

1.5415 (16Mo3) SAC MALZEMENİN GERİ-İLERİ ESNEME MİKTARI VE DEFORMASYON İLİŞKİSİNİN DENEYSEL VE MATEMATİKSEL OLARAK İNCELENMESİ

Mustafa ÖZDEMİR

DOKTORA TEZİ MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞUBAT 2015

Mustafa ÖZDEMİR tarafından hazırlanan "1.5415 (16Mo3) SAC MALZEMENİN GERİ-İLERİ ESNEME MİKTARI VE DEFORMASYON İLİŞKİSİNİN DENEYSEL VE MATEMATİKSEL OLARAK İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Eğitimi Anabilim Dalı Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Hakan DİLİPAK İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum İkinci Danışman: Doç. Dr. Bülent BOSTAN Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum Başkan : Prof. Dr. İhsan KORKUT İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum Üye : Doç. Dr. Ahmet GÜRAL Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum Üye : Doç. Dr. Abdulmecit GÜLDAŞ İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum Üye : Yrd. Doç. Dr. Sıddık Arslan Bankacılık Sigortacılık Yüksekokulu, Sigortacılık Bölümü, Gazi Üniversitesi Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum Üye : Yrd. Doç. Dr. Hakan GÖKMEŞE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Necmettin Erbakan Üniversitesi Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 02/02/2015

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU Fen Bilimleri Enstitüsü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....

Mustafa ÖZDEMİR 2/2/2015

1.5415 (16Mo3) SAC MALZEMENİN GERİ-İLERİ ESNEME MİKTARI VE DEFORMASYON İLİŞKİSİNİN DENEYSEL VE MATEMATİKSEL OLARAK İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Mustafa ÖZDEMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2015

ÖZET

Calismada, 16Mo3 sac malzemenin V dip bükme operasyonu neticesindeki ileri ve geri esneme davranışı incelenmiştir. Aynı zamanda, bükme işleminin, normalizasyon ve menevişleme işlemine tabi tutulan 16Mo3 sac malzemelere olan etkisi mikro yapısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, sac malzeme kalınlığının ileri ve geri esneme davranışı üzerine olan etkilerini incelemek amacıyla; 3, 4, 5 ve 6 mm kalınlığındaki ısıl işlemsiz (II), normalizasyon (NI) ve menevişleme uygulanmış (MI) sac malzemeler 30°, 60° ve 90° bükme açılarında ve R4,5 mm zımba uç yarıçapında sekillendirilerek ileri ve geri esneme davranışı incelenmiştir. Ayrıca, 4 mm kalınlığındaki II, NI ve MI uygulanmış sac malzemeler 90° bükme acısı kullanılarak R2, R3, R4, R5 ve R6 mm zımba uc varıcaplarının ileri ve geri esneme değerleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Bükme işlemleri zımba sac malzeme bükme bölgesinde direk ve 30 s bekletilip kaldırılmak koşuluyla deneyler gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, II, NI ve MI malzemeler üzerine çekme testleri uygulanarak akma ve çekme dayanımları gibi mekanik özellikleri incelenmiştir. Üçüncü aşamada, bükme işlemleri uygulanmış; II, NI ve MI sac malzemelerin orta deformasyon bölgesinden parçacıklar çıkartılarak ferrit fazı, perlit ve martenzit yapısı mikro yapısal olarak karakterize edilmiştir. Son olarak, bükme parametrelerinin ileri ve geri esneme davranışları üzerine olan etkisini incelemek amacıyla, minitab analiz programı kullanılarak bükme parametrelerinin etkisi sayısal ve matematiksel modeller oluşturularak incelenmiştir. Deneyler neticesinde, II ve NI uygulanmış sac malzemelerde ileri esneme davranışı meydana gelirken, MI uygulanmış malzemelerde ise, geri esneme davranışı meydana geldiği belirlenmiştir. 30° bükme işleminde, II ve NI sac malzemelerin kalınlığı arttıkça, ileri esneme değeri artarken, 60° ve 90° bükme işlemlerinde sac malzeme kalınlığı arttıkça ileri esneme değeri azaldığı tespit edilmiştir. MI malzemelerde ise, sac malzeme kalınlığı arttıkça geri esneme miktarının azaldığı belirlenmiştir. II ve NI malzemelerde zımba uç yarıçap değeri arttıkça ileri esneme değeri azalırken, MI malzemelerde ise, geri esneme davranışının arttığı tespit edilmiştir.

