

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FARKLI KALINLIKLARDAKİ DKP VE PASLANMAZ SAÇLARIN FARKLI
AÇILARDA YAPILAN V-BÜKME İŞLEMİNDEKİ GERİ
YAYLANMALARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali İŞIKTAŞ

Balıkesir, Temmuz-2011

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FARKLI KALINLIKLARDAKİ DKP VE PASLANMAZ SAÇLARIN FARKLI
AÇILARDA YAPILAN V-BÜKME İŞLEMİNDEKİ GERİ
YAYLANMALARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali İŞİKTAŞ

Balıkesir, Temmuz – 2011

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FARKLI KALINLIKLARDAKİ DKP VE PASLANMAZ SAÇLARIN FARKLI
AÇILARDA YAPILAN V-BÜKME İŞLEMİNDEKİ GERİ
YAYLANMALARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali İŞIKTAŞ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İrfan AY (BAÜ)

Sınav Tarihi : 21.07.2011

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. İrfan AY (Danışman-BAÜ)

Yrd. Doç. Dr. Hayrettin YÜKSEL (BAÜ)

Yrd. Doç. Dr. A.Deniz KARAOĞLAN (BAÜ)

Enstitü Yönetim Kurulunun tarih sayılı oturumunun
nolu kararı ile Mezun olmuştur.

Balıkesir, Temmuz -2011

Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 2011/44 nolu proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

FARKLI KALINLIKLARDAKİ DKP VE PASLANMAZ SAÇLARIN FARKLI AÇILARDA YAPILAN V-BÜKME İŞLEMİNDEKİ GERİ YAYLANMALARININ İNCELENMESİ

Ali İŞIKTAŞ

**Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**(Yüksek Lisans Tezi / Tez Danışmanı: Prof.Dr. İrfan AY)
Balıkesir, Temmuz-2011**

Sac malzemelerin şekillendirilmesinde karşılaşılan en büyük problemlerden birisi de geri esnemedir. Malzemede oluşan geri esneme istenilen ölçülerin değişmesine yol açar bu da istenilmeyen bir olaydır. Kalıptan çıkacak parçanın istenilen tolerans sınırları içinde olması için bükme kalıplarında bükülen malzemelerin geri esneme miktarlarının bilinmesi bu yüzden çok önemlidir. Geri esnemeyi ve geri esnemenin nihai parça geometrisine etkilerini minimize etmek için çeşitli yöntemlerden yararlanılmaktadır. Bu yöntemler; fazladan bükme, gererek bükme, ters bükme, vs. şeklinde sıralanabilir. Bütün bu yöntemler zaman ve maliyet kaybına sebep olduğu için böyle bir çalışma yapılmıştır.

Bu çalışmada, V bükme kalıplarında geri esnemenin deneysel olarak tespiti araştırılmıştır. Geri esneme miktarlarının belirlenebilmesi için bir V bükme kalıbı tasarlanarak, deney malzemesi olarak DKP ve Paslanmaz sac malzemesi kullanılmıştır. Deney numuneleri 30x60 mm ebatlarında olup ve kalınlıkları 1 mm, 1.5 mm ve 2 mm olarak seçilmiştir. Numuneler 60, 90 ve 120 derece olan kalıp açılarında ve her açı da 2 ve 6 mm olan farklı zımba radyüs değerleri kullanılarak bükme yapılmıştır. Geri esneme deneylerinde her parametre için 5 er adet numune bükülerek test yapılmıştır. Deney sonrası bükülmüş olan numunelerin geri

esnemeleri açı ölçer ve optik projeksiyon cihazı kullanılarak ölçülmüş olup sonuçlar grafiklerle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, deneylerden çıkan geri esneme değerlerinin yapılacak olan bükme kalıplarının tasarımına ışık tutacağı düşünülmüş ve geri esneme probleminin kısmen ortadan kaldırmasına çalışılmıştır.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: V bükme / geri esneme / bükme açısı / kalınlık / zımba radyüsü.

ABSTRACT

EXAMINING THE SPRINGBACK OF DKP AND STAINLESS STEEL SHEETS WITH DIFFERENT THICKNESS IN THE V-BENDING PROCESS CARRIED OUT IN DIFFERENT ANGLES

Ali İŞIKTAŞ

**Balıkesir University, Institute of Science,
Department of Mechanical Engineering**

(M.S.Thesis / Supervisor : Prof.Dr.İrfan AY)

Balıkesir, July - 2011

One of the biggest problems in forming sheet metals is to springback. Springback which occurs in material causes to change of the necessary measures and this is an unwanted event. It is vital to know that springback quantity of bending materials in V bending mould so as to be the piece in tolerance limits. There are various methods that are benefited in order to minimize the effects of springback to final piece geometry. These methods are ordered such as over bending, bending in tension and reverse bending. Since all these methods cause lose of time and cost, this work was made.

In this work, the evaluation of springback in V bending mould was empirically researched. In order to determine the quantity of springback, a V bending mould was designed, DKP and Stainless steel was used as test equipment. Test specimens are 30 x 60 mm and their thicknesses are 1 mm, 1.5 mm and 2 mm. The specimens are in 60, 90 and 120 mould angle and they were bended by using 2 and 6 mm different punch radius rate in every angle. In springback tests, test was made by bending 5 specimens for every parameter. After the test, springbacks of the specimens that were bended was measured by using protractor and optical projection device. The results were compared with the graphics. As a result, the rates of

springbacks in the tests can set light to design of bending moulds and it was tried to remove the problem of springback.

KEY WORDS: V bending / springback / bending angle / thickness / punch radius

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| ÖZET | ii |
| ABSTRACT | iv |
| İÇİNDEKİLER | vi |
| ŞEKİL LİSTESİ | ix |
| TABLO LİSTESİ | xi |
| SEMBOL LİSTESİ | xii |
| ÖNSÖZ | xiii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI | 2 |
| 3. SAC BÜKME | 4 |
| 3.1 Bükme İşleminin Tanımlanması | 4 |
| 3.2 Bükme İşlem Çeşitleri | 4 |
| 3.2.1 V Bükme | 7 |
| 3.2.2 Kenar Bükme | 8 |
| 3.2.3 Serbest Bükme İşlemi | 9 |
| 3.3 Bükmeye Etki Eden Faktörler | 10 |
| 3.4 Malzemenin Davranışı | 11 |
| 4. GERİ YAYLANMA | 12 |
| 4.1 Geri Yaylanmanın Telafisi | 14 |
| 4.2 Geri Yaylanma Davranışını Etkileyen Parametreler | 16 |
| 4.2.1 Kalınlık | 16 |
| 4.2.2 Bükme Radyüsü | 17 |
| 4.2.3 Kalıp Açıklığı | 19 |
| 4.2.4 Baskı Plakası Kuvveti | 21 |
| 4.2.5 Anizotropi | 22 |
| 4.2.6 Bauschinger Etkisi | 25 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.7 Akma Dayanımı | 27 |
| 4.2.8 Elastiklik Modülü | 28 |
| 4.2.9 Sıcaklık | 29 |
| 4.2.10 Sürtünme | 30 |
| 4.2.11 Şekillendirme Hızı | 30 |
| 4.2.12 Pekleşme Üsteli | 31 |
| 4.2.13 Tane Boyutu | 31 |
| 5. V BÜKME KALIP TASARIMI | 33 |
| 5.1 Bükme Yarıçapı | 33 |
| 5.2 V Bükme Kalıp Açıklığının Hesabı | 34 |
| 5.3 V bükme Kuvvetinin Hesabı | 35 |
| 5.4 V Bükme Kalıbı Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar | 37 |
| 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR | 39 |
| 6.1 V Bükme Deney Numuneleri | 39 |
| 6.2 Deney Tasarımı ve V Bükme Deneyleri | 41 |
| 6.3 V Bükme Kalıbı ve Deneyi | 42 |
| 6.4 Deneyin Yapılışı | 44 |
| 6.5 Kalıp Değişkenleri | 46 |
| 6.6 Açı Ölçümleri | 47 |
| 7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA | 48 |
| 7.1 Geri Esneme Değerleri | 48 |
| 7.2 Geri Esneme Değerlerinin Grafiklerle Karşılaştırılması | 51 |
| 7.2.1 1 mm DKP Sacta Oluşan Geri Esneme Değerlerinin Karşılaştırılması | 51 |
| 7.2.2 1,5 mm DKP Sacta Oluşan Geri Esneme Değerlerinin Karşılaştırılması | 52 |
| 7.2.3 2 mm DKP Sacta Oluşan Geri Esneme Değerlerinin Karşılaştırılması | 53 |
| 7.2.4 1 mm Paslanmaz Sacta Oluşan Geri Esneme Değerlerinin Karşılaştırılması | 54 |
| 7.2.5 1,5 mm Paslanmaz Sacta Oluşan Geri Esneme Değerlerinin Karşılaştırılması | 55 |

| | |
|--|----|
| 7.2.6 2 mm Paslanmaz Sacta Oluşan Geri Esneme Değerlerinin Karşılaştırılması | 56 |
| 8. GENEL SONUÇLAR | 57 |
| KAYNAKLAR | 59 |
| EKLER | 63 |
| EK A.1 Kalıp Montajı | 63 |
| EK A.2 Kalıp Elemanları | 64 |
| EK A.3 Alt Plaka | 65 |
| EK A.4 Üst Plaka | 66 |
| EK A.5 Kalıp Yataklama Burcu | 67 |
| EK A.6 Kalıp Yataklama Mili | 68 |
| EK A.7 Pres Muylusu | 69 |
| EK A.8 Zimba | 70 |
| EK A.9 Dişi Kalıp | 71 |

ŞEKİL LİSTESİ

| <u>Şekil</u> <u>Numarası</u> | <u>Adı</u> | <u>Sayfa</u> |
|---------------------------------|--|--------------|
| Şekil 3.1 | Bükme işlem çeşitleri-1 | 4 |
| Şekil 3.2 | Bükme işlem çeşitleri-2 | 5 |
| Şekil 3.3 | Bükme işlem çeşitleri-3 | 6 |
| Şekil 3.4 | Bükme işlem çeşitleri-4 | 6 |
| Şekil 3.5 | V Bükme işlem operasyonu | 7 |
| Şekil 3.6 | Kenar bükme işlemi operasyonu | 8 |
| Şekil 3.7 | Serbest bükme operasyonu | 9 |
| Şekil 3.8 | Serbest bükme operasyonu kesitleri | 9 |
| Şekil 3.9 | Rijit plastik model | 10 |
| Şekil 3.10 | Malzeme modelleri | 11 |
| Şekil 4.1 | Sünek bir metaldeki geri yaylanmanın akma diyagramı üzerinde gösterilişi | 12 |
| Şekil 4.2 | Bükülen bir sac kesiti üzerinde geri yaylanmanın gösterimi | 13 |
| Şekil 4.3 | Bükme ve çekme etkisindeki bir sac kesitindeki plastik uzama bölgesinin dış yüzeyden iç yüzeye doğru $(1-\eta)s$ derinliğinde dağılımı | 14 |
| Şekil 4.4 | Bükmenin sebep olduğu molekül hareketleri | 14 |
| Şekil 4.5 | Düz kenar bükmede karşılaşılan kalıp açıklığı | 19 |
| Şekil 4.6 | Artan kalıp açıklığı nedeniyle daha küçük açı değerinde gerçekleştirilen bükme işlemi | 20 |
| Şekil 4.7 | Haddeye paralel ve haddeye dik bükme geometrilerinde bükülebilirliğin karşılaştırılması | 24 |
| Şekil 4.8 | Konkav ve konveks bükme | 25 |
| Şekil 4.9 | Bauschinger etkisinde akma dayanımında meydana gelen düşüş | 27 |
| Şekil 4.10 | Elastiklik modülünün plastik deformasyonla değişimi | 29 |
| Şekil 4.11 | Pirinç malzemede tane boyutu küçüldükçe geri yaylanmada meydana gelen azalma | 32 |
| Şekil 5.1 | V bükme | 33 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Şekil 5.2 | Kalıp köşesine verilmesi gereken yarıçap | 34 |
| Şekil 5.3 | Kalıp açıklığı diyagramı | 34 |
| Şekil 5.4 | V bükme kalıbında kuvvetler | 35 |
| Şekil 5.5 | V bükmede parametreler | 35 |
| Şekil 5.6 | V bükmede c faktörünün değişimi | 36 |
| Şekil 5.7 | V bükmede kuvvet bileşenleri | 37 |
| Şekil 5.8 | Bükme kalıbının boyutları | 38 |
| Şekil 6.1 | Bükülmüş numune örnekleri | 40 |
| Şekil 6.2 | Bükme deneylerinin gerçekleştiği pres | 41 |
| Şekil 6.3 | V bükme işlemi için tasarlanan kalıp modeli | 43 |
| Şekil 6.4 | V bükme kalıbı | 43 |
| Şekil 6.5 | Bükme işlemi | 45 |
| Şekil 6.6 | Kalıp değişkenleri | 46 |
| Şekil 6.7 | Soldan sağa 60°, 90° ve 120° kalıp açlarına sahip kalıplar | 46 |
| Şekil 6.8 | Optik projeksiyon cihazı | 47 |
| Şekil 7.1 | 1 mm DKP Sacta oluşan geri esneme değerleri | 51 |
| Şekil 7.2 | 1.5 mm DKP Sacta oluşan geri esneme değerleri | 52 |
| Şekil 7.3 | 2 mm DKP Sacta oluşan geri esneme değerleri | 53 |
| Şekil 7.4 | 1 mm Paslanmaz Sacta oluşan geri esneme değerleri | 54 |
| Şekil 7.5 | 1.5 mm Paslanmaz Sacta oluşan geri esneme değerleri | 55 |
| Şekil 7.6 | 2 mm Paslanmaz Sacta oluşan geri esneme değerleri | 56 |

TABLO LİSTESİ

Tablo

| <u>Numarası</u> | <u>Adı</u> | <u>Sayfa</u> |
|------------------------|---|---------------------|
| Tablo 5.1 | Bükme kalıbı boyutları | 38 |
| Tablo 6.1 | Deney parametreleri | 39 |
| Tablo 7.1 | 2 mm zımba radyüsü ile bükülen farklı kalınlıklardaki DKP sac malzemelerin bükme açıları ve büküm sonrası geri esneme değerleri | 48 |
| Tablo 7.2 | 6 mm zımba radyüsü ile bükülen farklı kalınlıklardaki DKP sac malzemelerin bükme açıları ve büküm sonrası geri esneme değerleri | 49 |
| Tablo 7.3 | 2 mm zımba radyüsü ile bükülen farklı kalınlıklardaki Paslanmaz sac malzemelerin bükme açıları ve büküm sonrası geri esneme değerleri | 49 |
| Tablo 7.4 | 6 mm zımba radyüsü ile bükülen farklı kalınlıklardaki Paslanmaz sac malzemelerin bükme açıları ve büküm sonrası geri esneme değerleri | 50 |

SEMBOL LİSTESİ

| <u>Sembol</u> | <u>Adı</u> |
|-----------------|--|
| R_p, r_i | Zımba yarıçapı |
| R_d | Kalıp yarıçapı |
| θ | Bükme öncesi ölçülen açı |
| θ' | Bükme sonrası ölçülen açı |
| n | Pekleşme üsteli |
| ε | Şekil değiştirme |
| K | Geri esneme oranı |
| ε_w | Genişlikte meydana gelen birim şekil değişimi |
| ε_t | Kalınlıkta meydana gelen birim şekil değişimi |
| ε_p | Plastik birim şekil değişimi |
| E | Elastiklik modülü |
| σ_y | Akma dayanımı |
| W | Kalıp açıklığı |
| s, t | Sac kalınlığı |
| r_m | Kalıp köşe radyüsü |
| M_b | Eğme momenti |
| P_1 | Kalıp yan yüzeylerinde meydana gelen reaksiyon kuvveti |
| c | Düzeltilme katsayısı |
| b | Sac genişliği |
| P_e | Bükme sonundaki kuvvet |
| T | Kalıp kalınlığı |
| P_b | Bükme kuvveti |
| σ_f | Akma gerilmesi |
| \bar{R} | Ortalama anizotropi değeri |

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanması sürecinde gerek mesleki, gerekse meslek dışı değerli birikimi ile bana destek olan, yardımlarını esirgemeyen ve her konuda bana yol gösteren saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. İrfan AY'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deney düzeneğinin kurulmasında ve deneysel çalışmalar esnasında desteklerinden dolayı Eğinlioğlu Zincir Sanayi A.Ş. Ar-Ge ve Talaşlı İmalat Sorumlusu Sayın Hasan ATEŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Tüm yaşamım boyunca beni destekleyen, en zor anlarımda yanımda olan ve mesleki yaşantımı oluşturan bu süreçte bana yol gösteren babama, anneme ve kardeşim Memnune ZEYBEK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ali IŞIKTAŞ – Balıkesir 2011

1. GİRİŞ

Şekillendirilmiş sac malzemelerin endüstrideki kullanım alanları oldukça geniştir. Etrafımıza baktığımızda araçların gövdelerinde, tıbbi cihazlarda, mutfak eşyalarında, beyaz eşyalarda birçok parçanın soğuk sac şekillendirme ile elde edildiğini görmekteyiz. Bütün bu ürünlerde kalıpsal ürünü ortaya koymak ne kadar önemli ise düşük maliyetli, daha hızlı ve daha düzgün kalıp üretmekte o kadar önemlidir. Bükme kalıplarının yapım aşamasında istediğimiz ürünü elde edebilmek için kalıp üzerinde birçok işlem gerçekleştirilir. İstenilen ölçünün elde edilebilmesi için birçok defa kalıp sökülür tezgâha bağlanır. Bu işlemler zaman kaybına, maliyete, işçilik kaybına ve bunun gibi olumsuz yönde üretimimizi etkileyen olumsuz sonuçları ortaya çıkarmaktadır. Bu yapılan işlemler ise deneysel ve çok maliyetli yöntemlerdir. Bu tezde, bu soruna yönelik olarak endüstride kullanılan sac parçaların kalıplarla imalatı esnasında karşılaşılan geri esneme problemi incelenmiştir. Sac şekillendirmeyi metot olarak birçok yöntem kapsamaktadır. En çok kullanılan bükme yöntemleri V bükme, U bükme, kenar bükme, serbest bükme çeşitleridir. Bu çalışmada konu alınan V bükme de parça üzerine kuvvet uygulanarak bükme işlemi yapılır. Bükme işleminin sonunda uygulanan kuvvetin kalkmasıyla deformasyona uğrayan malzeme, bir miktar geri esneyerek istenilen formdan uzaklaşmaktadır. Malzemede oluşan bu geri esneme, istenilen ölçülerin değişmesine yol açar bu da istenilmeyen bir olaydır. Böyle durumlarda geri esnemeyi telafi edecek şekilde tekrar kalıp hazırlanmak durumunda kalınmaktadır, bu da ayrı zaman ve maliyet anlamına gelir. Bu nedenle oluşacak geri esnemeyi daha önceden tahmin etmek zaman ve maliyet açısından önemli kazançlar sağlar.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Son yıllarda yapılan araştırmalarda, geri esnemenin sac metal endüstrisinde önemli bir kavram olduğu ve nasıl önlenebileceği incelenmektedir. Yapılan araştırmalarda geri esnemenin önceden bilinmesi ve kalıp tasarımı yapılırken bu geri esneme değeri dikkate alınarak kalıp hazırlanması gerektiği ifade edilmiştir. Bu tez çalışması esnasında uygulanan yöntemler incelendiğinde malzeme, kalınlık, bükme açısı ve bükme radyüsünün geri esnemeye nasıl etki ettiğinin gözlemlenmesi ve deneylerle incelenmesine çalışılmıştır. Çıkan sonuçlarla oluşan geri esnemeyi görüp buna göre kalıp hazırlanması hem zaman hem de maliyet açısından önemli bir kazanç sağlayacağı düşünülmüştür.

L.J. de Vin, A.H. Streppel, U.P. Singh, H.J.J. Kals (1996) serbest bükme modelinin prosesleri hakkında çalışmışlardır. Sacın serbest bükmedeki hallerini modellemiş ve sacın davranışını deneysel ve matematiksel olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçları birbiriyle karşılaştırarak tablolar halinde kullanılabilirliğini göstermişlerdir.

Sriram ve arkadaşları (1997) sinterlenmiş bakır sacların üzerindeki V bükme prosesinin deneysel ve teoriksel olarak karşılaştırmalarını yapmışlardır.

Samuel (2000) ve Lovell (1999) sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel teknikler kullanarak geri esnemenin tahmini ve saptanmasında çalışmalar yürütmüşlerdir. Elde edilen sonuçların geri esnemenin önceden tahmin edilebilmesi için grafikler halinde incelemişlerdir.

M.Inamdar, P.P. Date, K.Narasimhan (2000) serbest bükmedeki geri esneme değerlerini sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırmışlardır. Elde ettiği sonuçları yapay sinir ağlarında geri yayılım algoritmasını kullanarak tahmine çalışmışlardır. Tahmin

sonuçlarının kullanılabilirliğini kanıtlamışlar ve bükmeye etki eden faktörleri incelemişlerdir.

Wang ve Ç.A. (2002) çalışmalarında malzeme katılma modelinin, serbest V bükme işleminde meydana gelen geri esneme üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

B.Arslan (2004) Al-1050 malzemesinin geri esneme değerlerini deneysel olarak inceleyip Abaqus yazılımında sonlu elemanlar analizi yaparak karşılaştırmış ve geri esneme grafiklerini elde etmiştir. Sonlu elemanların deneysel verilerle uyumluluğunu kanıtlamaya çalışmıştır.

Ling ve Ç.A. (2005) sac parçalar L bükme prosesinde geri esneme analizini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak (ABAQUS programı yardımıyla) incelemişlerdir. Analiz sonucunda geri esnemeyi etkileyen faktörleri kanıtlamışlardır.

M.Luisa Garcia, Roneu ve Joaquim Ciurana (2006) serbest bükmede alüminyum ve paslanmaz çelik için geri esneme değerlerini farklı radyüs ve açılarda elde etmişlerdir. Yapay sinir ağlarında geri yayılım algoritmasını kullanarak tahmini çalışmışlar ve birden fazla yapay sinir ağı modelleyerek birbiriyle karşılaştırmışlardır.

C. Bruni, A. Forcellese, F. Gabrielli, M.Simoncini (2006) A231 magnezyum alaşımının sıcak ve soğuk şekillendirilmiş malzemelerinin serbest bükmedeki geri esnemelerini tespit etmişlerdir. Elde ettiği sonuçları grafiklerle vermişlerdir.

