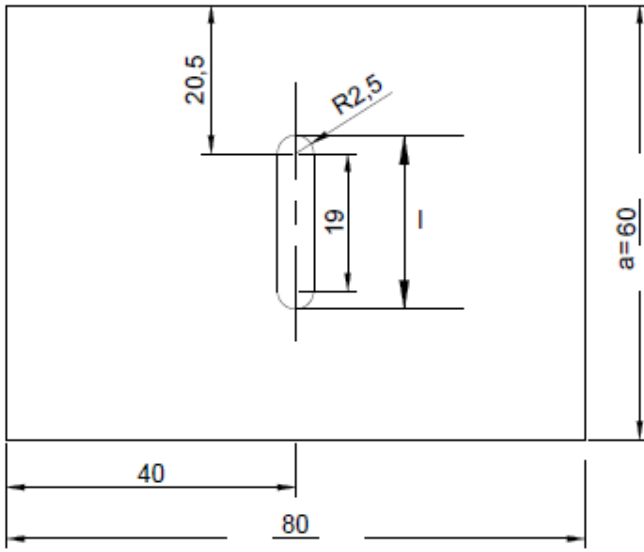


EK 2: %40 DELİK ORANINA SAHİP SAC PARÇANIN TEKNİK RESMİ

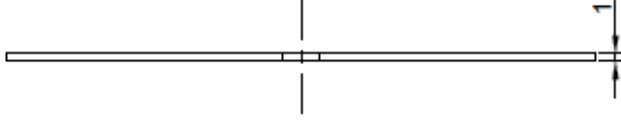


Kalınlıklar 1, 1,5 ve 2mm'dir.

$$l/a = 24/60$$

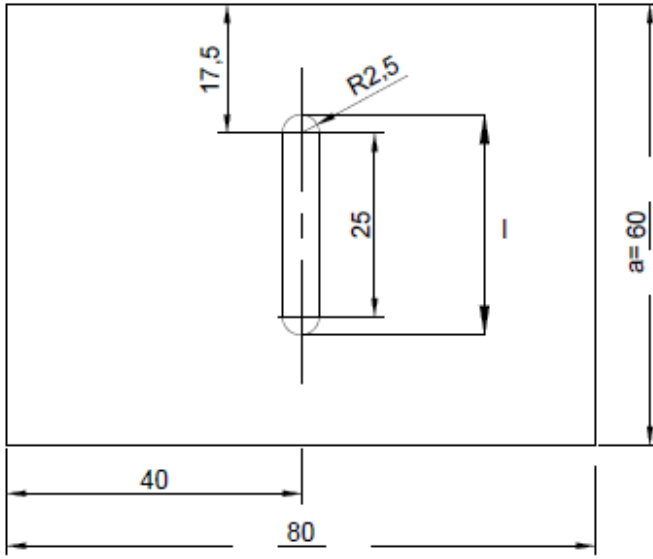


EK 3: %50 DELİK ORANINA SAHİP SAC PARÇANIN TEKNİK RESMİ

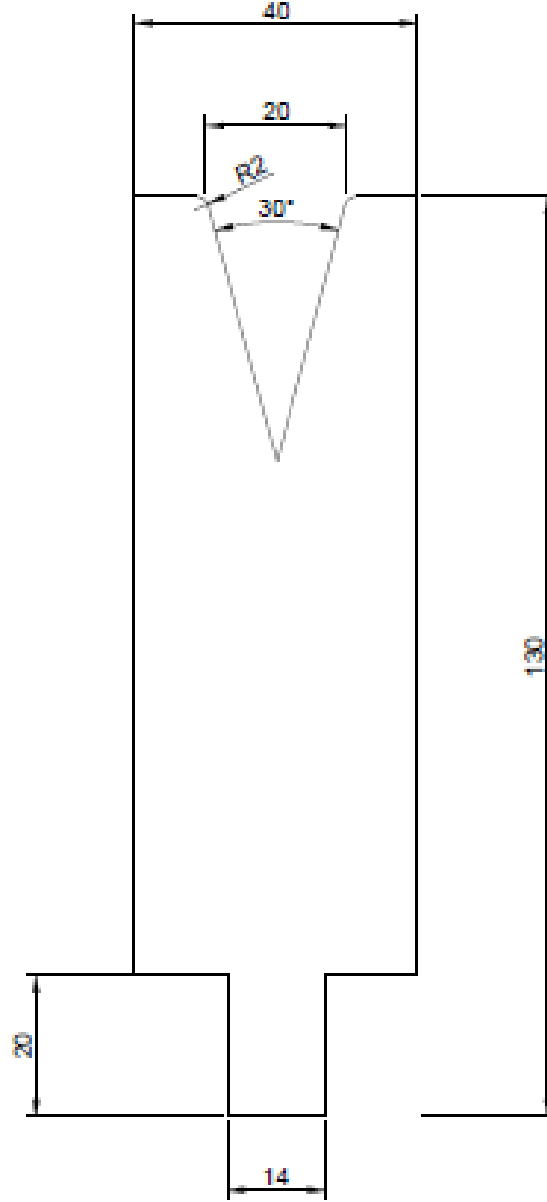


Kalınlıklar 1, 1,5 ve 2mm'dir.