| Bilim Kodu | : | 708.3.028 |
|-------------------|---|--|
| Anahtar Kelimeler | : | Geri ve ileri esneme, bükme kalıpları, metallerin deformasyonu |
| Sayfa Adedi | : | 205 |
| Danışman | : | Doç. Dr. Hakan DİLİPAK |
| İkinci Danışman | : | Doç. Dr. Bülent BOSTAN |

INVESTIGATION AS EXPERIMENTAL AND MATHEMATICALLY OF DEFORMATION RELATION AND AMOUNT OF SPRING BACK/GO OF 1.5415 (16Mo3) SHEET MATERIALS

(Ph. D. Thesis)

Mustafa ÖZDEMİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2015

ABSTRACT

In this study, the spring back and spring go behavior in the V bottoming bending operation results of 16Mo3 sheet materials are examined. At the same time, effects on the 16Mo3 sheet metal applied normalization and tempering process of the bending process have been investigated as micro structural. The experimental study was carried out in four stages. In the first stage, in order to examine the effects on the spring back and spring go behavior of the sheet metal thickness, 3, 4, 5 and 6 mm thick sheet metals (unheated treatment (II), normalized (NI) and tempered (MI)) were investigated spring back and spring go behavior by shaping 30°, 60° and 90° bending angle and R4,5 mm punch tip radius. Additionally, 4 mm thick sheet metals (II, NI and MI) were bent 90° bending angle and R2, R3, R4, R5 and R6 mm punch tip radius and then effect on values of spring back and spring go of this processes have been examined. Bending processes were performed with the punch unloading waiting direct and on the part 30 s in the sheet metal bending zone. In the second stage, by applying tensile tests on II, NI and MI materials, the mechanical properties of the material such as yield and tensile strengths were investigated. In the third stage, particles from middle deformation zone of the sheet metals (unheated-treatment, normalized and tempered) applied bending processing were cut and micro-structural ferrite phase, pearlite and martensitic structure of the particles have been characterized. Finally, in order to investigate the effect on spring back and spring go behavior of bending parameters, effect of bending parameters have been examined by creating numerical and mathematical models using Minitab analysis program. According to experiment results, sheet metals applied II and NI have been occurred spring go behavior conversely sheet metals applied MI have been shown to occur spring back behavior. In the 30° bending processing, II and NI sheet material thickness increases spring go value increased. In the 60° and 90° bending processing, increasing thickness of sheet material have been identified spring go values decreased. In the material MI is determined that the sheet thickness increases, the amount of spring-back decreases. In the II and NI materials, increasing punch tip radius value decreased spring go value. MI materials, increasing punch tip radius value increased spring back value.

| Science Code | : | 708.3.028 |
|---------------|---|--|
| Key Words | : | Spring back and go, bending die, deformation of metals |
| Page Number | : | 205 |
| Supervisor | : | Assoc. Prof. Dr. Hakan DİLİPAK |
| Co-Supervisor | : | Assoc. Prof. Dr. Bülent BOSTAN |

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve doktora tez çalışmalarım süresince her türlü yardımı esirgemeyen, bana yol gösteren rehberlik yapan ve yardımını hiçbir zaman, hiçbir konu da esirgemeyen, aynı zamanda tez çalışmalarımın yürütülmesinde değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım çok kıymetli hocalarım Doç Dr. Hakan DİLİPAK ve Doç Dr. Bülent BOSTAN' a sonsuz teşekkür ve şükranlarımı en içten dileklerimle sunarım.