Yukarıda verilen literatür çalışmalar incelendiğinde çalışmaların genelde malzeme, bükme açısı ve kalınlık parametrelerinin deneysel veya sonlu elemanlar yöntemiyle geri esnemeye etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada ise iki farklı malzeme, üç farklı bükme açısı, üç farklı kalınlık ve iki farklı zımba radyüsünün geri yayılma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca deneysel olarak yapılan çalışma verileri grafik ve tablolar halinde karşılaştırılmıştır

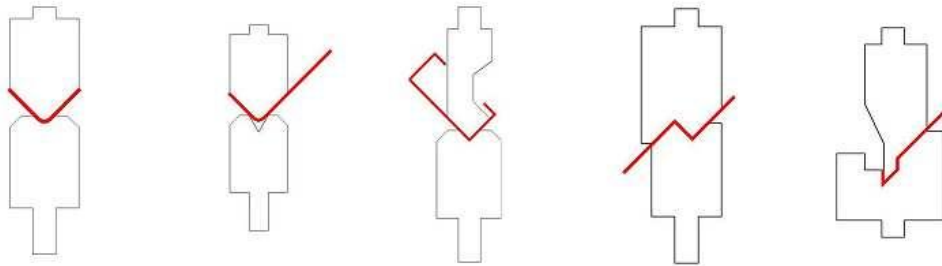
3. SAC BÜKME

3.1 Bükme İşleminin Tanımlanması

Bükme endüstriyel alanlarda özellikle otomotiv ve beyaz eşya sektöründe yaygın olarak sac parçaların şekillendirilme işleminde kullanılmaktadır. Bükme; ısı ile veya ısı olmadan talaş kaldırma işlemi olmadan bir eksen etrafında döndürülmesi işlemidir. Bükme işleminde sacın belirli bir bölgesi deformasyona uğrar. Bu sac parçaya uygulanan kuvvet sonucu, sac basma gerilmesine maruz kaldığında, sac malzemenin eski formuna dönmesi ile sonuçlanır. Basma gerilmesinin aşılmasıyla oluşan akma gerilmesi parça üzerinde plastik deformasyon ve elastik şekil değişimi meydana getirir. Bükme kuvveti, malzemenin gösterdiği karşı dirençten büyük ama kalıbın gösterdiği karşı kuvvetten küçük olmalıdır.

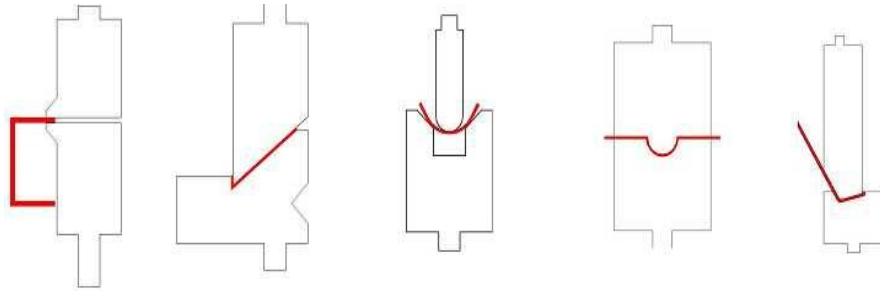
3.2 Bükme İşlem Çeşitleri

Bükme işleminde en çok kullanılan yöntemler V bükme ve U bükmedir. V bükme kendi içinde serbest bükme, kenar bükme, açısal bükme gibi alt gruplara ayrılabilir.



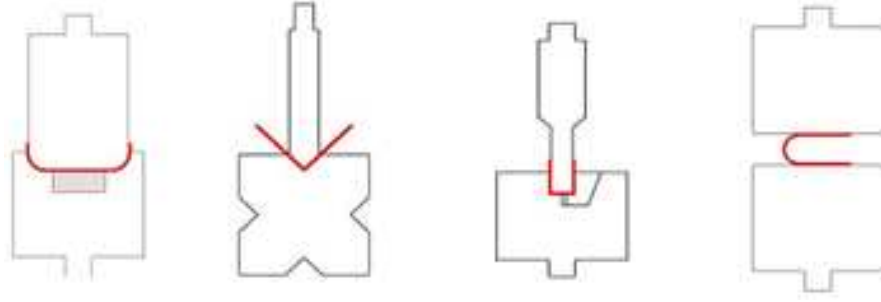
Şekil 3.1 Bükme işlem çeşitleri-1

Genellikle “90°lik V-bükme” kalıbı en çok kullanılanıdır. Bu tip bükme kalıplarına taban (ezme) bükme kalıpları adı verilir. 90°lik V-bükme kalıbında zımba ucu kavis yarıçapı, sac malzeme kalınlığından az olmamalıdır. Çekme gerilimi yüksek malzemelerin 90°lik V-bükme işleminde, zımba ucu kavis yarıçapı büyük alınır. “Dar açılı V-bükme” işlemi genellikle, basınçlı havayla çalışan bükme kalıplarında yapılmaktadır. Bükme açısı önemli değilse, kalıplama işlemi 90° V-bükme kalıbında yapılabilir. “Geri dönüşlü flanş bükme” kalıpları genellikle 90° V-bükme kalıbına benzer, ancak bükme işleminin merkezden dışarıya doğru olması nedeniyle fazla yükleme yapılamamaktadır. “Ofset bükme” kalıbı, iki 90° bükme işlemini bir arada yapabilir. Bu nedenle, bu tip kalıplara ofset bükme kalıpları denir. 90° den büyük bükmelerde kullanılan kalıplara, “Z bükme kalıbı” denir (Şekil 3.1). [1].



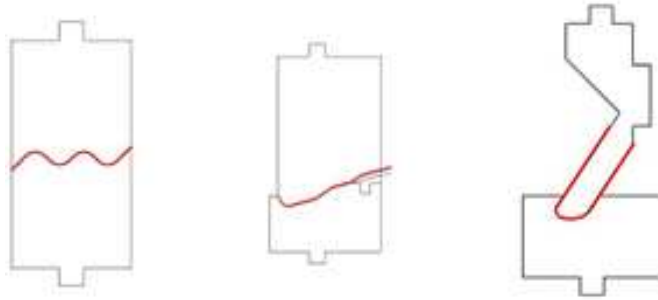
Şekil 3.2 Bükme işlem çeşitleri-2

“Katlama kalıbı” sac malzemelerin kenarlarını birbiri üzerine katlayan kalıptır. Genellikle parça kenarlarında düzgünlük sağlamak ve mukavemet kazandırmak amacıyla katlama işlemi yapılır. “Kavis bükme” kalıbı yarıçapı sac malzeme kalınlığının 4 katından fazla olması gereken bükme işlemlerinde kullanılan kalıplardır. Basit bükme kalıbı genellikle düz sac malzemelere, bazen de ön bükme işlemi yapılacak parçalara uygulanır. “Kıvrırma bükme” kalıbı parça ucunun yuvarlatılması veya halka şeklinde kalıplanması, kıvrırma kalıplarıyla yapılır (Şekil 3.2) [1].



Şekil 3.3 Bükme işlem çeşitleri-3

“Tüp bükme” kalıpları genellikle kıvrırma kalıplarına benzer. Her iki ucu ön bükme kalıplarıyla biçimlendirilen parça, ikinci veya daha fazla kalıplama işlemleriyle tüp şeklinde kalıplayan kalıplara denir. Dört kanallı bükme kalıbı küçük parçaların kısa zamanda ve seri halde kalıplanabilmesi için “çoklu V-bükme” kalıbı kullanılır. Bu tip çoklu V veya U bükme kalıplarına, “kanal bükme” kalıbı denir. Kanal bükme kalıbı genellikle uzun kaz boynu bükme kalıplarıyla yapılır. Kalıplanan parçanın kalıp içerisinden çıkmasını kolaylaştırmak amacıyla itici plâkalı kanal bükme kalıbı kullanılır. U-Bükme kalıbı, kanal bükme kalıbına benzer, ancak geri esneme miktarı bu kalıp da daha fazladır. Geri esneme miktarını gidermek için ikinci bir kalıp da U- bükme miktarı arttırılır (Şekil 3.3) [1].



Şekil 3.4 Bükme işlem çeşitleri-4

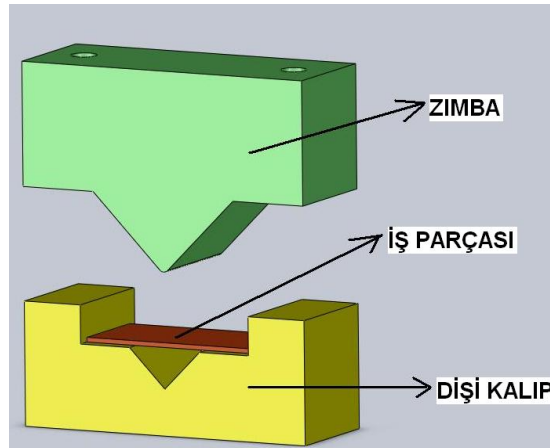
“Oluk bükme” kalıpları genellikle tek veya çok sıralı yapılmaktadır. Bu kalıplarla tek vuruşta bir oluk bükmeden dört oluk bükmeye kadar kalıplama yapılabilmektedir. “Çok profilli bükme” kalıpları değişik konstrüksiyon ve uygulamalara açık kalıplardır. Genellikle bir vuruşta bükme işleminin tamamlanması

gereken çok sayıdaki parçanın bükme işleminde kullanılır. “Pabuç bükme” kalıpları dik konumda kalıplanamayan pabuç ve benzeri parçaların kalıplanmasında kullanılır (Şekil 3.4) [1].

Bükme işlemi günümüzde hidrolik veya mekanik preslerde gerçekleştirilmektedir. Bu preslerde basılacak kalıplar ise alt ve üst kısım olarak prese yerleştirilir. Erkek kalıp, dişi kalıp, zımbadan oluşan kalıplar prese bağlanırken sağlıklı bükme işlemini gerçekleştirebilmek için kalıpların birbirine görme durumları yapılan işin hassasiyeti açısından çok önemli olduğu için, uygun şekilde ekselenmeleri gerekmektedir.

3.2.1 V Bükme

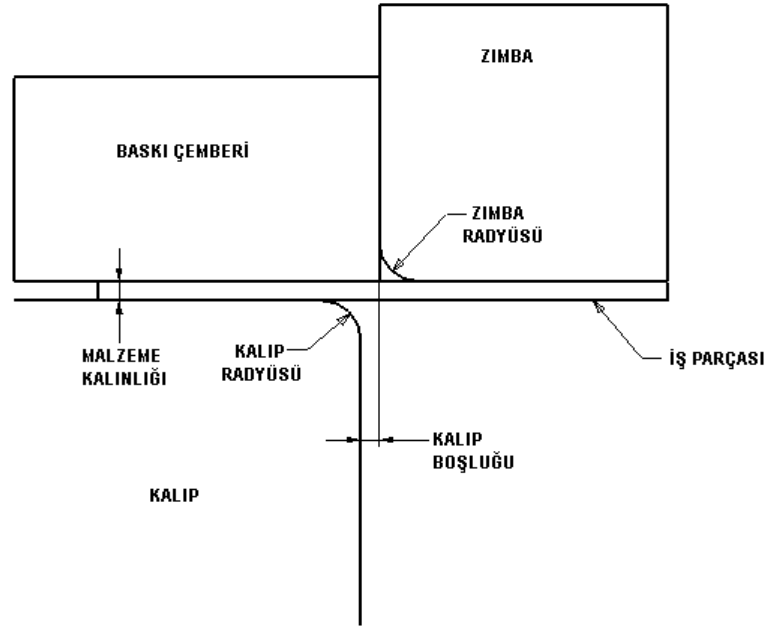
V bükme süresince zımba (ıstamp - erkek kalıp) aşağı doğru inerken ilk olarak desteksiz sac ile temas eder. Zımba iş parçasının merkezinden, malzeme kalınlığı kadar aşağı bastırır. Bu durumda bükme kollarının uçları yukarı esneyerek kalıp radyüsleri etrafında çok az bir miktar hareket ederek reaksiyon gösterirler. Bükme olayı ilerledikçe sürüklenme ve dolayısı ile malzemenin reaksiyonu daha da artmaktadır. Bu durumda kollar bir öncekine göre daha da yukarıya kalkmış bulunmaktadır. Son safhada yalnız zımba ucu değil artık yan yüzeyleri de temas halinde ve zımba parçayı kalıp içine yatırmış durumdadır. Şekil 3,5’ de V bükme olayı yer almıştır.



Şekil 3.5 V Bükme operasyonu

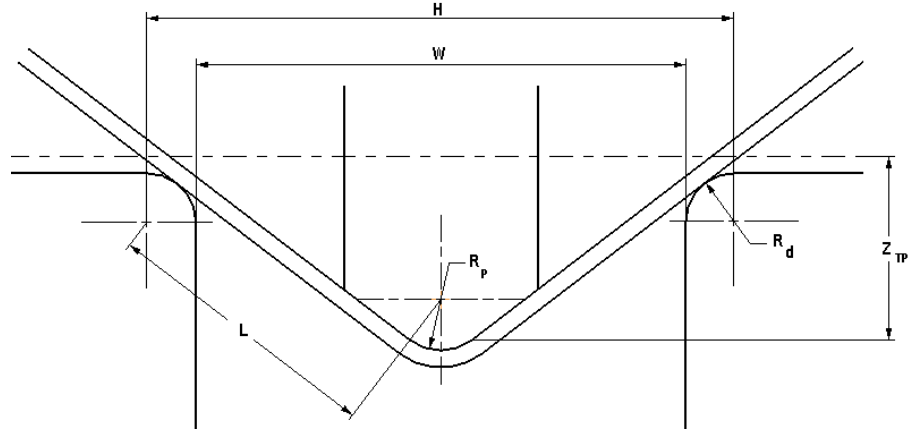
3.2.2 Kenar Bükme

Kenar bükme metodunda sac baskı çemberi tarafından sabit pozisyonda tutulur. Şekillendirici ıstampaya aşağı doğru inerek sacı şekillendirir. Bükülecek sacın uzunluğu sacın diğer kısımlarına nazaran çok kısa ise bu tip bükme tercih edilir. Şekil 3.6’da görüldüğü üzere kalıp yarıçapı, zimba yarıçapı, kalıp ve zimba arasındaki boşluk ise sacın kalınlığıdır [2].



Şekil 3.6 Kenar bükme işlemi operasyonu

3.3 Bükmeye Etki Eden Faktörler



Şekil 3.9 Rijit plastik model

Bükme işleminde sacın dış yüzeyindeki lifler uzayarak çekme gerilmesi oluşturmakta, iç kısmında ise lifler kısalarak basmaya zorlanmaktadır. Böylelikle bükülen malzemenin iç kısmında basma gerilmeleri, dış kısmında da çekme gerilmeleri meydana gelmektedir.

Bükülen kısımda her hangi bir ezilmeden dolayı veya normal şartlar altında sac kalınlığının değişmediği kabul edilirse nötr eksen sacın ağırlık noktasından geçer. Bu eksen çekmeye ve basmaya zorlanan kısımları ayırır. Nötr ekseninde bir değişiklik olmadığından dolayı bu eksenindeki lif uzunluğu değişmediği kabul edilir [3].

Bükülen malzemenin kesitinde oluşan deformasyonlar ve gerilmeler genel olarak şunlara bağlıdır (Şekil 3.9).

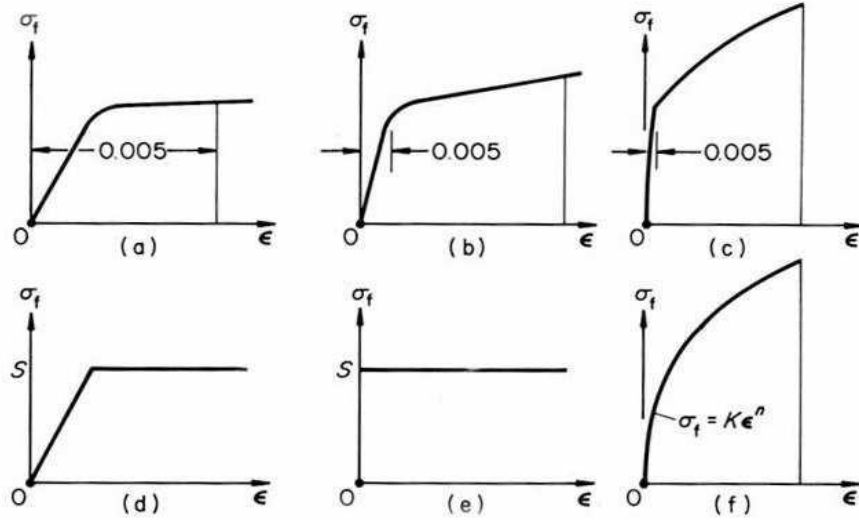
1. Malzemenin kalitesine,
2. Malzemenin kalınlığına,
3. Uygulanan kuvvete,
4. Bükme yarıçapına,
5. Bükme açısına.

3.4 Malzeme Davranışı

Malzemelerin mekanik özellikleri akma gerilmesi σ_f ile şekil değiştirme ϵ 'nin deneysel eğrileri ile ifade edilir. Şekil 3.10' deki altta yer alan diyagramlar birbirine yakın olmasına rağmen gerinim değerleri olarak birbirlerinden farklılık gösterirler. Şekil (3.10 d)' de elastik- tam plastik ideal bir malzemenin gerçek gerilme- gerçek gerinme şekil diyagramı bulunmaktadır. Şekil (3.10 e)' de rijit, tam plastik ideal bir malzemenin gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı görülmektedir. Uygulanan gerilme ile malzeme akma sınırına kadar rijittir. Elastik şekil değiştirme olmaz. Akma sınırına ulaştığında da plastik şekil değiştirme olur. Şekil (3.10 f)' de ise gerilme değeri Eşitlik 3.1 ile ifade edilebilir [3].

Bu denklemde n pekleşme katsayısıdır.

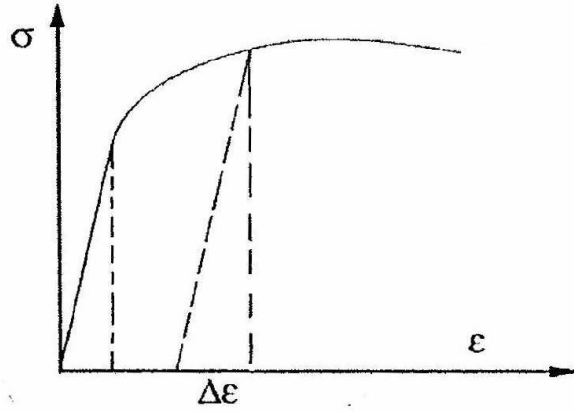
$$\sigma = K \epsilon^n \quad (3.1)$$



Şekil 3.10 Malzeme Modelleri

4. GERİ YAYLANMA

Sac malzeme yüksek çekme, germe ve bükme kuvvetleri altında almış olduğu formu, bu kuvvetler üzerinden kalktıktan sonra, malzemenin elastik özelliklerinden dolayı parça, geometrisinde meydana gelen büyük oranda elastik ender olarak da elastik- plastik değişim olarak tanımlanan bir geometrik değişim gerçekleştirir ve bu olaya “geri yaylanma” denir (Şekil 4.1).

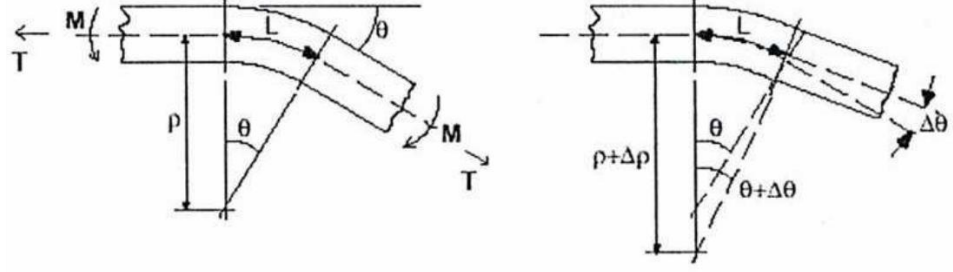


Şekil 4.1 Sünek bir metaldeki geri yaylanmanın akma diyagramı üzerinde gösterilişi

Geri yaylanma daha farklı bir ifadeyle, form almış sacın gerilme indüklenmiş halden serbest hale geçişi sırasında ters kuvvetler nedeniyle fazladan oluşan geometri değişimi olarak tarif edilebilir.

Geri yaylanmanın sayısal olarak ifade edilmesinde en çok kullanılan büyüklük “eğrilikteki değişim”dir. Geri yaylanma hesaplamaları, saca uygulanmasıyla geometriyi bulunduğu duruma getiren kuvvet veya momentin kaldırılması ilkesine dayanır. Geri yaylanma nicelik olarak pek çok biçimde ifade edilebilir. Bunlardan biri bükülme yarıçapının büyümesi veya başka bir ifadeyle eğriliğin azalmasıdır. Geri yaylanmanın form verilmiş bir sac kesiti üzerinde

gösterilmesi Şekil 4.2’de verilmiştir. Burada sac kesitindeki tarafsız eksenin eğrilik yarıçapını ifade etmektedir.



(a)(b) **Şekil 4.2** Bükülen bir sac kesiti üzerinde geri yaylanmanın gösterimi

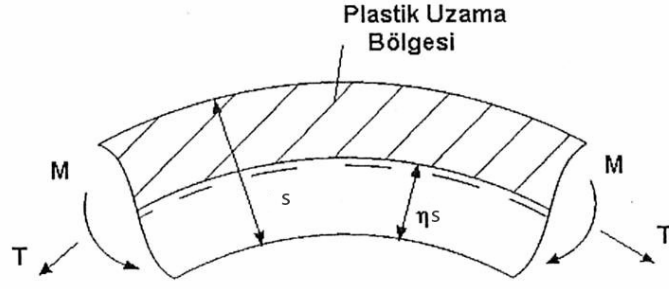
(a) L boyundaki bir sac kesitinin M momenti T çekme kuvveti etkisinde bükülmesi

(b) aynı kesitin yükleme kalktıktan sonraki hali [3].

İki boyutlu kesit üzerindeki harekete bakılırsa tarafsız eksen etrafında bir dönme ve açılma olduğu görülür. Bu form değişikliğini tamamen engellemek mümkün olmadığına göre, yapılacak en makul şey bu değişimin sağlıklı ve doğru bir şekilde geri yaylanmasını bulmak ve geri yaylanmanın telafisinin giderilmesine bakılmalıdır.

Geri yaylanma telafi yöntemi; düğüm noktasının geri yaylanma sırasında aldığı yolu hesaplayıp aynı şiddette fakat ters yönde bir geometriye uygulamaktır. Yolun bu tür küçük değişimlerde en doğru ifadesi bir yay parçasıdır.

Malzemenin elastik sınır aşıldıktan sonra bükme yarıçapının maksimum olduğu dıştaki liflerdeki gerilme akma gerilmesini aştığında, öncelikle sacın dış yüzeyinden içe doğru plastik deformasyonlar başlar (Şekil 4.3). Plastik deformasyon bölgesi sac kalınlığının belli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu bölge η oransal çarpanla $s(1 - \eta)$ olarak ifade edilebilir.



Şekil 4.3 Bükme ve çekme etkisindeki bir sac kesitindeki plastik uzama bölgesinin dış yüzeyden iç yüzeye doğru $(1 - \eta)s$ derinliğinde dağılımı [3].



Şekil 4.4 Bükmenin sebep olduğu molekül hareketleri

Şekil 4.4'de 90° ve geniş açı ile bükülmüş düz levha resmedilmiştir. Şekilde parçanın iç kısımlarında basma, dış kısımlarında ise çekmenin meydana geldiği görülmektedir. Parça büküldüğünde, iç ve dış yüzeyine sırayla basma ve çekme gerilmelerine maruz kalır. Genelde malzemede bası yönündeki gerinim, çeki yönündeki gerinimden daha büyüktür. Geri yaylanmayı yaklaşık olarak veren denklem ise şu şekildedir:

$$\frac{R_0}{R_1} = 4 \left(\frac{R_0 \sigma_y}{t E} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_0 \sigma_y}{t E} \right) + 1$$

4.1 Geri Yaylanmanın Telifi

Sac malzemelerin şekillendirilmesi işleminde, şekillendirme sonrası arzu edilen parça geometrisini etkilediğinden, geri yaylanmanın telafi edilmesi gerekmektedir. Malzeme bazında geri yaylanma miktarı ne kadar çok olursa olsun, uygun kalıp tasarımları ile geri yaylanmaya müdahale etmek mümkün olmaktadır.