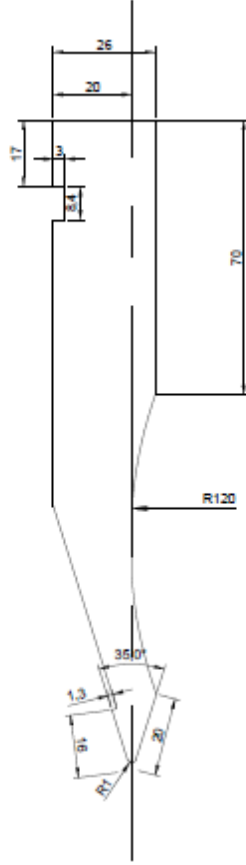
$l/a = 30/60$



EK 4: V BÜKME İŞLEMİNDE KULLANILAN KALIBIN TEKNİK RESMİ



EK 5: V BÜKME İŞLEMİNDE KULLANILAN ZIMBANIN TEKNİK RESMİ



**EK 6: KALINLIĞI 1MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 60 DERECE V
BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AĞI DEĞERLERİ**

	1.numune	2.numune	3.numune	4.numune	5.numune
Deliksiz	65,12	65,25	65,31	64,96	65,09
%30 delik oranı	64,55	64,79	64,64	64,83	64,91
%40 delik oranı	63,41	63,24	63,45	63,28	63,19
%50 delik oranı	62,83	62,87	62,63	62,72	62,98



**EK 7: KALINLIĞI 1MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 90 DERECE V
BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AĞI DEĞERLERİ**

	1.numune	2.numune	3.numune	4.numune	5.numune
Deliksiz	93,26	93,87	93,72	93,93	93,78
%30 delik oranı	92,67	92,52	92,79	92,64	91,71
%40 delik oranı	92,46	92,28	91,89	92,11	92,03
%50 delik oranı	91,77	91,92	91,83	91,79	91,92



EK 8: KALINLIĞI 1MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 120 DERECE V BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AĞI DEĞERLERİ

	1.numune	2.numune	3.numune	4.numune	5.numune
Deliksiz	122,35	122,76	122,91	122,49	122,63
%30 delik oranı	121,68	121,79	121,29	121,38	121,42
%40 delik oranı	120,64	120,48	120,55	120,21	120,43
%50 delik oranı	119,92	119,79	120,14	120,33	119,65



**EK 9: KALINLIĞI 1,5 MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 60 DERECE V
BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AĞI DEĞERLERİ**

	1.numune	2.numune	3.numune	4.numune	5.numune
Deliksiz	64,89	64,75	64,63	64,67	64,91
%30 delik oranı	64,23	64,39	64,38	64,27	64,19
%40 delik oranı	63,01	62,78	62,89	62,82	63,24
%50 delik oranı	62,56	62,45	62,67	62,12	62,31



**EK 10: KALINLIĞI 1,5 MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 90 DERECE V
BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AĞI DEĞERLERİ**

	1.numune	2.numune	3.numune	4.numune	5.numune
Deliksiz	92,53	92,72	92,49	92,55	92,87
%30 delik oranı	91,75	91,92	91,69	91,78	91,85
%40 delik oranı	91,75	91,25	91,50	91,45	91,25
%50 delik oranı	91,19	91,35	91,15	91,32	91,21



**EK 11: KALINLIĞI 1,5 MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 120 DERECE V
BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AĞI DEĞERLERİ**

	1.numune	2.numune	3.numune	4.numune	5.numune
Deliksiz	120,92	120,97	120,85	120,89	120,97
%30 delik oranı	120,19	120,37	120,31	120,22	120,35
%40 delik oranı	119,82	119,86	119,94	119,97	119,95
%50 delik oranı	119,54	119,59	119,38	119,38	119,34



EK 12: KALINLIĞI 2MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 60 DERECE V BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AĞI DEĞERLERİ

	1.numune	2.numune	3.numune	4.numune	5.numune
Deliksiz	63,76	63,89	63,81	63,87	63,72
%30 delik oranı	63,54	63,45	63,34	63,67	63,74
%40 delik oranı	62,79	62,41	62,87	62,54	62,75
%50 delik oranı	62,25	62,15	62,11	62,21	62,17



EK 13: KALINLIĞI 2MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 90 DERECE V BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AĞI DEĞERLERİ

	1.numune	2.numune	3.numune	4.numune	5.numune
Deliksiz	91,63	91,87	91,85	91,82	91,78
%30 delik oranı	91,47	91,42	91,27	91,46	91,89
%40 delik oranı	91,15	91,09	91,23	91,29	91,35
%50 delik oranı	91,07	91,13	91,17	91,11	91,01



**EK 14: KALINLIĞI 2MM OLAN 5 DKP SAC NUMUNESİNİN 120 DERECE V
BÜKÜLMESİ SONUCUNDA OLUŞAN BÜKME AĞI DEĞERLERİ**

	1.numune	2.numune	3.numune	4.numune	5.numune
Deliksiz	120,38	120,32	120,45	120,36	120,23
%30 delik oranı	120,12	120,25	119,73	119,87	119,65
%40 delik oranı	119,59	119,62	119,75	119,51	119,43
%50 delik oranı	119,35	119,44	119,26	119,19	119,21