Deney düzeneğinin kurulmasında ve deneysel çalışmalar esnasında desteklerinden dolayı EFOR GRUP' a şirket müdürü Kasım YÜKSEL ve Muammer YILMAZ' a, çalışmaların sırasında hiç çekinmeden değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım kıymetli hocalarım, Doç. Dr. Abdulmecit GÜLDAŞ ve Doç. Dr. Ahmet GÜRAL hocalarıma ve deneyler sırasında tecrübelerinden ve bilgilerinden yararlandığım Yrd. Doç Dr. Sıddık Arslan, Yrd. Doç Dr. Hakan Gökmeşe ve Doç. Dr. Zakir TAŞ hocama desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Çalışmalarım boyunca sürekli yanımda olan dostlarım, Sadullah UĞUR' a, Halit DEMİRBİLEK' e, Murat Kenan KAYACAN' a, Ömer TÜRKCAN' a, Arş. Gör. Hasan ULUTAŞ' a, Okut. Volkan YILMAZ' a, Öğr. Gör. Sinan AKSÖZ, Öğr. Gör. Onur ALTUNTAŞ' a teşekkür ve saygılarımı sunuyorum.

Tüm yaşamım boyunca beni destekleyen, en zor anlarımda yanımda olan ve mesleki yaşantımı oluşturan bu süreçte bana yol gösteren rahmetli babacığıma, anneme ve kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

| ÖZET | iv |
|---|-------|
| ABSTRACT | v |
| TEŞEKKÜR | vi |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ | xii |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ | xiii |
| RESİMLERİN LİSTESİ | xvi |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | xviii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI | 3 |
| 2.1. Geri Esneme Üzerine Yapılan Çalışmalar | 3 |
| 2.2. İleri Esneme Üzerine Yapılan Çalışmalar | 14 |
| 2.3. Literatür Çalışmalarının Değerlendirilmesi | 17 |
| 3. SAC METALLERDE BÜKME | 19 |
| 3.1. Bükme | 19 |
| 3.2. Bükme Tekniği | 19 |
| 3.3. Bükme Tekniği Çeşitleri | 20 |
| 3.3.1. V dip bükme | 22 |
| 3.3.2. Serbest bükme | 23 |
| 3.3.3. Kenar bükme | 24 |
| 4. BÜKMEDE GERİ VE İLERİ ESNEME | 25 |
| 4.1. Geri ve İleri Esneme Miktarına Etki Eden Faktörler | 26 |
| 4.1.1. Malzeme özelliklerinin geri ve ileri esneme miktarına etkisi | 26 |
| 4.1.2. Malzeme kalınlığının geri ve ileri esneme miktarına etkisi | 28 |

| 4.1.3. Zımbanın sac malzeme üzerinde bekleme süresinin etkisi | 28 |
|---|----|
| 4.1.4. Hadde yönünün geri ve ileri esnemeye etkisi | 28 |
| 4.1.7. Bükme açısının geri ve ileri esnemeye etkisi | 32 |
| 4.1.8. Federlemenin geri ve ileri esnemeye etkisi | 32 |
| 4.1.9. Kalıp boşluğunun geri ve ileri esnemeye etkisi | 33 |
| 4.1.10. Bauschinger etkisinin geri ve ileri esnemeye etkisi | 33 |
| 4.1.11. Tane boyutu | 34 |
| 4.1.12. Kalıntı gerilmeler | 35 |
| 4.1.13. İşlem parametrelerinin geri ve ileri esnemeye etkisi | 36 |
| 4.2. Bükmede Geri ve İleri Esnemeyi Giderme Yöntemleri | 36 |
| 4.2.1. Zımba bükme açısının arttırılması veya azaltılması | 37 |
| 4.2.2. Taban (ezme) bükme | 38 |
| 4.2.3. Gerdirme bükme | 38 |
| 4.2.4. Zımba ucunun iç bükey yapılması | 39 |
| 4.2.5. Zımbanın malzeme üzerinde bekletilmesi | 40 |
| 5. METALLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ | 41 |
| 5.1. Çekme Deneyi | 41 |
| 5.1.1. Elastik şekil değişimi | 43 |
| 5.1.2. Plastik şekil değiştirme | 45 |
| 5.2. Malzemelerin Mukavemetini Artırıcı İşlemler | 51 |
| 5.2.1. Soğuk işlem | 52 |
| 5.2.2. Alaşım sertleşmesi | 55 |
| 5.2.3. Tane boyutunu küçültme | 55 |
| 5.2.4. Martenzitik dönüşüm sertleşmesi | 56 |