Ancak, tamamen ortadan kaldırılması mümkün değildir [5,6]. Geri yaylanmayı telafi edebilmek amacıyla çeşitli yöntemlerden faydalanılmaktadır.

Bükme işlemi sonrası karşılaşılan geri yaylanmayı telafi etmede en sık karşılaşılan yöntemlerden biri, “aşırı bükme”dir. Bu yöntemde, geri yaylanma miktarı önceden tahmin edilmekte ve tahmin edilen bu açı değerine göre sac malzeme daha fazla bükülmektedir. Böylece, bükme momentinin kaldırılmasının ardından, parça tahmin edilen açı değeri kadar geri yaylanmakta ve arzu edilen nihai parça geometrisi elde edilmektedir [6, 7, 8].

V-kalıpta bükme işleminde, bükme telafisi amacıyla uygulanabilecek bir diğer yöntem de, bükme bölgesinin ezilmesidir. Bu yöntemde, ıstampa geometrisi farklılık göstermekte ve ıstampa radyüs bölgesini ezerek daha fazla kalıcı deformasyon yaratılmasına imkân tanımaktadır [7].

“Gererek bükme” işlemi de en sık kullanılan geri yaylanma telafi yöntemlerinden bir diğeridir. Bu yöntemde, bükme işlemi sırasında ya da sonrasında sac çekme gerilmesine maruz bırakılmakta ve böylece geri yaylanma miktarı minimize edilmektedir [5, 6, 9].

Açık kalıpta bükme işleminde de geri yaylanma telafisi istenebilmektedir. Bu amaçla, ıstampa konumu kontrolü gerçekleştirilebilmektedir. Böylece, geri yaylanma açısına bağlı olarak, daha fazla ya da daha az bükme yapılması gerektiğinde ıstampa pozisyonu ayarlanmaktadır. Bu noktada, açık kalıpta bükme işleminin geri yaylanmayı telafi etmek amacıyla, fazladan bükmeye izin verdiği söylenebilir [8].

Kenar bükmenin söz konusu olduğu durumlarda, geri yaylanmayı telafi etmenin bir diğer yolu da “ters bükme” işlemidir. Bu yöntemde öncelikle, sac malzeme V-kalıpta bükme işlemine maruz bırakılmaktadır. Daha sonra sac malzeme ters çevrilmekte ve ters yönde gerçekleştirilen düz kenar bükme işlemi uygulanmaktadır. Böylece, sac malzeme bünyesindeki gerilme dağılımları ile oynanmakta ve geri yaylanma belirli ölçüde telafi edilmektedir [10].

4.2 Geri Yaylanma Davranışını Etkileyen Parametreler

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 [11].

Proses parametreleri, malzemelerin mekanik ve boyutsal özellikleri, vs. etkileşerek geri yaylanmayı etkileyecek bu gerilme dağılımında değişikliğe yol açmaktadırlar [9]. Bu değişiklikler, geri yaylanma miktarı tahminin ve telafisinin uygulanabilirliğini olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla, geri yaylanma davranışının incelenmesinin istendiği durumlarda, sağlıklı çözümlerlerin 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 [12].

4.2.1 Kalınlık

Sac malzemelerin bükme ile şekillendirilmesinde, geri yaylanma davranışını etkileyen en belirgin parametrelerin başında kalınlık gelmektedir. Daha ziyade bükme radyüsünün kalınlığa oranı (R/t) ile ifade edilmekle beraber, mevcut çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, kalınlığın geri yaylanma üzerine etkisi açıkça görülebilmektedir.

Bükme ve geri yaylanma davranışı ile ilgili mevcut çalışmalar incelendiğinde, bükme radyüsünün sac malzeme kalınlığına oranının artmasıyla geri yaylanma miktarının arttığı gözlenmektedir [6, 13, 14]. Bu durumun tam tersi de doğru olmaktadır. Yani, sac malzeme kalınlığı azaldıkça, geri yaylanma miktarı artış göstermektedir [15].

Kenar bükme işlemlerinde sac malzeme kalınlığının geri yaylanma üzerine etkisi, V- kalıpta bükme ve açık kalıpta bükme gibi geleneksel yöntemlerde olduğu gibi sonuçlanmaktadır. Sac kalınlığı arttıkça, şekillendirilmiş parçanın geri yaylanma miktarı azalmaktadır. R/t oranının göz önünde bulundurulduğu çalışmalarda, bu durum açıkça gözlenebilmektedir. Bu noktada, artan kalınlık neticesinde, bükme bölgesinde karşılaşılan kalıntı gerilme değerinin azaldığı düşünülebilir [20].

4.2.2 Bükme Radyüsü

Sac malzemelerin bükülerek şekillendirilmesinde önemli parametrelerden biri de bükme radyüsüdür. Zira, bükülebilirlik takım geometrisinden etkilenmektedir. Malzemenin hasara uğramadan bükülebileceği en küçük radyüs değeri, o malzemenin bükülebilirliğini ifade etmektedir. Genellikle, çok küçük radyüs değerlerinde bükme işlemleri gerçekleştirilememektedir. Bükme radyüsünün çok küçük olması durumunda, şekillendirilen malzemenin en dış lifinde karşılaşılan aşırı miktardaki birim şekil değişimi neticesinde hasar gözlenebilmektedir. Ayrıca, alüminyum gibi malzemelerde, küçük radyüslerde gerçekleştirilen şekillendirme işlemi neticesinde, arzu edilmeyen yüzey özellikleri ile karşılaşabilmektedir. Dolayısıyla, bükme ile şekillendirilmede, malzemede yırtık ya da çatlak oluşumlarını önlemek için büyük bükme radyüsleri tercih edilmektedir. Kalınlık değerleri arttıkça da, sac malzemenin bükülebileceği minimum bükme radyüslerinin arttığı görülmektedir [16,17,18].

Bükme radyüsü malzemenin bükülebilirliğini ifade etmekle birlikte, temel olarak geri yaylanma davranışını tayin etmektedir. Bükme ile şekillendirme sonrası geri yaylanma davranışını esas alan çalışmalar incelendiğinde, radyüs değerinin artmasıyla, geri yaylanma miktarının arttığı gözlenmektedir [13, 14, 19]. Artan bükme radyüsü değerlerinde, geri yaylanmada monotonik artışlarla karşılaşıldığı söylenebilir [15]. Bu durum, R/t oranının özellikle 0.5 ile 3.3 aralığında bulunduğu durumda daha belirgin olmaktadır [20].

Geri yaylanma sonrasında, bükme bölgesi radyüs değeri artmaktadır. Bükme radyüsünün geri yaylanma üzerine etkisi, kalınlıktakine benzer olarak, R/t oranı ile

ifade edilmektedir [6]. R/t oranı arttıkça, parça geometrisinde karşılaşılan doğruluktan sapma miktarı, yani geri yaylanma artmaktadır [21, 22]. Bu durumun tam tersi de doğru olmaktadır. Öyle ki, bükme radyüsünde %75'lik bir azalma, geri yaylanma miktarının % 30 oranında azalmasını sağlamaktadır [20].

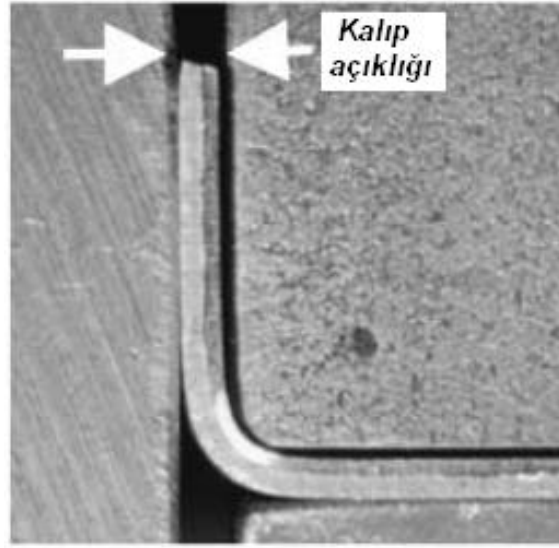
Mevcut çalışmalar incelendiğinde, değişik bükme radyüsü değerlerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla karşılaşılmaktadır. [22, 23]. Literatürde, bükme radyüsünün 4 mm olarak alındığı düz kenar bükme işleminde, malzeme ve geometri parametrelerinin geri yaylanma üzerine etkilerinin incelendiği görülmektedir [22]. Benzer çalışmalara, 0.5 mm ve 2.0 mm gibi farklı radyüs değerleri için de rastlanmaktadır [15].

Bükme radyüsünün sac malzeme kalınlığına oranının 5'ten büyük ($R/t > 5$) seçildiği çalışmalarda, bu orandaki değişimlerin geri yaylanma üzerindeki etkileri belirginlikten uzaklaştığı, fakat yine de ölçülebilir mertebelerde kaldığı ifade edilmektedir. Küçük radyüs değerlerinin geri yaylanma üzerine etkileri daha belirgin olarak gözlenirken, artan radyüs değerlerinde bu etki azalmaktadır [20,22].

Bükme radyüsünün, kenar bükme sırasında, bükme çakısında ortaya çıkan yatay ve dikey kuvvetler üzerinde belirgin etkisi bulunmaktadır. Bükme radyüsü arttıkça kalıba gelen kuvvetler azalmaktadır. Ancak, bu azalma lineer olarak gerçekleşmemektedir. Bükme radyüsü küçüldükçe, sac malzeme bünyesindeki gerilmelerin büyüdüğü söylenebilir. Daha küçük bükme radyüslerinin tercih edildiği durumlarda, bükme işleminin gerçekleştirilebilmesi için daha büyük kuvvetlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bükme radyüsü arttıkça da, karşılaşılan kuvvet değerlerinin küçüldüğü söylenebilir. Öyle ki, kenar bükme işlemi sırasında, 0.5 mm.den 2.0 mm.ye çıkan radyüs değeri neticesinde, bükme çakısına gelen yatay kuvvette % 22, dikey kuvvette ise % 37'lik bir azalma gözlenebilmektedir [15, 20].

4.2.3 Kalıp Açıklığı

Kalıp açıklığı, bükme ile şekillendirilen sac malzeme ile ıstampa arasındaki boşluk olarak tanımlanmaktadır. Kalıp açıklığının geometrisi Şekil 4.5'deki gibi görülmektedir. Sac malzemelerin kalınlık toleransları göz önüne alındığında, endüstriyel uygulamalarda kalıp açıklığının genel olarak sac kalınlığına oranının 1.1 mertebelerinde seçildiği söylenebilir [23]. Literatürde, kalıp açıklığının geri yaylanma davranışı üzerine etkilerinin araştırıldığı çalışmalar bulunmaktadır [20,13].

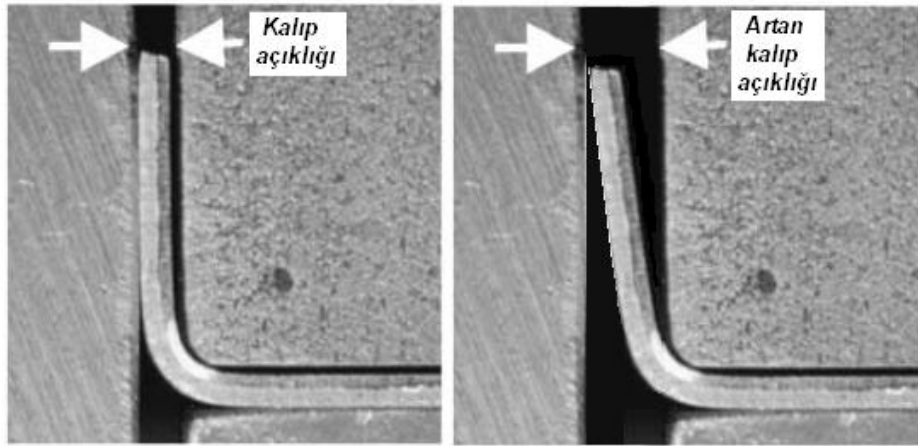


Şekil 4.5 Düz kenar bükmede karşılaşılan kalıp açıklığı [20].

Bükme ile şekillendirme ve sonrasında karşılaşılan geri yaylanma davranışının araştırıldığı mevcut çalışmalar incelendiğinde, kalıp açıklığının artmasıyla, geri yaylanma miktarının arttığı gözlenmektedir [13, 15]. Kalıp açıklığının sac malzeme kalınlığına oranından meydana gelen % 10'luk bir artış, geri yaylanmayı % 10 civarında arttırabilmektedir [20]. Kalıp açıklığı ne kadar küçülürse de, geri yaylanma o kadar azalmaktadır [21]. Buradan yola çıkarak, geri yaylanmanın telafi edilmesi amacıyla, kalıp açıklığı değeri ile oynanabileceği söylenebilir [22].

Sabit bir R/t oranı ve malzeme için (değişmeyen malzeme özellikleri), artan kalıp açıklığı değeri ile geri yaylanma miktarının arttığı ifade edilmektedir [20, 23, 24]. Kalıp açıklığı ile geri yaylanma miktarı arasındaki ilişkinin lineer olduğu savunulmaktadır [24]. Kalıp açıklığının daralması ile birlikte, bükme bölgesinde plastik deformasyonlar artmakta, dolayısıyla şekillendirme sonrası geri yaylanma azalmaktadır [20]. Ayrıca, kenar bükme işleminde, kalıp açıklığı arttığında, sac malzeme daha küçük açı değerinde bükülmekte ve nihai bükme geometrisine ulaşılmadan, şekillendirme işlemi sonlanmaktadır. Bu noktada, geri yaylanmanın etkisinden daha ziyade, malzemenin daha küçük açı değerine bükülmesinden dolayı, nihai parça geometrisinin elde edildiği düşünülebilir. Şekil 4.6'da bu durum, görsel olarak aktarılmaktadır.

Kalıp açıklığının artması ile birlikte, bükme bölgesinde moment kolunun uzunluğu da artmaktadır. Bu durum, bükmede karşılaşılan moment değerinin artmasına neden olmakta ve sonuç olarak, bükme işlemi için ihtiyaç duyulan ilave kuvvet değerini azaltmaktadır [20].



Şekil 4.6 Artan kalıp açıklığı nedeniyle daha küçük açı değerinde gerçekleştirilen bükme işlemi [20].

4.2.4 Baskı Plakası Kuvveti

Sac malzemelerin bükme ile şekillendirilmesi sonrasında karşılaşılan geri yaylanma davranışını etkileyen parametrelerden biri de baskı plakası kuvvetidir [30, 12, 15].

Bükme ve geri yaylanma ile ilgili literatür incelendiğinde, baskı plakası kuvvetinin geri yaylanma üzerine etkisinin araştırıldığı çalışmalar bulunmaktadır [20, 9, 25].

Şekillendirme işlemi sırasında uygulanan baskı plakası kuvveti azaldıkça, şekillendirme sonrası karşılaşılan geri yaylanma miktarı artış göstermektedir. Artan kuvvet değerlerinde ise tam tersi durum geçerliliğini korumaktadır [9]. Baskı plakası kuvveti arttıkça, geri yaylanma miktarı azalmaktadır [20]. Bu noktada, artan gerilmeler nedeni ile ihtiyaç duyulan bükme moment değerinin azaldığı söylenebilir [14].

Yüksek basınç değerleri altında gerçekleştirilen şekillendirme işlemlerinde, sac malzemede daha fazla plastik deformasyonla karşılaşıldığından, geri yaylanma miktarının azaldığı söylenebilmektedir [26].

Malzemeye uygulanan baskı plakası kuvveti aynı kalmasına rağmen, V-bükme gibi geleneksel bükme işlemlerinde, bükme kolu uzunluğu arttıkça, geri yaylanma miktarı artmaktadır. Bunun nedeni olarak, temas alanının artması, temas basıncının düşmesi ve sonuç olarak plastik deformasyon miktarının azalması gösterilebilir [27].

V-kalıpta bükme, açık kalıpta bükme gibi geleneksel bükme işlemlerinde, ıstampanın kendisinin gerçekleştirdiği sac malzemeyi tutma işlemini, kenar bükme işlemlerinde baskı plakaları gerçekleştirmektedir. Burada, ıstampa bükme işlemi için doğrusal hareketini yaparken, baskı plakası da şekillendirme öncesinde sac malzemeyi sıkıştırarak hareketini engellemektedir.

Kenar bükme işleminin sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu incelendiğinde, sac malzemenin baskı plakası kuvveti uygulanan kısmında, üniform gerilme dağılımları ile karşılaşmaktadır. Ancak, burada karşılaşılan gerilmelerin, malzemenin geri yaylanma davranışını çok etkilemediği gözlenmektedir [10].

4.2.5 Anizotropi

Sac malzemelerin büyük bir çoğunluğu, farklı yönlerde farklı mekanik özellikler sergilemektedirler. Bu şekilde, yöne bağlı olarak mekanik özellikleri değişiklik gösteren malzemelere anizotropik malzeme denilmektedir. Tam tersi bir durumda ise özelliklerin yöne bağlı olarak değişmediği malzemelere ise izotropik malzeme denir.

Anizotropi, mekanik ve kristalografik olmak üzere iki kısımda incelenebilir [28]. Mekanik anizotropi, metalik olmayan inklüzyonlar (safsızlıklar) ile impürite ve boşluk gibi süreksizliklerin malzeme yapısındaki dağılımı ya da yönlmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Örneğin, çelik yapısındaki bir cüruf inklüzyonu, haddeleme neticesinde hadde yönünde uzayabilir ve sac yüzeyine paralel olacak şekilde düzleşebilir. Bu da çeliğin haddeleme yönüne dik olan çekme dayanımını, hadde yönüne paralel çekme dayanım değerinden daha düşük kılabilmektedir. Mekanik anizotropi, kırılmada ön plana çıkmaktayken, kristalografik anizotropi daha çok akma ve plastik şekillendirme işlemlerinde önem kazanmaktadır [28].

Metallerde anizotropinin en önemli nedeni, malzeme yapısındaki tanelerin kristalografik düzensizliğidir. Bu taneler, farklı doğrultularda yönlmektedirler. Özellikle soğuk şekillendirme işlemi, metal yapısı içindeki tanelerin malzemenin akış yönünde olacak şekilde dönmesine neden olmaktadır [29]. Önemli ölçüde plastik deformasyona uğrayan metaller kristalografik yönlmeye uğrarlar. Bu yön malzemenin en büyük deformasyonu gördüğü doğrultu olup, bu yönlme teknik literatürde tekstür oluşumu olarak adlandırılmaktadır.

Anizotropik davranışı belirlemede en geçerli parametre, anizotropi oranı (R) olmaktadır ve 4.3 eşitliğindeki gibi ifade edilir. Bu R değeri, normal anizotropiyi yani anizotropinin sac yüzeyine dik doğrultudaki etkisini tanımlamaktadır [28].

$$R = \varepsilon_w / \varepsilon_t \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_w = \ln(w/w_0) \quad \varepsilon_t = \ln(t/t_0) \quad (4.4)$$

Sac malzemelerde normal anizotropi değerleri, ortalama anizotropi değeri ile ifade edilmektedir ve \bar{R} ile gösterilmektedir.

$$\bar{R} = (R_0 + 2R_{45} + R_{90}) / 4 \quad (4.5)$$

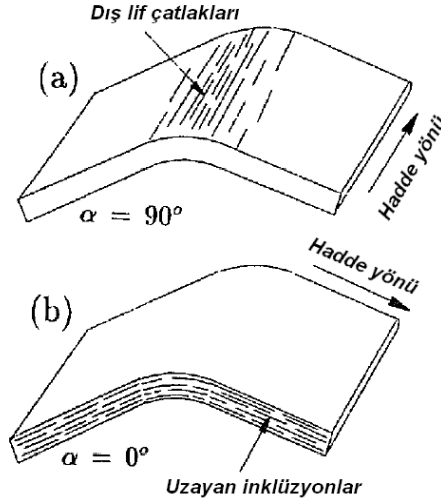
Sac malzemelerin mekanik özellikleri, yöne bağlı olarak değişiklik göstermektedir [30]. Bu durum, malzemelerin plastik olarak şekillendirilmesine yansımaktadır. Literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde, anizotropinin geri yaylanma üzerine etkisi bulunduğu anlaşılmaktadır [8, 9, 16, 31-32]. Ayrıca, konuyla ilgili sonlu eleman simülasyonlarına da rastlanmaktadır [9, 33].

Sac malzemelerin normal anizotropi değerlerinde meydana gelen artışlar neticesinde, malzemenin bükme ile şekillendirme sonrasında geri yaylanma miktarında artış gözlenmektedir [34, 33]. Bu noktada, anizotropi ile geri yaylanma arasındaki ilişkinin doğru orantılı olduğu söylenebilir [16].

Sacın şekillendirilmesi sırasında uygulanan bükme momentinin normal anizotropi değerine bağlı olduğu söylenebilir [8]. Maksimum bükme momenti normal anizotropi değerine paralel olarak artmaktadır [16]. Anizotropi nedeniyle malzeme bünyesinde karşılaşılan çatlaklar ve inklüzyonlarda meydana gelen uzamalar görsel olarak Şekil 4.7’de aktarılmaktadır.

Anizotropi değeri arttıkça, malzemenin deformasyona karşı direnci artmaktadır. Bu durum, doğrultulara göre farklılık göstermektedir. Bükme eksenini hadde doğrultusuna dik gelecek şekilde gerçekleştirilen bükme işleminde

malzemenin bükülebilirliği, haddeye paralel doğrultuya göre iyileşmektedir [16]. Haddeye paralel doğrultuda alınan malzemelerde şekillendirme sonrasında karşılaşılan geri yaylanma miktarı ise, haddeye dik doğrultudaki geri yaylanmaya göre fazla olmaktadır [21].

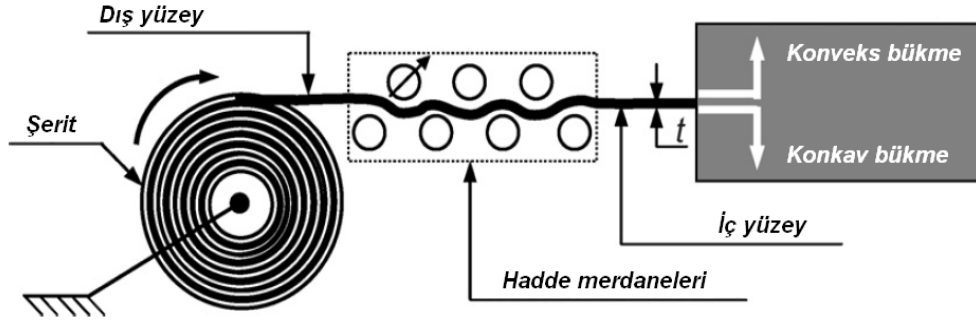


Şekil 4.7 Haddeye paralel ve haddeye dik bükme geometrilerinde bükülebilirliğin karşılaştırılması [16].

Bükme radyüsü büyüdükçe, anizotropinin geri yaylanma üzerine etkisi daha da belirginleşmekte ve artmaktadır [33]. Dolayısıyla, minimum geri yaylanma miktarına izotrop malzemelerde rastlandığı söylenebilir [33]. Anizotropinin geri yaylanma üzerine etkisini, rulo halindeki malzemelerden elde edilen numunelerde farklı bir şekilde görmek mümkündür. Burada, sac malzemenin geçmişinin ön plana çıktığı söylenebilir. Rulo açıcıardan elde edilen sac malzemenin şekillendirme işlemine tabi tutulması sırasında, konveks ve konkav etki söz konusu olmaktadır [21]. Bu etki, rulonun açım yönü ve malzemenin şekillendirme doğrultusuna bağlı olarak değişmektedir (Şekil 4.8).

Konkav bükme işlemi, sac malzemenin rulo halindeki iç yüzeyine bakan tarafa bükülmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu bükme işleminde geri yaylanma miktarının daha fazla olduğu söylenebilir. Bunun nedeni, malzeme geçmişinde karşılaşılan kalıntı gerilmelerdir [21].

Konveks bükme işleminde ise, sac malzeme rulo halinde dış yüzeyine bakan tarafa doğru şekillendirilmektedir. Konveks bükme işleminde geri yaylanma miktarı, daha az kalıntı gerilmelerle karşılaşıldığından, daha az olmaktadır. Dolayısıyla, daha uygun parça geometrisinin elde edilmesinde konveks bükme işleminin tercih edilmesi daha doğru olacaktır [21].



Şekil 4.8 Konkav ve konveks bükme [21].

Konkav bükme işlemi söz konusu olduğunda, malzemenin dış yüzeyinde mevcut olan çekme ve iç yüzeyinde mevcut olan basma kalıntı gerilmeleri, bükme ile şekillendirme işlemi neticesinde, ilave çekme ve basma kalıntı gerilmeleri ile karşılaşmaktadır. Bu durumda kalıntı gerilmeler büyümekte ve malzemede daha büyük geri yaylanma açılarına oluşmasına neden olmaktadır. Ancak, konveks olarak büküldüğünde, malzeme bünyesinde karşılaşılan kalıntı gerilmeler ile şekillendirme işlemi kaynaklı kalıntı gerilmeler birbirlerinin etkilerini elimine etmekte ve bunun sonucunda da geri yaylanma miktarı azalmaktadır [21].

4.2.6 Bauschinger etkisi

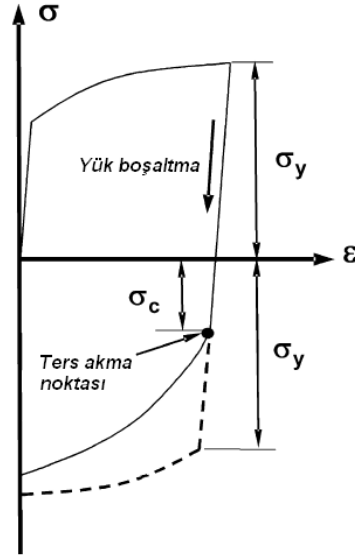
Metal malzemelerin ilk deformasyon yönleri, akma özelliklerinde anizotropiye neden olmaktadır [29]. Özellikle soğuk olarak plastik şekil değişimine maruz kalmış malzemelerde görülen bu durum, literatürde Bauschinger etkisi olarak anılmaktadır.

Bauschinger etkisinde malzeme, başlangıçta çekmeye maruz bırakılarak plastik deformasyona uğratılıyorsa, yük boşaltıldıktan sonra ters yönde uygulanan basma işlemi neticesinde, malzemenin daha düşük gerilme seviyesinde aktığı gözlenmektedir. [28, 35]. Yani, malzeme daha düşük akma dayanım değerine sahip olmaktadır.

Bauschinger etkisinin iki önemli nedeni bulunmaktadır. Bunlar; kısa aralık ve uzun aralık etkileridir. Kısa aralık etkilerinde, malzeme bünyesinde hareket eden dislokasyonlar, kendilerine hareket yönü doğrultusunda kolaylıkla gidip gelecekları düzenlemeleri yapmaktadırlar. Bu düzenlemeler neticesinde, ilk hareket sırasında harcadıkları enerji, hareketin devamında harcanandan daha fazla olmaktadır. Dolayısıyla, ters yönde deformasyon sırasında dislokasyonların geriye dönüşleri daha rahat gerçekleşmektedir [29].

Uzun aralık etkilerinde ise dislokasyonlar enerji depolayan yaylar gibi çalışmaktadırlar. Sıkılmış bir yay gibi elastik şekilde biriken dislokasyonlar, ters yöndeki deformasyon sırasında boşalarak, malzeme bünyesindeki hareketlerini kolaylaştırmaktadır. Bu da malzemede yumuşama ile sonuçlanmakta ve malzemenin daha düşük gerilme değerinde plastik şekil değiştirmesine neden olmaktadır [29]. Bauschinger etkisi Şekil 4.9'da görülebilmektedir.

Sac malzemede yükleme ve ters yönde yükleme neticesinde gerçekleştirilen geri yaylanma işlemi söz konusu ise, Bauschinger etkisinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir [13, 36]. Özellikle çevrimsel plastik deformasyonun söz konusu olduğu durumlarda, Bauschinger etkisi söz konusu olmaktadır [13]. Dolayısıyla, Bauschinger etkisinin hassas olarak ele alınmadığı durumlarda, geri yaylanmanın tam olarak tahmin edilemeyeceği düşünülmektedir [33]. Bauschinger etkisi nedeniyle malzemeler farklı sertleşme davranışları sergilemekte, bu durum göz ardı edildiğinde de geri yaylanma miktarları hassas olarak belirlenmemektedir [37]. Zira, bükmede uygulanan moment değeri, malzemenin deformasyonla sertleşebilme yeteneğine bağlı olduğu söylenebilir [8].



Şekil 4.9 Bauschinger etkisinde akma dayanımında meydana gelen düşüş [37].

Bauschinger etkisinin geri yaylanma üzerine etkisi, alüminyumda çeliğe nazaran daha belirgin olarak görülmektedir [13]. Alüminyum alaşımlarında gerçekleştirilen basit bükme testlerinde, bu etki ön plana çıkmaktadır. Ancak, çelik sac malzemelerde bu durum alüminyum malzemelerdeki kadar belirgin değildir [14].

4.2.7 Akma Dayanımı

Sac malzemeleri karşılaştırmada kullanılacak en temel parametrelerin başında akma dayanımı gelmektedir. Akma dayanımı; malzemenin kalıcı (plastik) şekil değişimine maruz kalmaya başladığı gerilme değeridir. Bu değer altında uygulanan gerilme değerlerinde, malzemede kalıcı olmayan (elastik) deformasyon görülmektedir ve yük kaldırıldığında malzeme ilk konumuna geri dönmekte, elastik toparlanma gözlenmektedir. Geri yaylanmanın küçük olması için, şekillendirilen malzemenin akma dayanımının düşük olması gerekmektedir [13]. Akma dayanımının elastiklik modülüne oranının yüksek olduğu malzemeler, günümüzde geleneksel çeliklere göre daha çok tercih edilmeye başlanmıştır. Dolayısıyla, artan dayanım değeri ile geri yaylanma konusu, üretici firmaların gündemini oluşturmaktadır.

Malzemenin akma dayanımı arttıkça, geri yaylanma miktarı artmaktadır [6]. Öyle ki, yüksek dayanımlı çeliğin şekillendirilmesi sonrasında karşılaşılan geri yaylanma miktarı, düşük dayanımlı çelikte karşılaşılan geri yaylanmadan çok daha fazla olmaktadır [9]. Akma dayanımının elastiklik modülüne oranının yüksek olduğu durumlarda, geri yaylanma miktarı artmaktadır [11]. Geri yaylanma malzemenin elastik ve plastik deformasyon davranışına bağlı olarak değişmektedir [38].

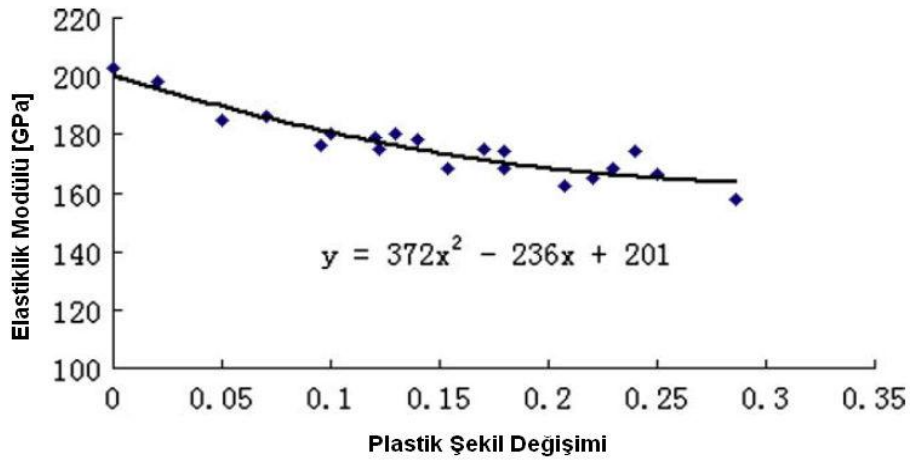
4.2.8 Elastiklik Modülü

Sac malzemelerin geri yaylanma davranışını etkileyen malzeme özelliklerinden biri de elastiklik modülüdür [9]. Elastiklik modülü, mühendislik uygulamalarının büyük bir çoğunluğunda sabit bir değer olarak alınmaktadır. Ancak, artan deformasyona bağlı olarak elastiklik modülünün değeri düşmektedir [39, 40]. Bu durum Şekil 4.10'da görülebilmektedir.

Deformasyonla birlikte elastiklik modülünde düşüşe, plastik deformasyon sırasında karşılaşılan mikro yapı değişiklikleri ve iç gerilmeler neden olmaktadır [40]. Ayrıca, dislokasyonların mobilitelerinin ve birbirleriyle zincirleme çarpışmalarının da bu düşüşe neden olduğu tahmin edilmektedir [40, 41].

Dönüşüm yoluyla sertleşebilen (TRIP) çelikler kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, elastiklik modülünde meydana gelen değişim, artan plastik deformasyon miktarı ile ilişkilendirilmektedir [40]. Bu ilişki 4.6 eşitliğinde verilmektedir.

$$E = 372 \varepsilon_p^2 - 236 \varepsilon_p + 201 \text{ GPa} \quad (4.6)$$



Şekil 4.10 Elastiklik modülünün plastik deformasyonla değişimi [40].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, malzeme bünyesinde meydana getirilen % 5'lik deformasyonun, elastiklik modülünde % 10'u aşan düşüğe neden olduğu gözlenmektedir [40]. Bükme ile şekillendirme işlemi söz konusu olduğunda, elastiklik modülü küçük olan sac malzemelerde geri yaylanma miktarı daha fazla olmaktadır [20]. Diğer bir deyişle, elastiklik modülü arttıkça, elastik deformasyona direnç arttığından geri yaylanma miktarı azalmaktadır [6, 34]. Alüminyum alaşımların şekillendirilmesinde de, çeliklerdekine benzer şekilde elastiklik modülünde azalma meydana geldiği gözlenmiştir [40].

4.2.9 Sıcaklık

Sıcaklık, malzemelerin şekillendirilebilirliklerini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Örneğin, alüminyum alaşımlarının 200°C ile 350°C aralığındaki sıcaklıklara çıkarmak, malzemenin şekillendirilebilirliğini % 200 ile 300 kadar arttırabilmektedir [14]. Benzer durumla çeliklerde de karşılaşılabilmektedir.

Sıcaklığın şekillendirilebilirliğin yanı sıra, geri yaylanma gibi proses olumsuzluklarının giderilmesinde de önemli etkisi bulunmaktadır. Öyle ki, artan sıcaklık değerlerinde sac malzemelerin akma dayanımlarında belirgin düşüşlerle

karşılaştığından, bükme sonrası geri yaylanmayı telafi edebilmek amacıyla işlemler yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilebilmektedir [6].

Sıcaklık arttıkça, bükme ile şekillendirilen malzeme bünyesinde, iç ve dış yüzeydeki çekme ve basma kalıntı gerilmeleri arasındaki fark azalmaktadır [14]. Sonuç olarak, geri yaylanma da artan bu sıcaklık değerlerine paralel olarak azalmaktadır [14]. Literatürdeki mevcut çalışmalara göre, şekillendirme sıcaklığını kontrol ederek geri yaylanmadan büyük ölçüde kurtulmak mümkün olmaktadır [14].

4.2.10 Sürtünme

Sac malzemelerin bükme ile şekillendirilmesinde ön plana çıkan parametrelerden bir diğeri de sürtünmedir. Literatürde mevcut deneysel ve simülasyon çalışmaları incelendiğinde, sürtünmenin bükme işlemi sonrası geri yaylanma üzerine etkilerinin olduğu görülmektedir [42, 13, 10, 12, 31]. Ancak, bu etkinin yönü net olarak anlaşılmamaktadır [15].

Alüminyum malzeme kullanılarak gerçekleştirilen nümerik bir çalışmada, sürtünme katsayısı arttıkça geri yaylanmanın azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, sürtünmenin malzeme bünyesinde çekme etkisi yaratmasıdır. Yani, malzeme germe ile bükülüyormuş gibi davranmaktadır. Dolayısıyla, bükme için ihtiyaç duyulan moment değeri de azalmaktadır [14]. Ancak, başka deneysel çalışmalarda, artan sürtünme katsayısı ile geri yaylanmanın arttığı ifade edilmektedir [30, 15].

4.2.11 Şekillendirme Hızı

Sac malzemelerin şekillendirilmesini etkileyen parametrelerden biri de şekillendirme hızıdır [42]. Kenar bükme işleminin şekillendirme hızından belirgin şekilde etkilenmediği söylenebilir [15]. Şekillendirme hızının etkisi, daha ziyade sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Öyle ki, oda sıcaklığında gerçekleştirilen bükme işlemlerinde, malzeme özelliklerinde belirgin değişiklikler meydana

gelmediğinden, geri yaylanma miktarı şekillendirme hızına bağlı olarak belirgin şekilde değişmemektedir. Ancak, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen şekillendirme işlemlerinde, ıstampa hızı düştükçe geri yaylanma miktarı azalmaktadır [14].

4.2.12 Pekleşme Üsteli

Deformasyonla sertleşen malzemelerde karşılaşılan parametrelerinden biri de pekleşme üstelidir. Pekleşme gösteren metal malzemelerin davranışları genel olarak Holloman bağıntısı ile ifade edilmektedir.

Holloman bağıntısı sac malzemelerde en yaygın olarak kullanılan pekleşme modeli olarak bilinmektedir ve bu denklemle gerçeğe oldukça yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. Burada K , metal malzemenin dayanım değerini ifade etmekte, n ise malzemenin pekleşme derecesini vermektedir. Pekleşme üsteli olarak anılmaktadır ve malzemenin malzemeye farklılık göstermektedir.

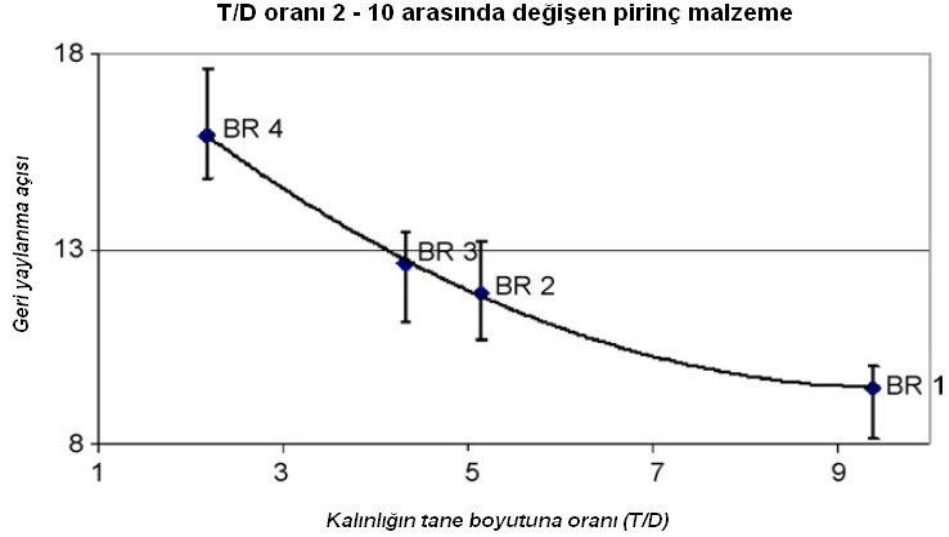
Pekleşme üsteli, sac malzemelerin geri yaylanma davranışını etkilemektedir [9, 16]. Pekleşme üsteli değeri arttıkça, geri yaylanma miktarı artmaktadır [33, 34]. Bunun nedeni, artan pekleşme üsteli ile ihtiyaç duyulan bükme momenti değerinin azalmasıdır [16].

4.2.13 Tane Boyutu

Bükme sonrası geri yaylanma davranışının araştırıldığı çalışmalar incelendiğinde, sac malzeme tane boyutunun da geri yaylanma üzerine etkisinin bulunduğu söylenebilir. Literatür incelendiğinde, tane boyutunun geri yaylanma davranışı üzerine etkisini konu alan bir çalışmayla karşılaşılmaktadır [43]. Bu çalışmada, pirinç sac malzeme mikro şekillendirme işlemine tabi tutulmaktadır. Şekillendirme işlemi sonrasındaki geri yaylanma davranışı incelendiğinde, kalınlığın tane boyutuna oranının (t/D) artmasıyla, geri yaylanma miktarının azaldığı

gözlenmektedir [43]. Bu noktada, tane boyutu küçüldükçe, geri yaylanma miktarının azaldığı söylenebilir (Şekil 4.11).

Ancak, çelik sac malzemelerde durumun farklı olması beklenebilir. Tane boyutu küçük malzemelerde akma dayanımı yüksekken, şekillendirilebilirlik kötü olmaktadır. Tane boyutu büyük olanlarda ise akma dayanımı düşmekte, şekillendirilebilirlik de iyileşmektedir [44]. Bu şartlar altında, malzemenin akma dayanımı haricinde sahip olduğu mekanik özellikler göz ardı edilecek olursa, küçük taneli yapının akma dayanımı daha yüksek olduğundan, bükme ile şekillendirme işlemi sonrasında geri yaylanma miktarının daha fazla olması beklenebilir [46].

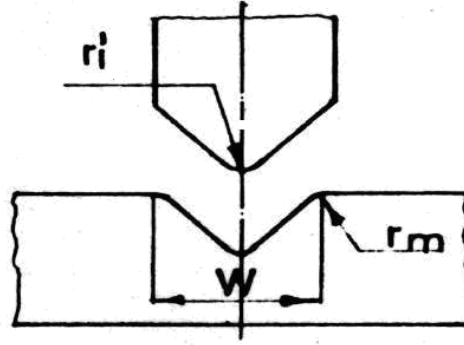


Şekil 4.11 Pirinç malzemedeki tane boyutu küçüldükçe geri yaylanmada meydana gelen azalma [43].

5. V BÜKME KALIP TASARIMI

5.1 Bükme Yarıçapı

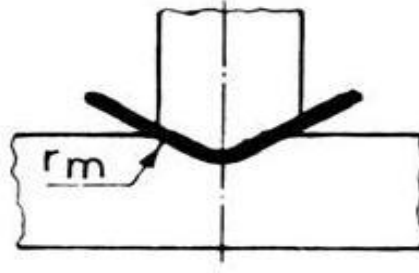
V bükme deneyinin yapılması için öncelikle uygun bir bükme kalıbı hazırlanması gerekmektedir. V bükme deneyi için uygun kalıp tasarımı yapılmasında bazı kaynaklardan yararlanılarak şu şekilde kalıp hazırlanmıştır. Hazırlanan kalıplarda zımba yarıçapı r_i ile kalıp açıklığı W gerektiği ölçülerde olmalıdır. (Şekil 5.1)



Şekil 5.1 V bükme

r_i / W uygun değerde alınırsa parça büküldükten sonra istenen yarıçapa sahip olunur. Deneyde zımba yarıçapları 2 mm ve 6mm seçilmiştir. Bu değerler bükme için ne çok büyük, ne de çok küçüktür.

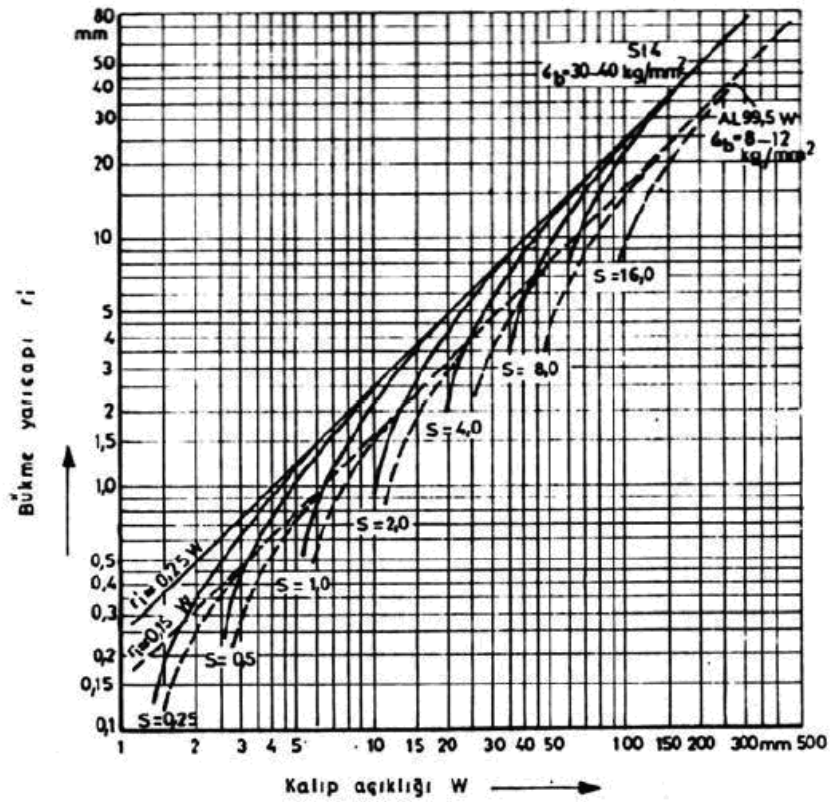
Kalıp köşelerine verilmesi gerekli yarıçap $r_m = (0.5-1)s$ kadar alınabilir. (Şekil 5.2). Kalın malzemelerde $r_m = 3s$ 'ye kadar çıkılabilir. Kalıbın çenelerindeki sürtünme kuvvetlerini eşit yapabilmek için r_m yarıçapı eşit olmalı ve mümkünse bu yarıçap yerleri parlatılmalıdır. $r_m = r_i$ de alınabilir. Geniş açılı bükmelerde r_m yarıçapları biraz küçük olabilir [45].



Şekil 5.2 Kalıp köşesine verilmesi gereken yarıçap ($r_m \geq 0,5 s$)

5.2 V Bükme Kalıp Açıklığının Hesabı

V bükme kalıplarında kalıp açıklığının da uygun bir şekilde tespit edilmesi gerekir. Bunun için Şekil 5.3'deki diyagramdan veya yaklaşık olarak $W=r_f/(0.15-0.25)[mm]$ formülünden istifade edilebilir [45].