| | 5.2.5. Deformasyon yaşlanması | 56 |
|----|---|----|
| | 5.3. Kırılma | 57 |
| | 5.3.1. Gevrek kırılma | 57 |
| | 5.3.2. Sünek kırılma | 59 |
| | 5.4. Gerçek Gerilme Uzama (σ-ε) | 60 |
| | 5.5. Alaşım Elementlerinin Çelik Yapısına Etkileri | 62 |
| 6. | ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER | 69 |
| | 6.1. Tavlama | 71 |
| | 6.1.1. Yumuşatma tavlaması | 72 |
| | 6.1.2. Normalizasyon tavlaması | 73 |
| | 6.1.3. Gerilim Giderme Tavlaması | 75 |
| | 6.1.4. Su verme tavlaması | 75 |
| | 6.2. Sertleştirme | 78 |
| | 6.3. Menevişleme | 78 |
| | 6.4. Sayısal Analiz | 81 |
| | 6.4.1. İki faktörlü düzen | 81 |
| | 6.4.2. Üç faktörlü düzen | 83 |
| 7. | MATERYAL ve METOT | 85 |
| | 7.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme | 86 |
| | 7.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması | 87 |
| | 7.3. Deneysel Çalışmada Kullanılan Bükme Kalıbı | 89 |
| | 7.4. Deneysel Çalışmada Kullanılan Makine ve Cihazlar | 92 |
| | 7.4.1. Sac kesme makası | 92 |
| | 7.4.2. Tavlama fırını | 93 |

| 7.4.3. Hidrolik pres | 94 |
|---|-----|
| 7.4.4. Ölçme işleminde kullanılan cihazlar | 95 |
| 7.5. Malzeme Karakterizasyonu | 96 |
| 7.5.1. Mikro yapı incelemeleri | 96 |
| 7.5.2. Sertlik ölçümleri | 97 |
| 7.5.3. Çekme deneyleri | 98 |
| 7.6. Metot | 99 |
| 8. DENEYSEL SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME | 103 |
| 8.1. Bükmede Geri ve İleri Esnemenin Değerlendirilmesi | 104 |
| 8.1.1. 30°' lik bükme deneyleri | 104 |
| 8.1.2. 60°' lik bükme deneyleri | 112 |
| 8.1.3. 90°' lik bükme deneyleri | 125 |
| 8.1.4. Farklı zımba uç radyüsü ile 90°' lik bükme deneyleri | 141 |
| 8.2. Deneysel Verilerin Varyans Analiz Sonuçları | 147 |
| 9. SONUÇLAR ve ÖNERİLER | 159 |
| 9.1. Öneriler | 163 |
| KAYNAKLAR | 165 |
| EKLER | 173 |
| EK-1(a). Sac malzeme sertifikaları | 174 |
| EK-1(b). Test sonuçları-1 | 176 |
| EK-1(c). Kimyasal analiz-1 | 178 |
| EK-2. Uygulanan ısıl işlem sonrası ağırlıkça kimyasal bileşim sonuçları | 180 |
| EK-3. Bükme kalıbı ve elemanları | 181 |
| EK-4. 30° bükülmüş II, NI ve MI malzemelerin mikro yapı resimleri | 188 |

| EK-5. 60° bükülmüş II, NI ve MI malzemelerin mikro yapı resimleri | 191 |
|---|-----|
| EK-6. 90° bükülmüş II, NI ve MI malzemelerin mikro yapı resimleri | 194 |
| EK-7. II, NI ve MI malzemelerin çekme deney sonuçları | 197 |
| EK-8. Deney sonuçları ve esneme değerlerinin aritmetik ortalamaları | 199 |
| EK-9. Farklı radyüsler kullanılarak elde edilen deney sonuçlarının aritmetik ortalamaları | 202 |
| ÖZGEÇMİŞ | 204 |