Şekil 5.3 Kalıp açıklığı diyagramı

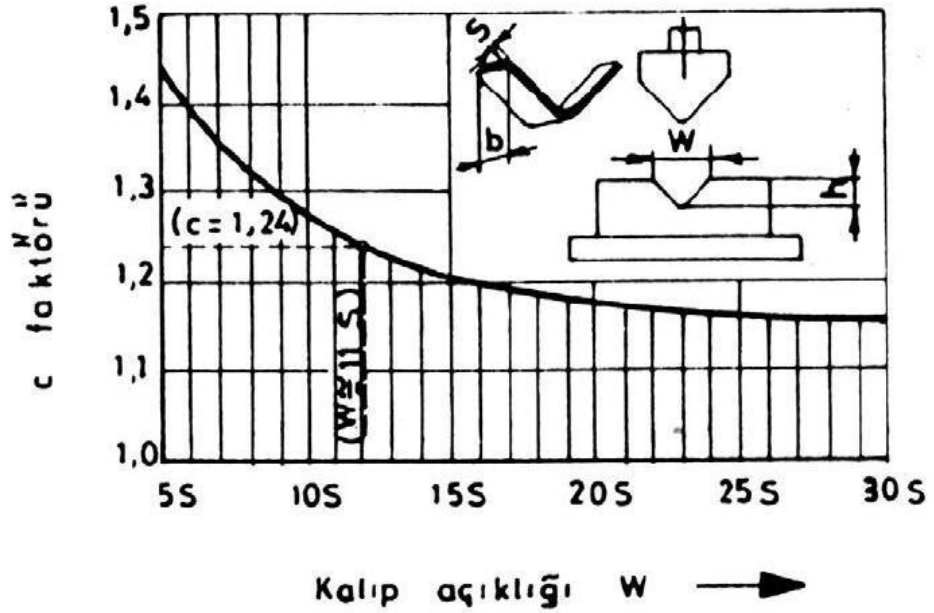
V bükmede bükme kuvveti: $P_b = c \cdot \sigma_b \cdot s^2 \cdot b / W$

Bükme sonundaki kuvvet: $P_e = 2 \cdot P_b$

Yukarıdaki formülle tespit edilen P_b bükme kuvveti yerine V bükme kalıplarında $P_e = 2 \cdot P_b$ son bükme kuvvetini almak gerekir. Bunun nedeni, anormal geri yaylanmalara ve anormal sürtünmelere mani olmak için, emniyetli net kuvveti bulmak içindir.

Düzeltilme katsayısı: $c = 1 + (4s/W)$

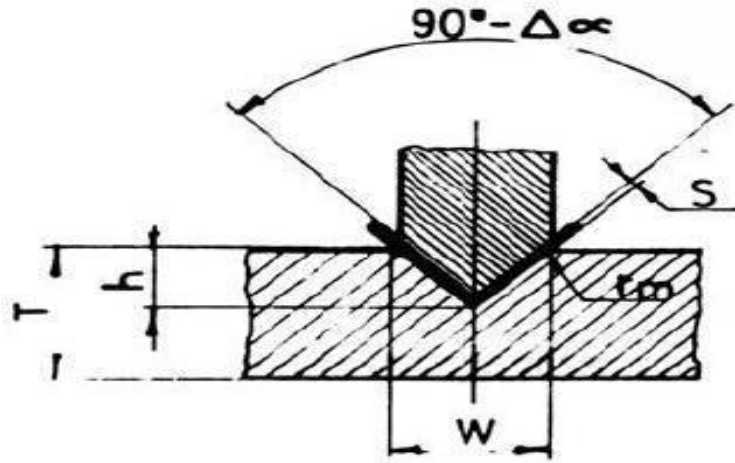
“c” katsayısı ile çarpılmasının nedeni, sürtünmeler ve geri esneme vs. kuvvetleri karşılamak içindir. c katsayısını kalıp genişliği ve sac kalınlığına bağlı olarak diyagramdan da bulmak mümkündür (Şekil 5.6) [45].



Şekil 5.6 V bükmede c faktörünün değişimi

V bükme kalıplarında $c=1.2-1.33$ arasında alınabilir. Bu durumda bükme kuvveti:

$P_b = 1.33 \cdot \sigma_b \cdot b \cdot s^2 / W$ olur.



Şekil 5.8 Bükme kalıbının boyutları

Tablo 5.1 Bükme kalıbı boyutları

| | Saç Kalınlığı (mm) | | | | | | | | | |
|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--|
| | ...1 | 1...2 | 2...3 | 3...4 | 4...5 | 5...6 | 6...7 | 7...8 | 8...10 | |
| r_m | 3 | 5 | 7 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 15 | |
| h | 4 | 7 | 11 | 15 | 18 | 22 | 25 | 28 | 32-35 | |
| T | 22 | 34 | 43 | 48 | 59 | 70 | 76 | 88 | 98 | |

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

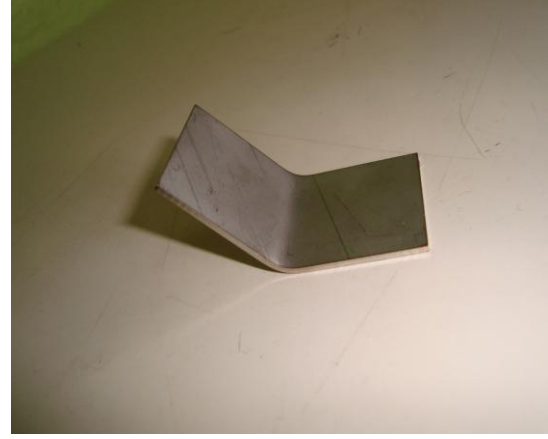
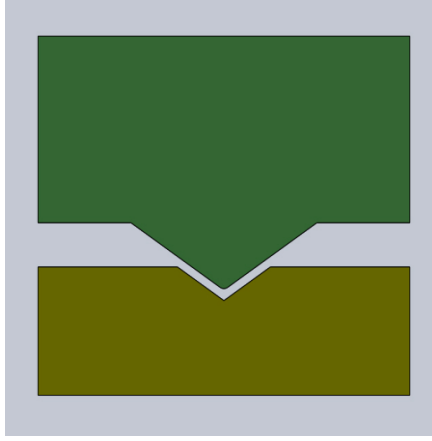
Deneysel çalışmanın amacı, V bükme yönteminde değişen parametrelerin, sac malzemelerin geri yaylanma davranışı üzerine etkilerinin incelenmesidir. Burada bahsi geçen parametreler temel olarak, bükme radyüsü, bükme açısı, malzeme ve malzeme kalınlığıdır. Deney parametreleri ve bunların değerleri Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Deney parametreleri.

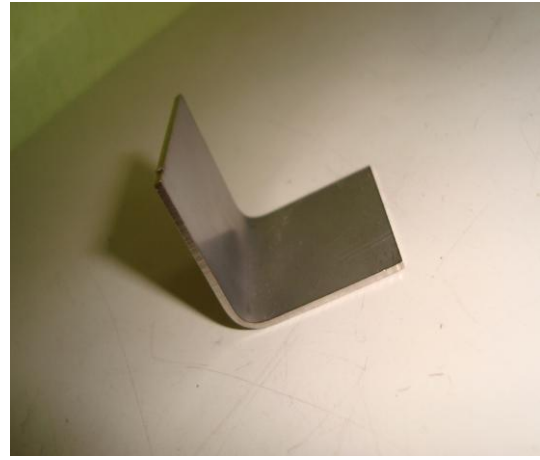
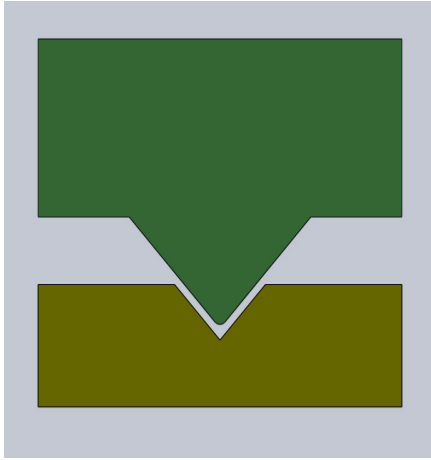
| DENEY PARAMETRELERİ | | | |
|----------------------------|---------|--------|--------------------------|
| Bükme radyüsü | 2 mm | | 6 mm |
| Kalıp açısı | 60° | 90° | 120° |
| Malzeme | DKP Sac | | Paslanmaz Sac (AISI 304) |
| Malzeme kalınlığı | 1 mm | 1.5 mm | 2 mm |

6.1 V Bükme Deney Numuneleri

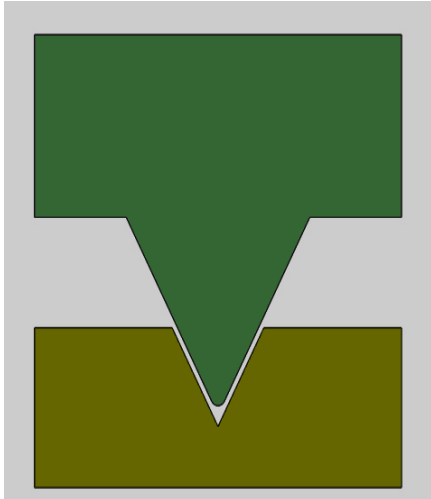
Deney numuneleri 30x60 mm ebatlarında hazırlanmıştır. Malzeme ebatlarının küçük seçilmesinin nedeni, dar alanda geri esnemenin daha sağlıklı olarak tespit edilebileceği düşüncesinden kaynaklanmıştır. Deneyler DKP ve Paslanmaz Sac için kalınlıkları 1 mm, 1.5 mm ve 2 mm den oluşan sırasıyla 60, 90, 120 derece değerlerindeki kalıp açılarında ve her açı için de 2 farklı bükme radyüsü kullanılarak bükme işlemleri Şekil 6.4. deki kalıp ile yapılmıştır. Sonuçların sağlıklı yorumlanabilmesi için aynı yönde haddelenmiş saclar alınarak her durum için beş adet deney yapılmış ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Bükme sonrası numunelerin görünümü şekil 6.1 de görülmektedir.



(a)



(b)

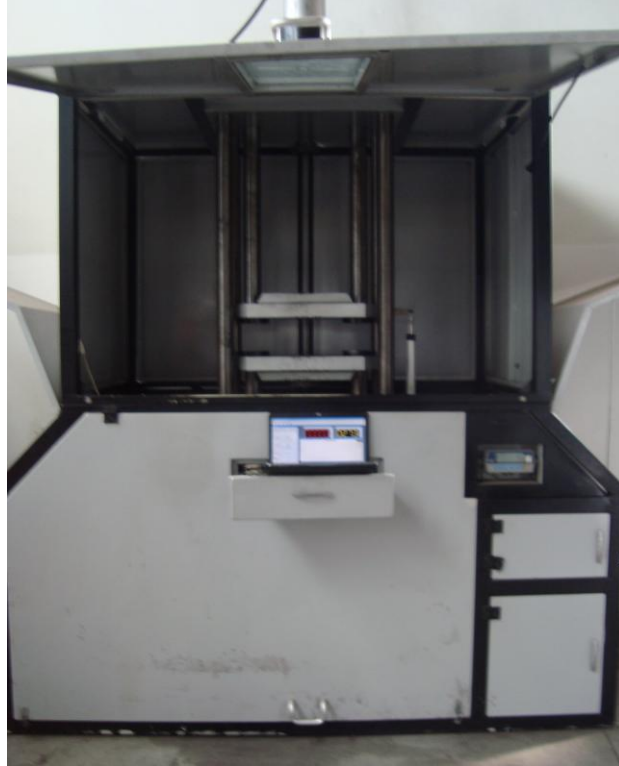


(c)

Şekil 6.1 Bükülmüş numune örnekleri a) 60° V bükme b) 90° V bükme c) 120° V bükme

6.2 DeneY Tasarımı ve V Bükme DeneYleri

Kalıp ölçüleri belirlenirken bu güne kadar yapılan çalışmalardaki deneysel formüller ve kabuller benimsenmiştir. Kalıbın imali sırasında CNC freze tezgahı, tel erozyon tezgahı, matkap tezgahı, hidrolik testere, hidrolik pres tezgahı ve bunların ekipmanları kullanılmıştır. Özellikle kalıp parçalarının yapımında CNC freze tezgâhından faydalanılmıştır. DeneYde kullanılan kalıp parçaları CNC freze tezgâhında kararlaştırılan bükme açılarında 0.005 mm hassasiyetle işlenmiştir. Bu ölçünün ve bükme şartlarının değişmesi, elde edilen sonuçları değiştirebileceği için hassas işlem teknikleri kullanılmıştır. Oluşturulan V bükme deneY düzenekleri 20 ton kapasiteli hidrolik preste çalıştırılmıştır. Sac malzemeleri bükmek için kullanılan presin hızı ayarlanabilir olup deneY sırasında 30 cm/dk sabit hız kullanılmıştır. Kullanılan hidrolik pres Şekil 6.2’da görölmektedir.



Şekil 6.2 Bükme deneYlerinin gerçekteştiği hidrolik pres

6.3 V Bükme Kalıbı ve Deneyi

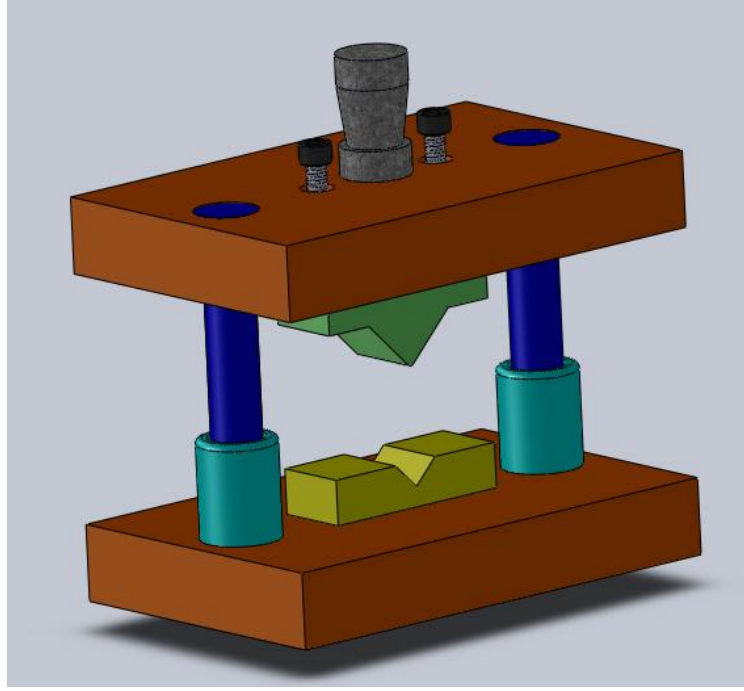
Uygulamalarda en sık karşılaşılan bükme yöntemlerinden biri V bükme işlemidir. Dolayısıyla, bu deneysel çalışmada bükme yöntemleri içerisinde V bükme üzerinde durulmuştur. V bükme yöntemi ile sac bükme için öncelikle deney kalıbı tasarlanmıştır (Şekil 6.3).

V bükme işleminde, ilk olarak şekillendirme işlemine tabi tutulacak sac malzeme, kalıp boşluğuna yerleştirilmektedir. Bu noktada, malzemeyi kalıp boşluğuna düzgün bir şekilde yerleştirilebilmek için, kalıp boşluğu malzeme boyundan mm'nin yüzde biri (1/100 mm) kadar büyük yapılmıştır. Böylece, malzemenin konumu, her bükme işlemi öncesinde aynı olmaktadır. Arzu edilen boyutlardaki malzeme, kalıp boşluğuna yerleştirildikten sonra, kalıp hidrolik pres yardımıyla çalıştırılmaktadır. Şekil 6.4'de, V bükme işleminde kullanılmak üzere imal edilen kalıp görülmektedir.

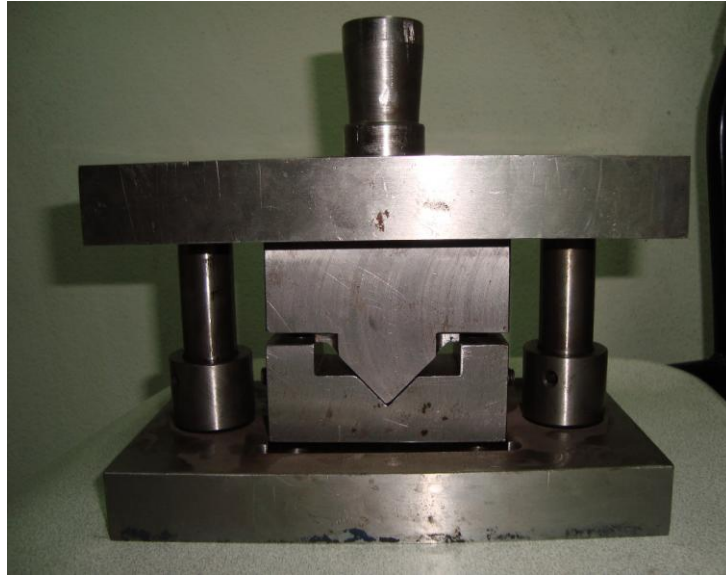
Deney kalıp elemanları, St 37 kütük malzemedен işlenerek oluşturulmuştur. Kütük önce tel erozyon makinesi kullanılarak kalıp ham ölçülerine düşürülmüştür. Ham ölçülerine düşürülen parçalar CNC frezede şu takımlar kullanılarak kalıp yapılmıştır.

- 1- Punta matkabı
- 2- 11,5 mm matkap
- 3- 12 mm rayba
- 4- 25 mm parmak freze (kaba)
- 5- 20 mm parmak freze (finiş)
- 6- 8 mm küre karbür (kaba)
- 7- 4 mm küre karbür (finiş)

CNC frezede işlenen parçalar daha sonra montajı yapılarak V bükme kalıbı oluşturulmuştur.



Şekil 6.3 V bükme işlemi için tasarlanan kalıp modeli.



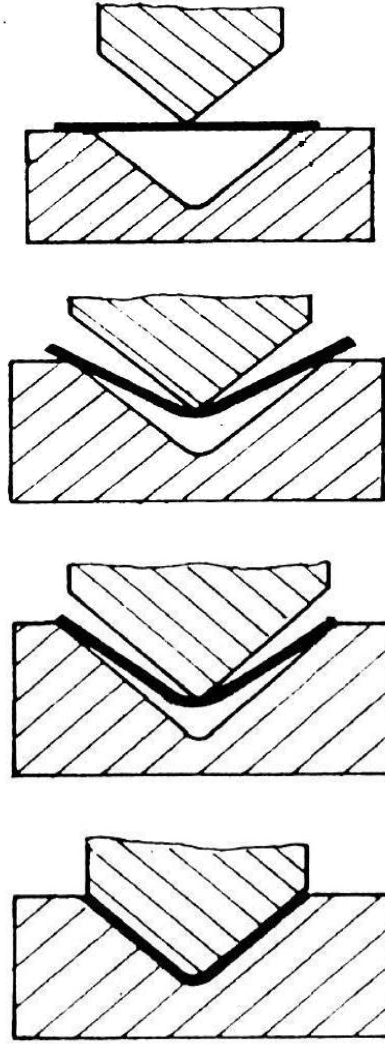
Şekil 6.4 V bükme kalıbı.

Alt kalıp, iki adet 25 mm çapında kalıp yataklama mili yardımıyla st plakaya bağlanmaktadır [54]. Burada kullanılan kalıp yataklama milleri, kalıbın düsey hareketi sırasında zımbayla dişi kalıbın aynı eksende hareket etmesini sağlamaktadır. Zımba, V bükme işlemi sırasında herhangi bir yalpa hareketine maruz kalmaması için ise kalıp plakasına M8 cıvata ile bağlanmıştır. Ayrıca kalıpta kullanılan kalıp yataklama burçları ise millerin yataklamasını sağlamaktadır.

V bükme kalıbını oluşturan kalıp elemanlarının ve kalıp montajının teknik resimleri ise EK A de yer almaktadır.

6.4 Deneyin Yapılışı

nce numune kalıba yerleştirilmiştir. Sac numunesinin boyu ile sacın koyulacağı yerin boyu aynı ölçülerde olacağı için sac düzgün bir şekilde kalıba oturur. Daha sonra pres ve prese bağlı olan bilgisayar çalıştırılarak deney başlar. Presin alışması ile zımba malzemeye temas eder ve bükme işlemi başlar. Bükme işlemi zımba ile dişi kalıp arasında sac kalınlığı kadar mesafe kalana kadar devam etmektedir. Sac kalınlığı kadar mesafe bırakılmasındaki amaç ise sacın deforme olarak yapısının bozulmasını önlemektir. 60°, 90° ve 120° bükme geometrisi elde edilmesiyle birlikte, V bükme işlemi tamamlanmaktadır. Ardından st plaka ters yönde düsey hareketini gerçekleştirmekte ve zımba da sac malzeme üzerinden kalkmaktadır. Daha sonra malzeme kalıp boşluğundan çıkarılmakta ve bir sonraki sac malzemeye aynı işlemler uygulanarak V bükme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bükme işlemi şematik olarak şekil 6.5 te gösterilmiştir.



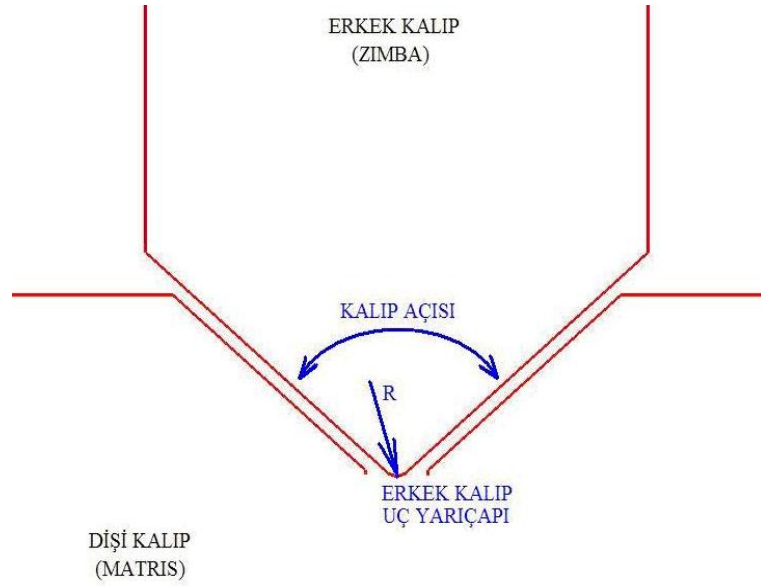
Şekil 6.5 Bükme işlemi

Deneyisel çalışmalarda 2 mm ve 6 mm radyüs değerleri tercih edilmiştir. Bu radyüs değerleri endüstride sık kullanılmakta ve aynı zamanda literatür çalışmalarına da konu olduğu için seçilmiştir. Önce 2 mm radyüslü zımba kullanılmış olup daha sonra bu zımba sökülerek yerine 6 mm radyüslü zımba takılıp testlere devam edilmiştir.

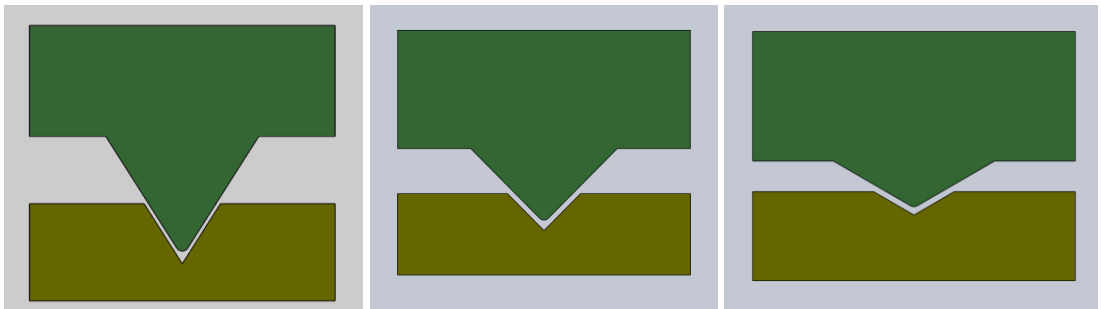
V kenar bükme işlemleri sırasında değiştirilmeyen parametreler hadde yönü, kalıp açıklığı, kalıp boşluğu, zımbanın sac üzerinde bekleme süresi ve pres hızıdır. Bu parametreler sabit tutularak farklı zımba radyüslerinin saca oluşan geri esnemeye etkileri araştırılmaktadır.

6.5 Kalıp Değişkenleri

Kalıp açısı 60° , 90° ve 120° olarak üç farklı değerde olup şekil 6.7'de gösterilmiştir. Erkek kalıp uç yarıçapı ise 2 mm ve 6 mm olmak üzere iki farklı değer için incelemeler yapılmıştır.



Şekil 6.6 Kalıp değişkenleri



Şekil 6.7 Soldan sağa 60° , 90° ve 120° açılına sahip kalıplar

6.6 Açı Ölçümleri

Bükme işlemi yapılan numunelerin geri esneme değerlerini öğrenmek için Şekil 6.8 'de görülen optik projeksiyon cihazı kullanılmıştır. Kullanılan bu ölçüm cihazı bir dakika hassasiyetine sahiptir.



Şekil 6.8 Optik projeksiyon cihazı

7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

7.1 Geri Esneme Değerleri

Aşağıda Tablo 7.1 ve 7.2’de DKP Sac için Tablo 7.3 ve 7.4’te ise Paslanmaz Sac malzemesi için farklı kalınlıklardaki geri esneme değerleri gösterilmiştir.

Tablo 7.1: 2 mm zımba radyüsü ile bükülen farklı kalınlıklardaki DKP sac malzemelerin bükme açıları ve büküm sonrası geri esneme değerleri

| Kalıp Açısı | Numuneler | | | | | Dene Ortalaması (°) | Geri Esneme (°, ’) | |
|-------------|-----------|----------|----------|----------|----------|---------------------|--------------------|--------|
| | 1.Numune | 2.Numune | 3.Numune | 4.Numune | 5.Numune | | | |
| 1 mm | 60 | 65,16 | 65,24 | 65,22 | 65,08 | 65,32 | 65,20 | 5° 12’ |
| | 90 | 93,96 | 94,54 | 94,61 | 94,08 | 93,92 | 94,22 | 4° 13’ |
| | 120 | 123,41 | 123,47 | 123,52 | 123,54 | 123,58 | 123,50 | 3° 30’ |
| 1.5 mm | 60 | 64,86 | 64,78 | 63,92 | 63,96 | 64,80 | 64,46 | 4° 28’ |
| | 90 | 92,94 | 93,04 | 92,64 | 92,33 | 92,35 | 92,66 | 2° 40’ |
| | 120 | 121,93 | 121,90 | 121,91 | 122,02 | 121,82 | 121,91 | 1° 55’ |
| 2 mm | 60 | 63,54 | 63,48 | 63,42 | 63,60 | 63,44 | 63,50 | 3° 30’ |
| | 90 | 91,07 | 91,34 | 91,33 | 90,96 | 91,32 | 91,20 | 1° 12’ |
| | 120 | 120,25 | 120,04 | 120,13 | 119,96 | 120,28 | 120,13 | 8’ |

Tablo 7.2: 6 mm zımba radyüsü ile bükülen farklı kalınlıklardaki DKP sac malzemelerin bükme açıları ve büküm sonrası geri esneme değerleri

| Kalınlık (mm) | Kalıp Açısı | Numuneler | | | | | Deney Ortalaması (°) | Geri Esneme (°, ') |
|---------------|-------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------------------|--------------------|
| | | 1.Numune | 2.Numune | 3.Numune | 4.Numune | 5.Numune | | |
| 1 mm | 60 | 69,81 | 69,73 | 69,34 | 69,21 | 69,73 | 69,56 | 9° 34' |
| | 90 | 97,72 | 96,96 | 97,45 | 97,77 | 97,58 | 97,50 | 7° 30' |
| | 120 | 126,88 | 126,43 | 126,55 | 127,06 | 126,63 | 126,71 | 6° 43' |
| 1.5 mm | 60 | 68,66 | 68,62 | 68,41 | 69,05 | 68,42 | 68,63 | 8° 38' |
| | 90 | 96,22 | 96,74 | 96,45 | 96,64 | 96,47 | 96,50 | 6° 30' |
| | 120 | 125,73 | 124,96 | 125,18 | 125,66 | 125,58 | 125,42 | 5° 25' |
| 2 mm | 60 | 66,34 | 66,64 | 65,88 | 66,34 | 66,18 | 66,28 | 6° 17' |
| | 90 | 95,15 | 94,92 | 94,86 | 95,48 | 95,44 | 95,17 | 5° 10' |
| | 120 | 123,75 | 123,44 | 123,56 | 123,71 | 123,43 | 123,58 | 3° 35' |

Tablo 7.3: 2 mm zımba radyüsü ile bükülen farklı kalınlıklardaki Paslanmaz sac malzemelerin bükme açıları ve büküm sonrası geri esneme değerleri

| Kalınlık (mm) | Kalıp Açısı | Numuneler | | | | | Deney Ortalaması (°) | Geri Esneme (°, ') |
|---------------|-------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------------------|--------------------|
| | | 1.Numune | 2.Numune | 3.Numune | 4.Numune | 5.Numune | | |
| 1 mm | 60 | 66,81 | 67,02 | 66,82 | 66,93 | 66,84 | 66,88 | 6° 53' |
| | 90 | 95,83 | 95,73 | 95,76 | 95,82 | 95,74 | 95,78 | 5° 47' |
| | 120 | 123,75 | 124,02 | 124,11 | 123,93 | 123,81 | 123,92 | 3° 55' |
| 1.5 mm | 60 | 65,33 | 65,52 | 65,11 | 65,03 | 65,13 | 65,22 | 5° 13' |
| | 90 | 93,45 | 92,94 | 93,78 | 93,97 | 93,22 | 93,27 | 3° 16' |
| | 120 | 122,47 | 122,38 | 122,45 | 122,52 | 122,28 | 122,42 | 2° 25' |
| 2 mm | 60 | 64,81 | 64,84 | 64,91 | 65,12 | 65,05 | 64,95 | 4° 57' |
| | 90 | 92,45 | 92,37 | 92,52 | 92,41 | 92,62 | 92,47 | 2° 28' |
| | 120 | 121,22 | 121,36 | 121,28 | 121,24 | 121,17 | 121,25 | 1° 15' |

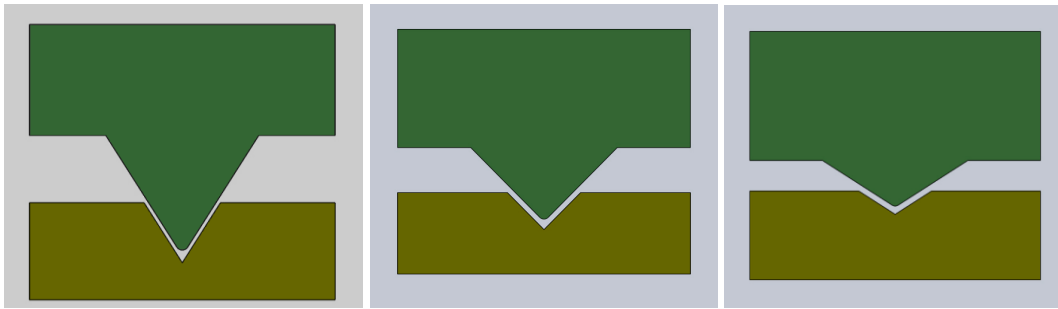
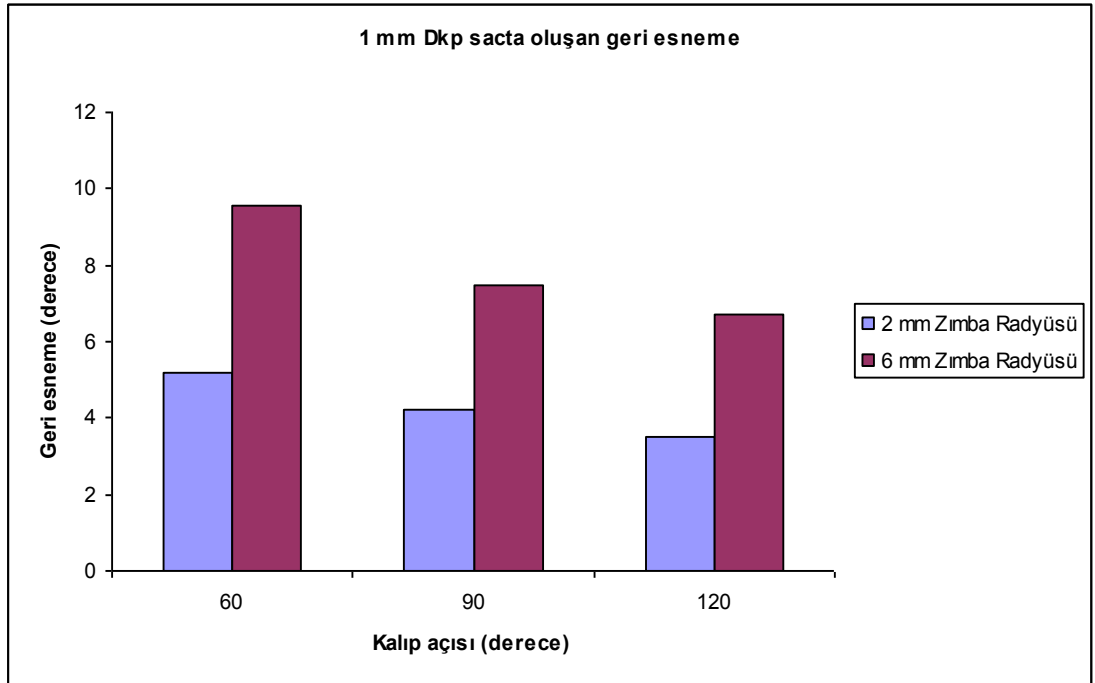
Tablo 7.4: 6 mm zımba radyüsü ile bükülen farklı kalınlıklardaki Paslanmaz sac malzemelerin bükme açıları ve büküm sonrası geri esneme değerleri

| 1 mm | Kalıp Açısı | Numuneler | | | | | Deney Ortalaması (°) | Geri Esneme (°, ') |
|-----------|----------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------------------------|--------------------------|
| | | 1.Numune | 2.Numune | 3.Numune | 4.Numune | 5.Numune | | |
| 1 mm | 60 | 71,28 | 71,34 | 71,42 | 71,39 | 71,45 | 71,38 | 11° 23' |
| | 90 | 100,54 | 100,42 | 100,57 | 100,64 | 100,72 | 100,58 | 10° 35' |
| | 120 | 128,21 | 128,11 | 128,19 | 128,21 | 128,24 | 128,19 | 8° 11' |
| 1.5 mm | 60 | 69,59 | 69,61 | 69,64 | 69,76 | 69,78 | 69,68 | 9° 41' |
| | 90 | 98,26 | 98,28 | 98,24 | 98,12 | 98,08 | 98,20 | 8° 12' |
| | 120 | 126,81 | 126,83 | 126,91 | 127,01 | 127,05 | 126,92 | 6° 55' |
| 2 mm | 60 | 68,59 | 68,61 | 68,74 | 68,79 | 68,84 | 68,71 | 8° 43' |
| | 90 | 97,32 | 97,25 | 97,46 | 97,51 | 97,58 | 97,42 | 7° 25' |
| | 120 | 124,81 | 124,83 | 124,92 | 125,01 | 125,04 | 124,92 | 4° 55' |

7.2 Geri Esneme Değerlerinin Grafiklerle Karşılaştırılması

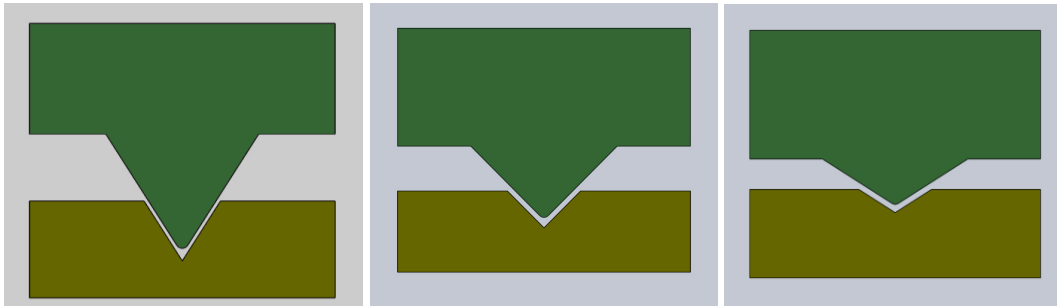
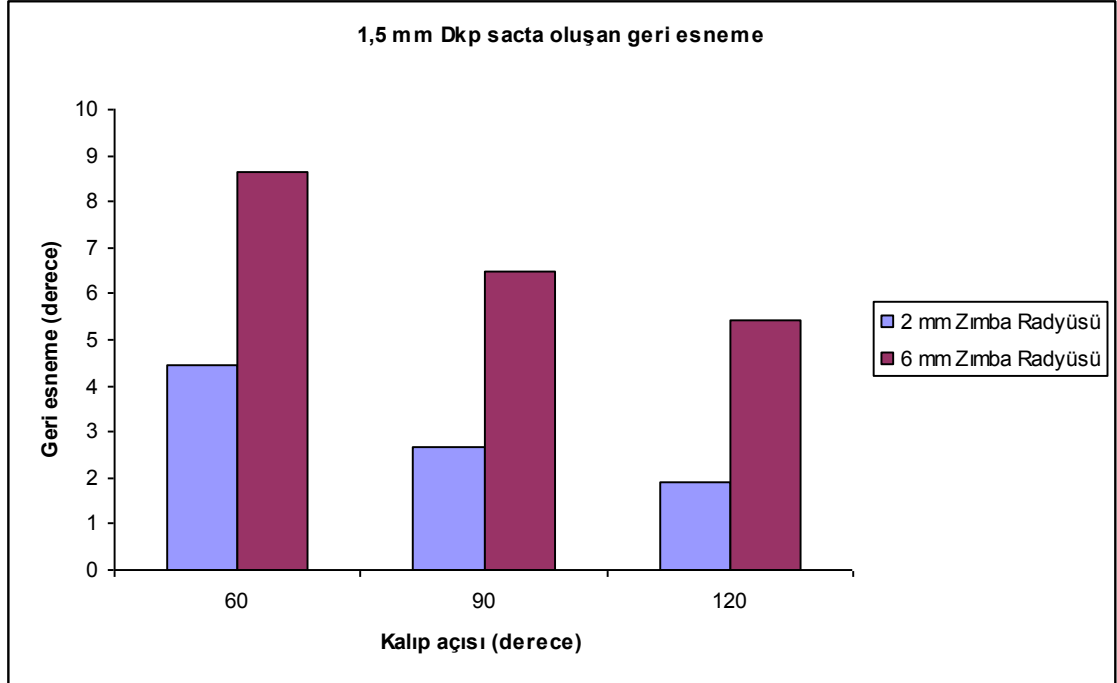
Deneysel çalışmalar sonucunda DKP ve Paslanmaz Sacın 60°, 90° ve 120° kalıp açılarında, 2 ve 6 mm zımba radyüslerinde ortaya çıkan geri esneme değerlerinin grafiklerle karşılaştırılması yapılmıştır.

7.2.1 1 mm DKP Sacta oluşan geri esneme değerlerinin karşılaştırılması



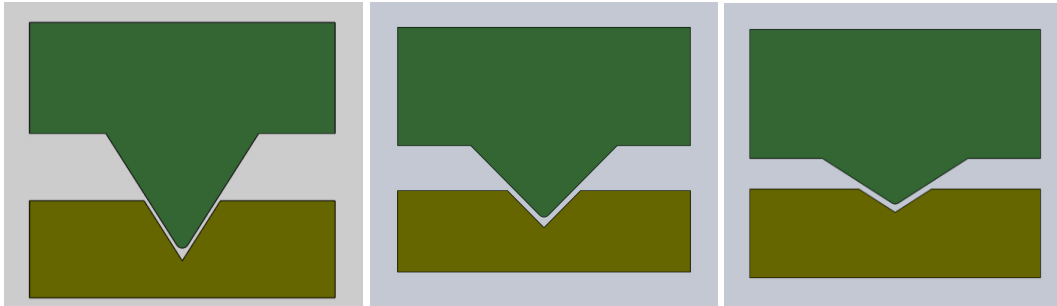
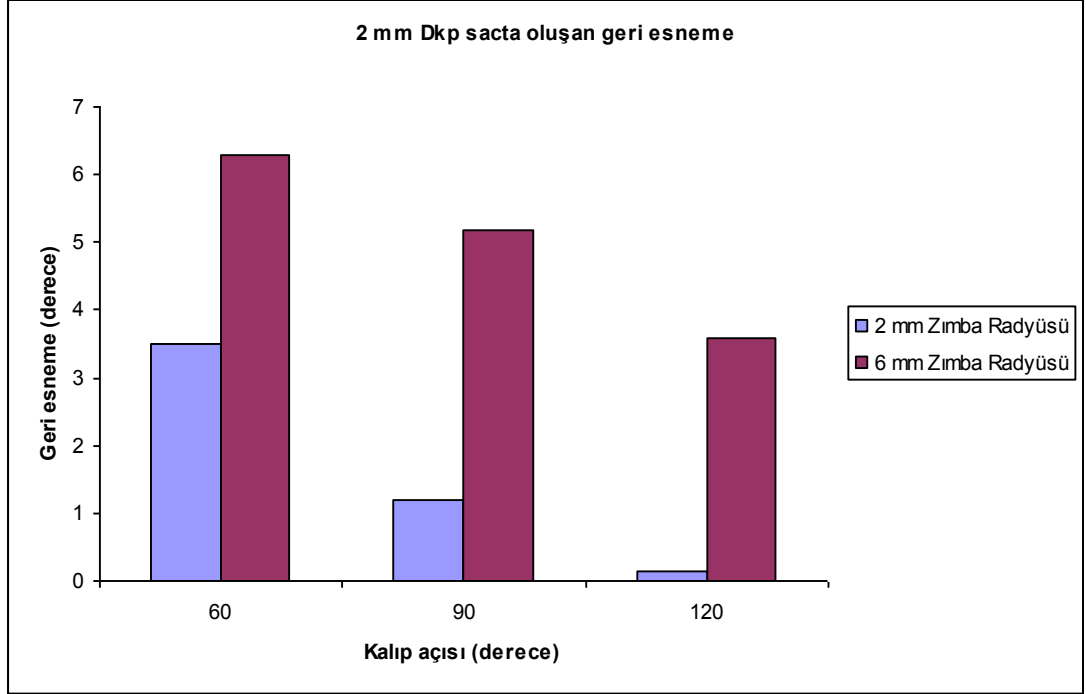
Şekil 7.1 1 mm DKP Sacta oluşan geri esneme değerleri

7.2.2 1,5 mm DKP Sacta oluşan geri esneme değerlerinin karşılaştırılması



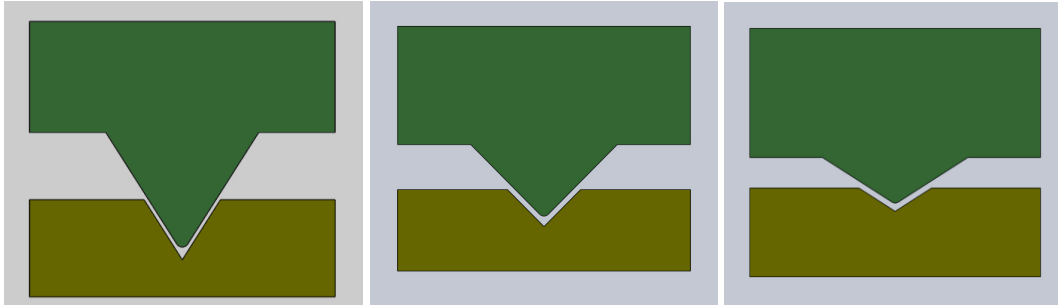
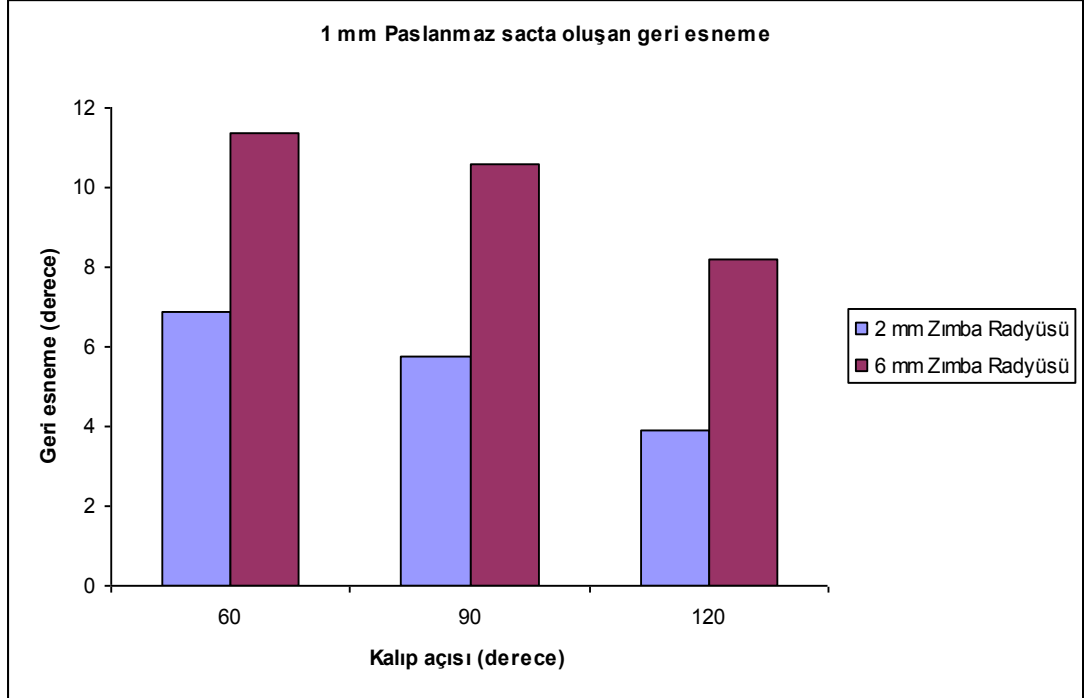
Şekil 7.2 1,5 mm DKP Sacta oluşan geri esneme değerleri