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge | Sayfa |
|--|-------|
| Çizelge 4.1. Tek taraflı kalıp boşluğu değerleri | 33 |
| Çizelge 5.1. Alaşım elementlerinin çelik özelliklerine etkisi | 68 |
| Çizelge 6.1. İki faktörlü sabit etkili bir düzen için varyans analizi sonuç tablosu | 82 |
| Çizelge 6.2. Üç faktörlü sabit etkili bir düzen için varyans analizi sonuç tablosu | 83 |
| Çizelge 7.1. 16Mo3 sac malzemenin kimyasal bileşimi | 87 |
| Çizelge 7.2. 16Mo3 sac malzemenin mekanik özellikleri | 87 |
| Çizelge 7.3. 16Mo3 sac malzemelerin normalizasyon ve menevişleme sıcaklıklarında bekleme süreleri | 88 |
| Çizelge 7.4. Makas çeliğinin kimyasal kompozisyonu | 90 |
| Çizelge 7.5. Farklı kalınlıktaki sac malzemeler ve 4 mm için alınan zımba uç yarıçapları | 92 |
| Çizelge 7.6. Pres tezgâhının genel özellikleri | 95 |
| Çizelge 7.7. Deneysel çalışmada kullanılan bükme parametreleri | 101 |
| Çizelge 8.1. II, NI ve MI malzemelerin çekme deney sonuçları | 129 |
| Çizelge 8.2. Sac malzemelerin HV sertlik değerlerinin aritmetik ortalaması | 129 |
| Çizelge 8.3. Geri ve ileri esneme değerleri için varyans analiz sonuçları | 148 |
| Çizelge 8.4. Yeniden oluşturulan modelin varyans analiz sonuçları | 150 |
| Çizelge 8.5. Farklığın kaynağını belirlemek için yapılan Tukey testi sonuçları | 152 |
| Çizelge 8.6. Varyans analizi neticesinde elde edilen faktör ve düzey etkileri | 154 |
| Çizelge 8.7. Farklı zımba yarıçapları için yeniden oluşturulan varyans analiz modeli | 154 |
| Çizelge 8.8. 90° bükmede farklığın kaynağını belirlemek için yapılan Tukey testi sonuçları | . 157 |

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil | Sayfa |
|--|-------|
| Şekil 3.1. Bükme işlemi neticesinde meydana gelen basma ve çekme gerilmesi | 19 |
| Şekil 3.2. Bükme işlem çeşitleri-1 | 20 |
| Şekil 3.3. Bükme işlem çeşitleri-2 | 21 |
| Şekil 3.4. Bükme işlem çeşitleri-3 | 21 |
| Şekil 3.5. Bükme işlem çeşitleri-4 | 22 |
| Şekil 3.6. V dip bükme tekniği | 23 |
| Şekil 3.7. Serbest V bükme işlemi | 23 |
| Şekil 3.8. Kenar bükme işlemi ve elemanları | 24 |
| Şekil 4.1. Bükmede geri ve ileri esnemenin belirlenmesi | 25 |
| Şekil 4.2. Gerilme-gerinim diyagramı | 27 |
| Şekil 4.3. Bükmenin sebep olduğu atom hareketleri | 27 |
| Şekil 4.4. Metallerin haddeleme yönleri | 29 |
| Şekil 4.5. Bükme işleminde hadde yönünün gösterilmesi | 29 |
| Şekil 4.6. V bükme işlemi ve kuvveti | 30 |
| Şekil 4.7. Farklı biçim ve kalınlıkta federleme işlemi | 32 |
| Şekil 4.8. Bauschinger etkisinde akma dayanımında meydana gelen düşüş | 34 |
| Şekil 4.9. Kalıntı gerilmeler | 35 |
| Şekil 4.10. Bükmede meydana gelen gerilmeler ve geri-ileri esneme kuvvetleri | 37 |
| Şekil 4.11. Bükme açısının azaltılması ve arttırılması | 37 |
| Şekil 4.12. Ezerek bükme işlemi | 38 |
| Şekil 4.13. Gerdirme bükme tekniği | 39 |
| Şekil 4.14. Zımba ucunun iç bükey yapılması yöntemi | 40 |
| Şekil 5.1. Çekme cihazı ve elde edilen gerilim-uzama eğrisi | 42 |