7.2.3 2 mm DKP Sacta oluşan geri esneme değerlerinin karşılaştırılması



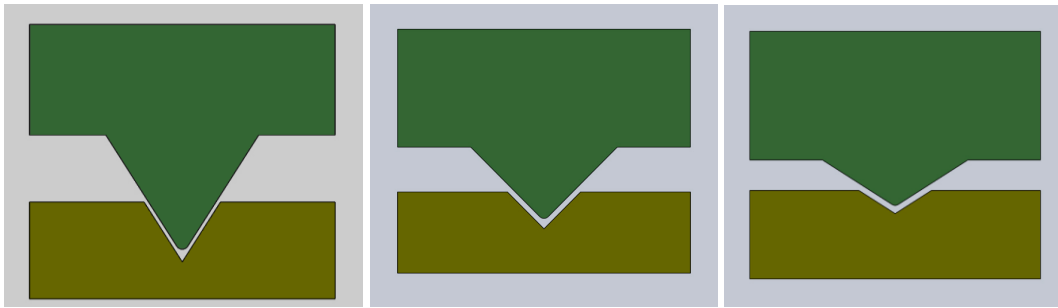
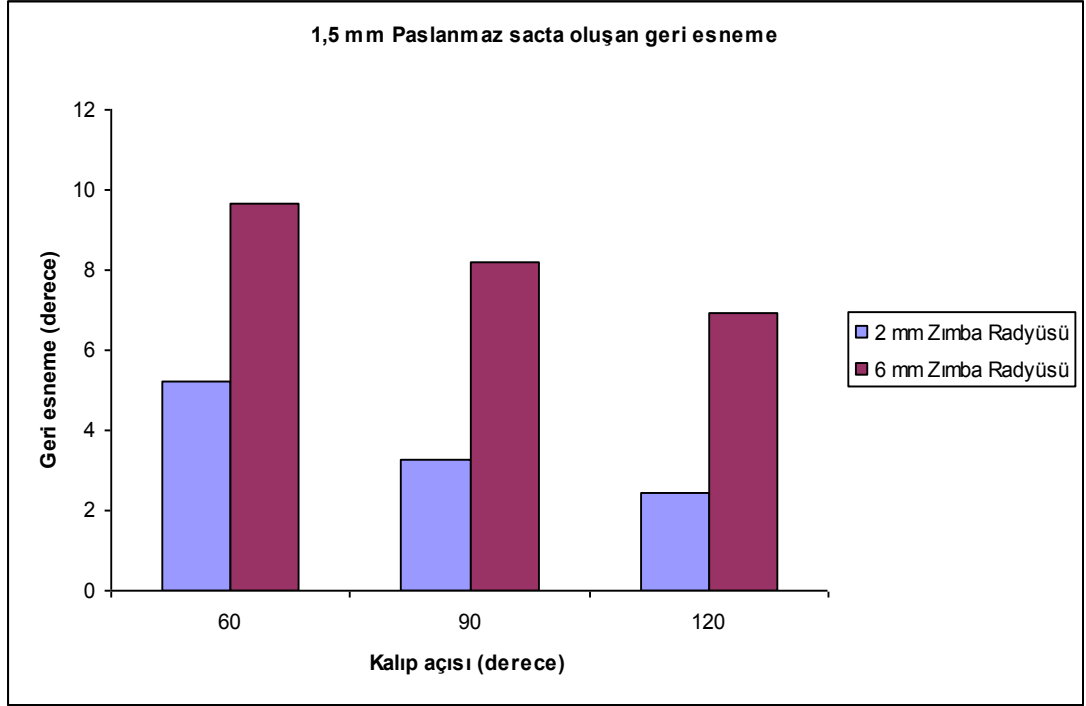
Şekil 7.3 2 mm DKP Sacta oluşan geri esneme değerleri

7.2.4 1 mm Paslanmaz Sacta oluşan geri esneme değerlerinin karşılaştırılması



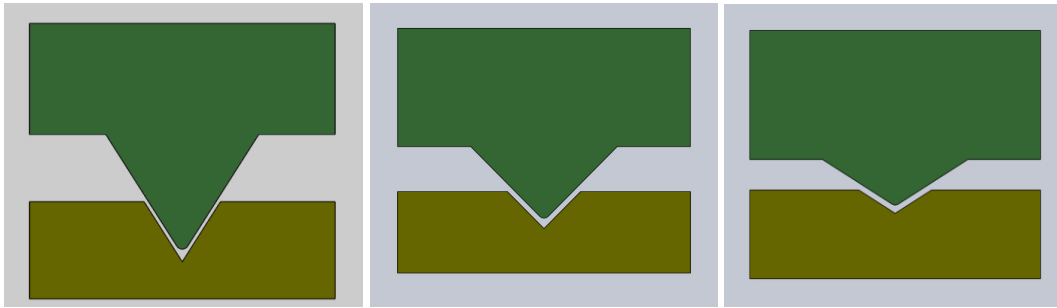
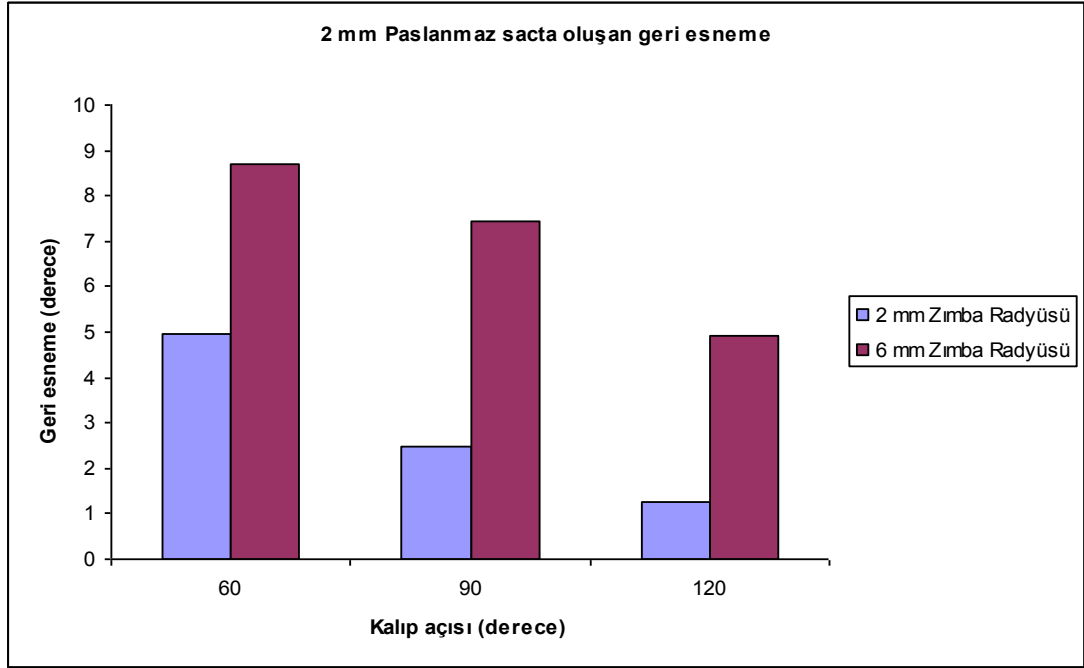
Şekil 7.4 1 mm Paslanmaz Sacta oluşan geri esneme değerleri

7.2.5 1,5 mm Paslanmaz Sacta oluşan geri esneme değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 7.5 1.5 mm Paslanmaz Sacta oluşan geri esneme değerleri

7.2.6 2 mm Paslanmaz Sacta oluşan geri esneme değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 7.6 2 mm Paslanmaz Sacta oluşan geri esneme değerleri

1, 1.5, 2 mm kalınlığındaki DKP ve Paslanmaz sacın bükülmesinde kullanılan 6 mm zımba radyüsünde oluşan geri esneme değerleri 2 mm zımba radüsünde oluşan geri esneme değerleri göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuç zımba radüsünün artmasıyla geri esneme miktarının da artığı sonucunu çıkarmaktadır. Ayrıca aynı zımba radyüslerinde oluşan geri esnemelere bakılarak bükme açısının geri esnemeye etkisini de karşılaştırmak mümkündür. Örneğin 2 mm zımba radyüs değeri ile yapılan deneylerde olduğu gibi bükme açısı arttıkça geri esnemenin azaldığı görülmüştür.

8. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada V bükme kalıbı ile bükme operasyonunda değişik kalınlıktaki DKP ve Paslanmaz sac parçaları kullanılmış olup bu parçaların farklı bükme açıları ve farklı bükme radyüslerinde geri esneme değerleri incelenmiştir.

- Kalıp ve malzeme parametreleri değişikçe geri esneme değerlerinin de değiştiği görülmüştür.
- Malzeme kalınlığının artması ile geri esneme değerinin azaldığı tespit edilmiştir.
- Bükme açısının artması ile de geri esneme değerinin azaldığı tespit edilmiştir.
- Zimba radyüsü büyüdükçe geri esneme miktarının arttığı görülmüştür.
- Sertliği fazla olan sac malzemelerde anelastik enerji büyük olduğu için geri esneme de fazla olur. Paslanmaz Sac numunesinin DKP numunesine göre akma değerleri yüksek olduğu için ($320 > 225 \text{ N/mm}^2$) daha fazla geri esneme yaptığı görülmüştür.
- Bulunan sonuçlar daha önce yapılan çalışmalar ile paralellik göstermiştir.
- Öneri olarak; geri esnemeyi ve geri esnemenin nihai parça geometrisine etkilerini minimize etmek için kullanılan fazladan bükme, ezerek bükme, gererek bükme, ters bükme, vs. şeklindeki maliyet ve zaman kaybına neden olan bu yöntemlerin yerine bu çalışmadan elde edilen veriler kullanılabilir. Ayrıca bu deney sonuçları ve yapılacak yeni çalışmalar ile farklı malzemeler

için de bu deneyler yapılarak geri esneme için matematiksel modeller çıkarılabilir.

Bu alanda çalışma yapacak arkadaşlar bükme işleminde kullanacakları kalıbı tasarlarken kalıp açıklığı ve kalıp boyutlarına dikkat etmelidir. Ayrıca geri esnemeyi azaltma çalışması yapacaklar için bükme açısı, kalınlık ve zımba radyüsü parametreleri üzerinde durması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Zhang, L., Shi, M.F., “Issues concerning material constitutive laws and parameters in springback simulations”. SAE 1999-01-(1002). (1999)
- [2] Ling, Y. E., Lee, H. P. ve Cheok, B. T., “Finite Element Analysis of Springback in Lbending of Sheet Metal”, *Journal of Materials Processing Technology*, **168**, (2005) 296-302.
- [3] Arslan, B., “Geri esnemenin sac parçaların biçim tamlığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi ve sonlu elemanlar yöntemi uygulamaları ile değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bil. Ens., İstanbul, (2004) 3-12.
- [4] Yenice, M., “Bükme ile şekillendirilen saclarda geri yaylanma davranışının incelenmesi”, Uludağ Üniversitesi Fen Bil. Ens., Bursa, (2006) 26-31.
- [5] Gan, W., and Wagoner, R. H., “Die design method for sheet springback”, *International Journal of Mechanical Sciences*, **46**, (2004) 1097-1113.
- [6] Tekiner, Z., “An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies”, *Journal of Materials Processing Technology*, **145**, (2004) 109-117.
- [7] Schey, J. E., “Introduction to Manufacturing Processes. McGraw-Hill”, NewYork (1987).
- [8] Wang, J., Verma, S., Alexander, R., and Gau, J. T., “Springback control of sheet metal air bending process”, *Journal of Manufacturing Processes*, article in pres (2007).
- [9] Chen, P., and Koç, M., “Simulation of springback variation in forming of advanced high strength steels”, *Journal of Materials Processing Technology*, **190**, (2007) 189-198.
- [10] Chen, F. K., and Ko, S. H., “Deformation analysis of springback in L- bending of sheet metal”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **18/1-2**, (2006) 339-342.
- [11] Yi, H. K., Kim, D. W., Van Tyne, C. J., and Moon, Y. H., “Analytical prediction of springback based on residual differential strain during sheet metal bending”, *Journal of Mechanical Engineering Sciences*, **222/C**, (2008) 117-129.
- [12] Wei, L. Yuying, Y., Zhongwen, X., and Lihong, Z., “Springback control of sheet metal forming based on the response-surface method and multi-objective genetic algorithm”, *Materials Science and Engineering A* **499**, (2009) 325-328.

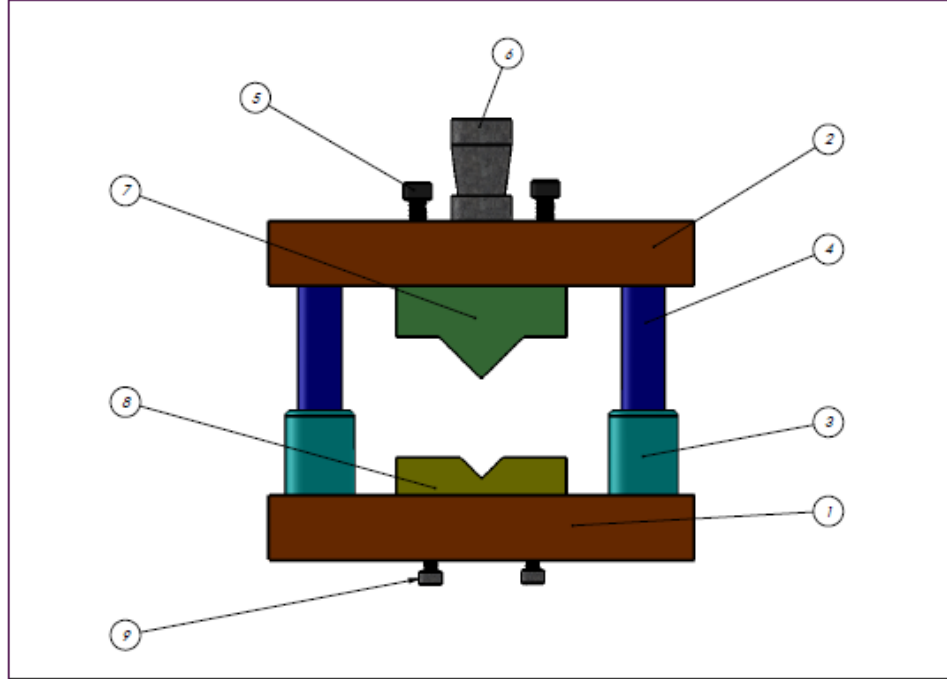
- [13] Gau, J. T., "A study of the influence of the baushinger effect on springback in two-dimensional sheet metal forming, PhD Thesis", The Ohio State University, Columbus, OHIO (1999)."
- [14] Kim, H. S., and Koç, M., "Numerical investigations on springback characteristics of aluminum sheet metal alloys in warm forming conditions", *Journal of Materials Processing Technology*, **204**, (2008) 370-383.
- [15] Müderrisoğlu, A., Livatyalı, H., Ahmetoğlu, M., Akgerman, N., and Altan, T., "Bending, flanging and hemming of aluminum and steel sheets progress report I", Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, ABC/ERC/NSM-97-R-015, The Ohio State University, Columbus, OH (1997).
- [16] Leu, D. K., "A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals", *Journal of Materials Processing Technology*, **66**, (1997) 9–17.
- [17] Hosford, W. F., and Caddell, R. M., "Metal forming: mechanics and metallurgy. Prentice Hall", New Jersey (1993).
- [18] Golovashchenko, S. F., and Bessonov, N. M., "Development of sharp flanging technology for aluminum panels", Numisheet, American Institute of Physics, **A**, (2005) 687-690.
- [19] Garcia-Romeu, M. L., Ciurana, J., and Ferrer, I., "Springback determination of sheet metals in an air bending process based on an experimental work", *Journal of Materials Processing Technology*, **191**, (2007) 174-177.
- [20] Livatyalı, H., and Altan, T., "Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer aided design methods Part 1. Experimental investigations", *Journal of Materials Processing Technology*, **117**, (2001) 262-268.
- [21] Mkaddem, A., and Saidane, D., "Experimental approach and RSM procedure on the examination of springback in wiping-die bending processes", *Journal of Materials Processing Technology*, **189**, (2007) 325-333.
- [22] Carden, W. D., Geng, L. M., Matlock, D. K., and Wagoner, R. H., "Measurement of springback", *International Journal of Mechanical Sciences*, **44**, (2002) 79-101.
- [23] Livatyalı, H., Müderrisoğlu A., Akgerman, N., and Altan, T., "Bending, flanging and hemming of aluminum and steel sheets progress report II", Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, ABC/ERC/NSM-97-R-017, The Ohio State University, Columbus, OH (1997).
- [24] Livatyalı, H., Kinzel, G. L., and Altan, T., "Computer aided die design of straight flanging using approximate numerical analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, **142**, (2003) 532-543.

- [25] Zhang, Z. T., and Lee, D., “Effects of process variables and material properties on the springback behavior of 2D-draw bending parts”, SAE, Automotive Stamping Technology, (1995) 142-147.
- [26] Bruni, C., Celeghini, M., Geiger, M., and Gabrielli, F., “A study of techniques in the evaluation of springback and residual stress in hydroforming”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer-Verlag, **33**, (2007) 929-939.
- [27] Zhang, D., Cui, Z., Chen, Z., and Ruan, X., “An analytical model for predicting sheet springback after V-bending”, *Journal of Zhejiang University Science A* **8**, (2007) 237-244.
- [28] Hosford, W. F., “Mechanical Behavior of Materials”, Cambridge University Press, Cambridge (2005).
- [29] Demirkol, M., Malzemelerin Mekanik Davranışı, Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi, İstanbul (2007).
- [30] Lazim, D., “Springback in draw-bending on aerospace alloys”, Master Thesis, McGill University, Montreal, Canada (2003).
- [31] Gomes, C., Onipede, O., and Lovell, M., “Investigation of springback in high strength anisotropic steels”, *Journal of Materials Processing Technology*, **159**, (2005) 91-98.
- [32] Geng, L. M., and Wagoner, R. H., “Role of plastic anisotropy and its evolution on springback”, *International Journal of Mechanical Sciences*, **44** (2002) 929-939.
- [33] Verma, R. K., and Haldar, A., “Effect of normal anisotropy on springback”, *Journal of Materials Processing Technology*, **190**, (2007) 300-304.
- [34] Bhupatiraju, M. K., Shivpuri, R., and Altan, T., “An investigation of bend angle and springback control in straight line bending”, Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, ERC/NSM-S-94-13, The Ohio State University, Columbus, OH (1994).
- [35] Soboyejo, W., “Mechanical Properties of Engineered Materials”, Marcel-Dekker, New York (2002).
- [36] Tang, B., Zhao, G., and Wang, Z., “A mixed hardening rule coupled with Hill48’ yielding function to predict the springback of sheet U-bending”, *International Journal of Material Forming*, **1**, (2008) 169-175.
- [37] Zeng, D., and Xia, Z. C., “A modified mroz model for springback prediction”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **16** (2007) 293-300.

- [38] Forcellese, A., Fratini, L., Gabrielli, F., and Micari, F., “The evaluation of springback in 3D stamping and coining processes”, *Journal of Materials Processing Technology*, (1998) 80-81, 108-112.
- [39] Zang, S. L., Liang, J., and Guo, C., “A constitutive model for spring- back prediction in which the change of Young’s modulus with plastic deformation is considered”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **47**, (2007) 1791-1797.
- [40] Yu, H. Y., “Variation of elastic modulus during plastic deformation and its influence on springback”, *Materials and Design*, **30**, (2009) 846-850.
- [41] Andersson, A., “Numerical and experimental evaluation of springback in advanced high strength steel”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **16** (2007) 301-307.
- [42] Kazan, R., Fırat, M., and Tiryaki, A. E., “Prediction of springback in wipe-die bending process of sheet metal using neural network”, *Materials and Design*, **30**, (2009) 418-423.
- [43] Gau, J. T., Principe, C., and Yu, M., “Springback behavior of brass in micro sheet forming”, *Journal of Materials Processing Technology*, **191**, (2007) 7-10.
- [44] Erhuy, C. G., “Soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik sacların şekillendirilebilirlik özelliği ve mekanik karakteristikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Ens., İstanbul (2001).
- [45] Yurci, M. E., “Kalıp imal tekniği”, Yıldız Teknik Üniversitesi (1989).
- [46] Turan, S. E., “Düz kenar bükme ve döner kalıpla kenar bükme işlemlerinin geri yaylanma üzerine etkilerinin deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bil. Ens., İstanbul, (2009) 3-12.

EKLER

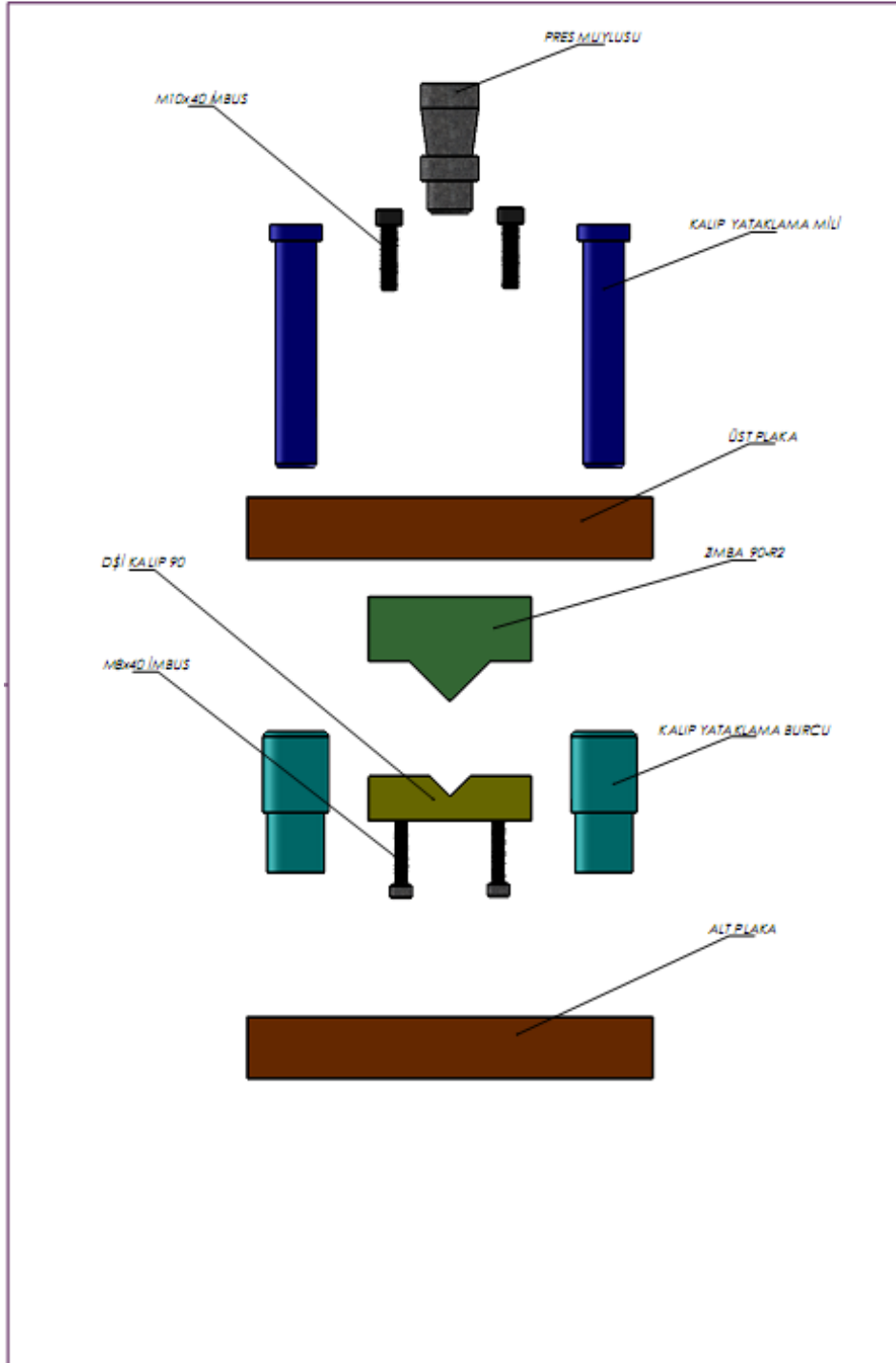
EK A.1 KALIP MONTAJI



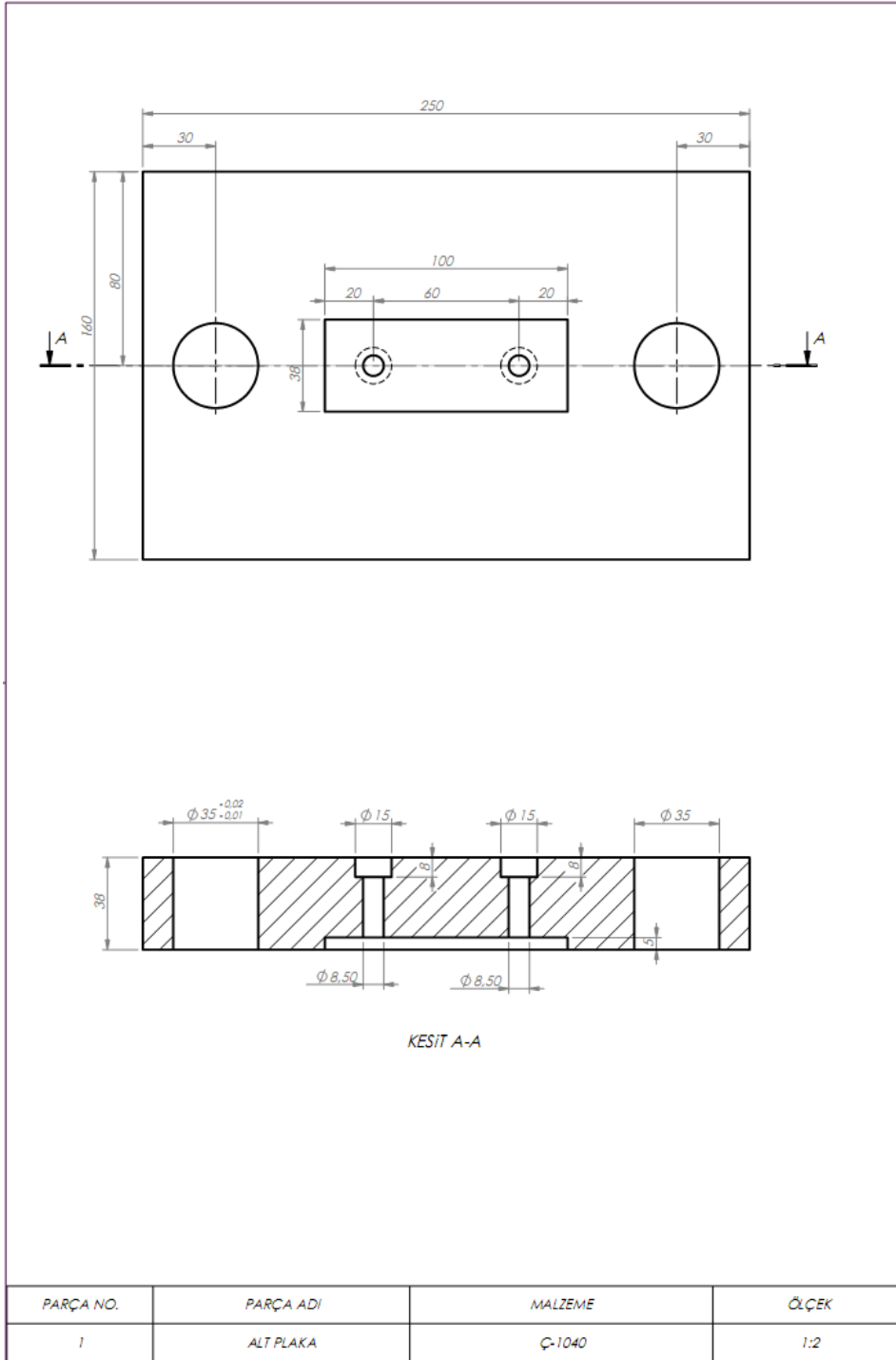
V BÜKME KALIBI

| PARÇA NO. | PARÇA ADI | MALZEME | ADET |
|-----------|-----------------------|---------|------|
| 1 | ALT PLAKA | Ç-1040 | 1 |
| 2 | ÜST PLAKA | Ç-1040 | 1 |
| 3 | KALIP YATAKLAMA BURCU | Ç-4140 | 2 |
| 4 | KALIP YATAKLAMA MİLİ | Ç-4140 | 2 |
| 5 | M10x40 İMBUS | HAZIR | 2 |
| 6 | PRES MUYLUSU | Ç-1040 | 1 |
| 7 | ZIMBA 90-R2 | 2379 | 1 |
| 8 | DİŞİ KALIP 90 | 2379 | 1 |
| 9 | M8x40 İMBUS | HAZIR | 2 |

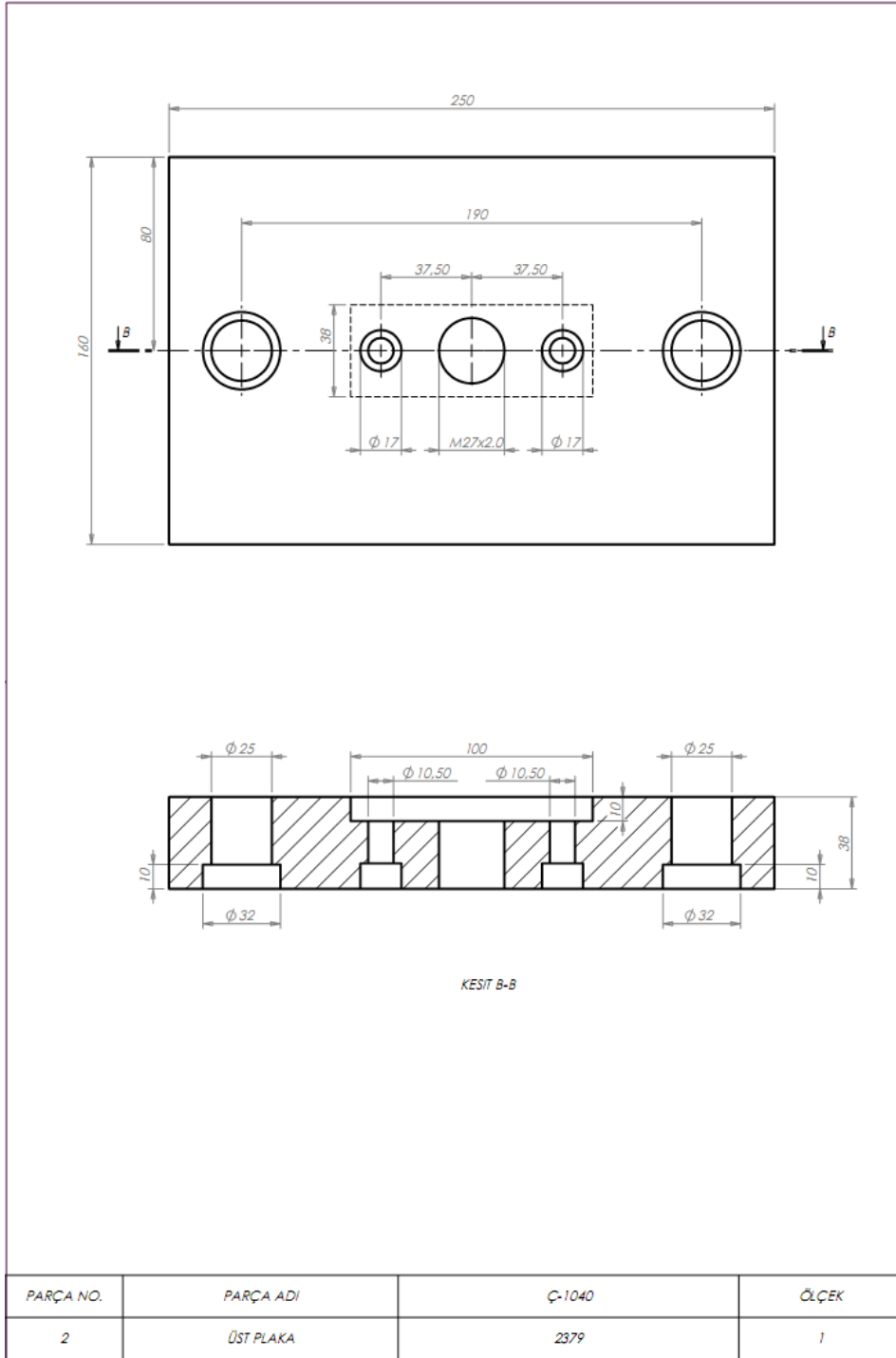
EK A.2 KALIP ELEMANLARI



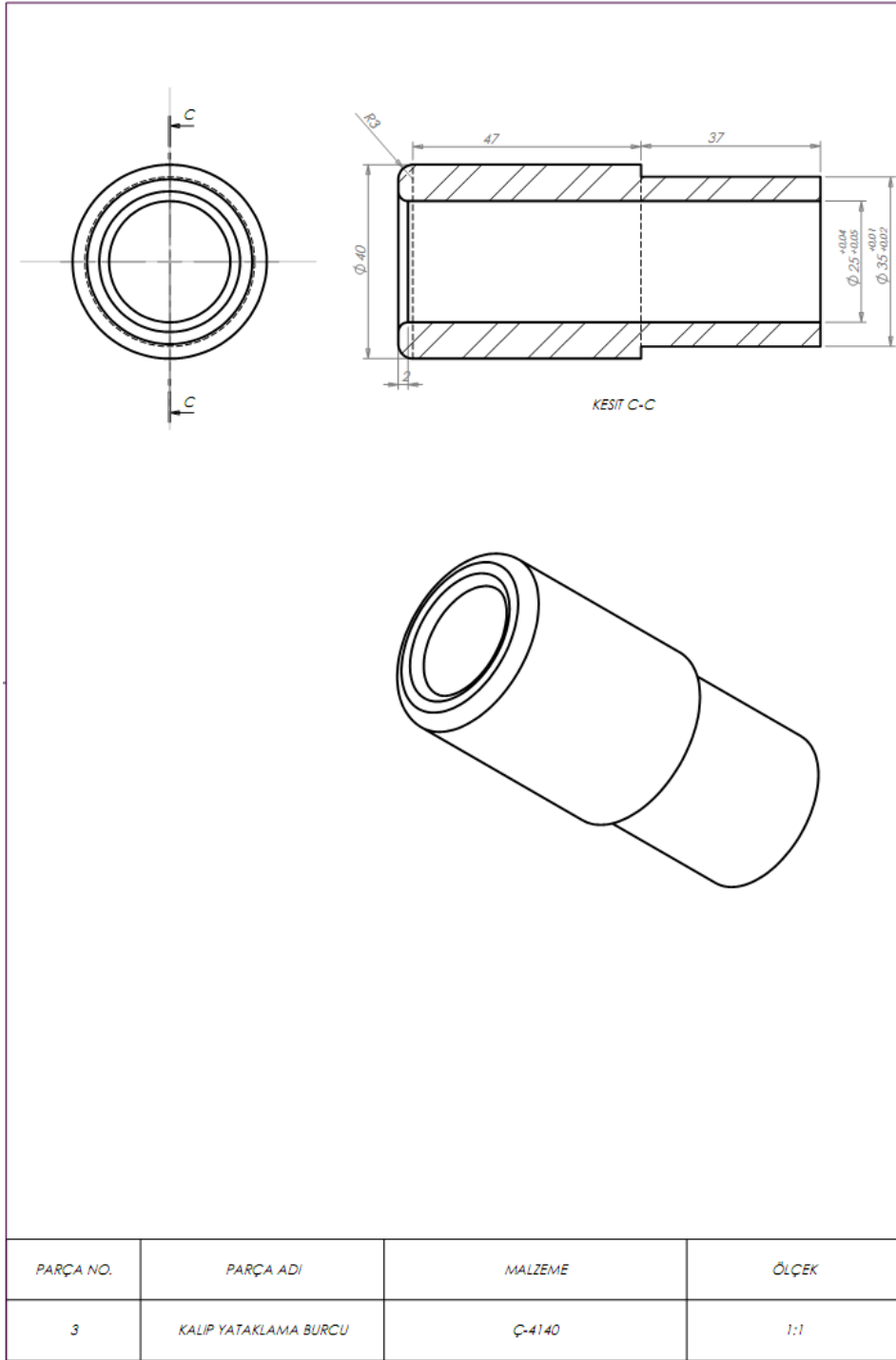
EK A.3 ALT PLAKA



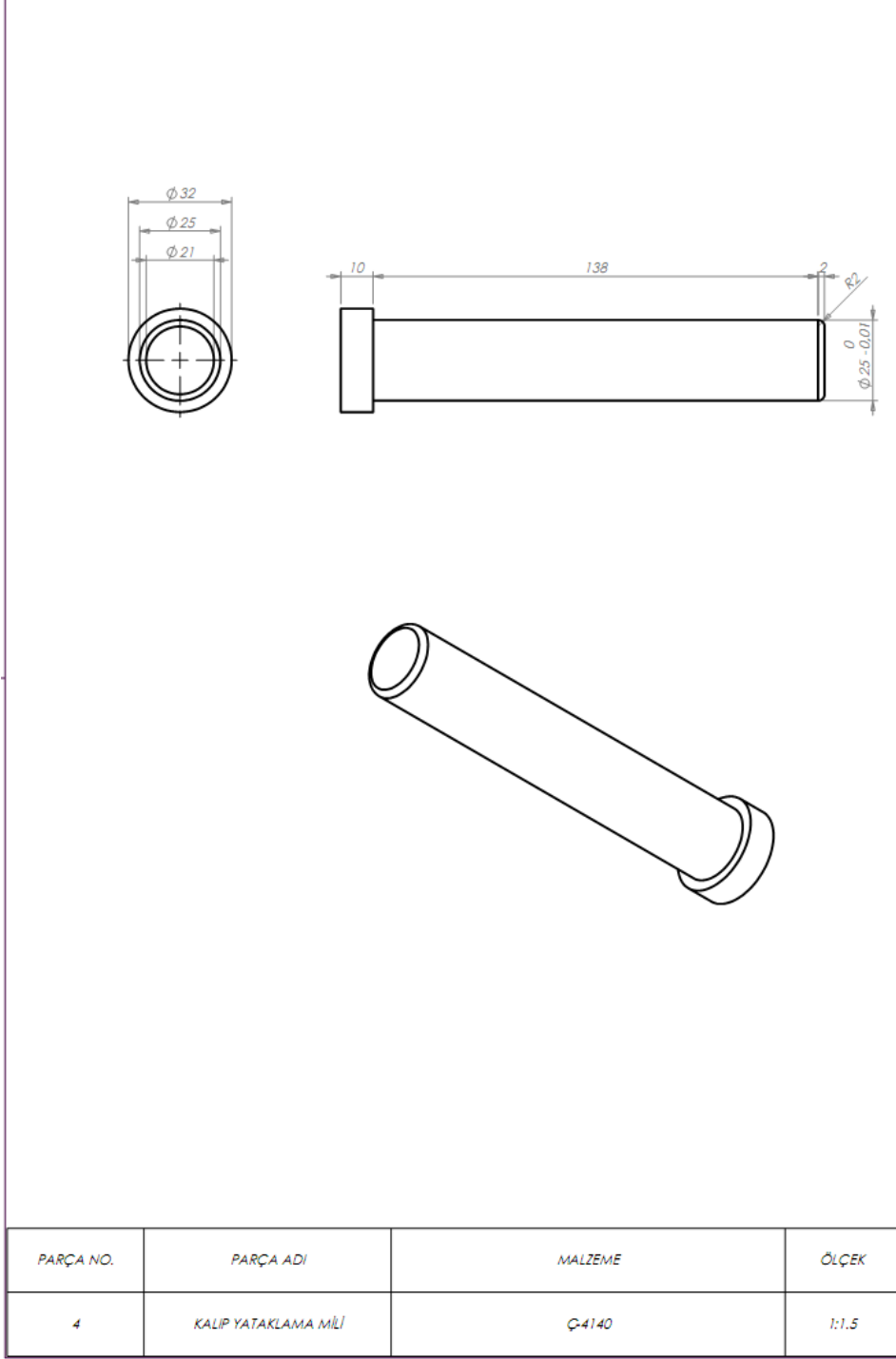
EK A.4 ÜST PLAKA



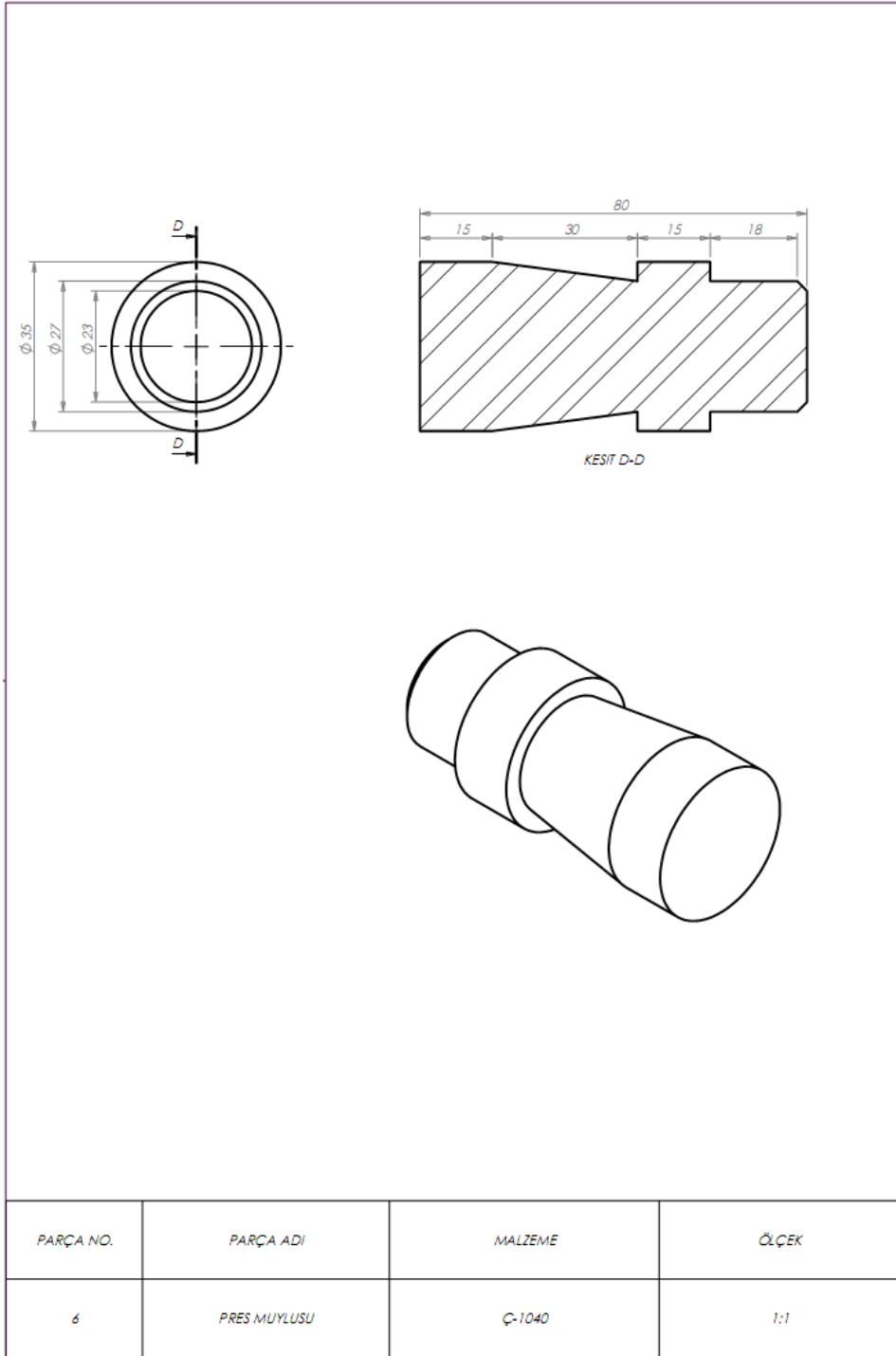
EK A.5 KALIP YATAKLAMA BURCU



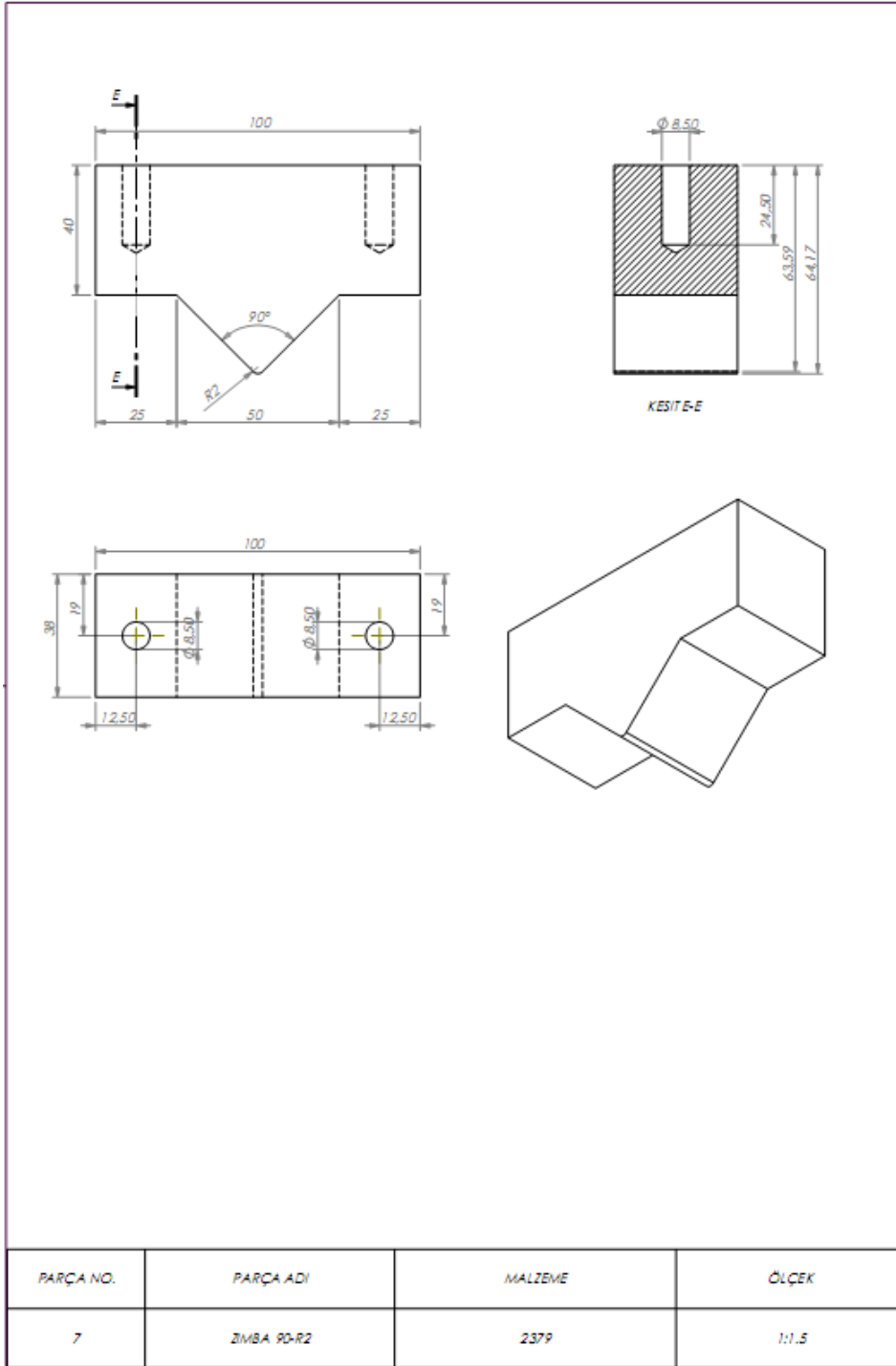
EK A.6 KALIP YATAKLAMA MİLİ



EK A.7 PRES MUYLUSU



EK A.8 ZIMBA



EK A.9 DİŞİ KALIP