| Şekil | Sayfa |
|--|-------|
| Şekil 5.2. Poisson oranının belirlenmesi | 44 |
| Şekil 5.3. Plastik deformasyon bölgesi | 45 |
| Şekil 5.4. Soğuk deformasyon mekanizmaları | 46 |
| Şekil 5.5. Gerilim-uzama (σ-ε) eğrisi | 47 |
| Şekil 5.6. Kenar dislokasyonunda tırmanma mekanizması | 49 |
| Şekil 5.7. Gerilim-uzama eğrisinde belirgin akma davranışının gösterilmesi | 50 |
| Şekil 5.8. Gerilim-uzama eğrisinde lüders bantlarının gösterilmesi | 51 |
| Şekil 5.9. Soğuk şekil vermede malzeme özellikleri | 52 |
| Şekil 5.10. Mekanik özelliklerin değişimi | 53 |
| Şekil 5.11. Soğuk deformasyona uğramış yeniden kristalleşmiş mikro yapı | 54 |
| Şekil 5.12. Tane boyutunun sıcaklık ve zamana göre değişimi | 55 |
| Şekil 5.13. Az karbonlu bir çelikte deformasyon yaşlanmasının çekme diyagramına etkisi | 56 |
| Şekil 5.14. Çatlak oluşma mekanizmaları | 59 |
| Şekil 5.15. Gerçek mühendislik gerilme gerinim grafiği | 61 |
| Şekil 6.1. Fe-C denge diyagramında tavlama yöntemleri ve uygulama sıcaklıkları | 71 |
| Şekil 6.2. %0,2 C içeren çeliğin içyapısında tavlama işlemi sırasında meydana gelen değişimlerin şematik gösterimi | 72 |
| Şekil 6.3. Ötektoid altı ve ötektoid üstü çeliklerin mikro yapısı | 73 |
| Şekil 6.4. Normalizasyon sonrasında küçük tane oluşması | 74 |
| Şekil 6.5. Su verme işleminde martenzitik yapı oluşumu | 76 |
| Şekil 6.6. TTT (Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm) diyagramı | 77 |
| Şekil 6.7. Su verme sonrasında uygulanan temperleme işlemi | 79 |
| Şekil 6.8. Menevişleme sonrasındaki mekanik özelliklerin değişimi | 80 |
| Şekil 6.9. Faktöriyel deney etkileşim grafikleri | 81 |

xv

| Şekil 7.1. Deneysel çalışmada iş akış şeması | 86 |
|---|-----|
| Şekil 7.2. 16Mo3 sac malzemenin CCT diagramı | 89 |
| Şekil 7.3. 90° bükme işlemi için alınan farklı zımba yarıçap değerleri | 91 |
| Şekil 7.4. Deneysel çalışmaların yapıldığı pres tezgahı ve bölümleri | 94 |
| Şekil 7.5. Deney numuneleri | 96 |
| Şekil 7.6. Çekme deneyi numunesi | 99 |
| Şekil 8.1. Farklı kalınlıktaki sac malzemelerin 30° bükme işlemi neticesinde elde edilen geri ve ileri esneme miktarı | 104 |
| Şekil 8.2. Bükmede geri ve ileri esneme prensibi | 105 |
| Şekil 8.3. Geri ve ileri esneme miktarları ve elde edilen polinom eğri denklemi | 110 |
| Şekil 8.4. Farklı kalınlıktaki II, NI ve MI uygulanmış sac malzemelerin 60° bükme işleminde elde edilen geri ve ileri esneme miktarı | 113 |
| Şekil 8.5. 60° Bükme işlemi neticesinde elde edilen polinom eğri denklemleri | 124 |
| Şekil 8.6. II ve NI malzemelerin genel EDS kimyasal analizi | 121 |
| Şekil 8.7. Farklı kalınlıktaki II, NI ve MI uygulanmış sac malzemelerin 90° bükme işleminde elde edilen geri ve ileri esneme miktarı | 126 |
| Şekil 8.8. Geri ve ileri esneme miktarları ve elde edilen polinom eğri denklemi | 140 |
| Şekil 8.9. II, NI ve MI uygulanmış sac malzemelerin farklı zımba uç radyüsleriyle 90°bükme işlemi neticesinde elde edilen geri ve ileri esneme miktarı | 141 |
| Şekil 8.10. Zımba uç radyüsleri ile elde edilen geri-ileri esneme miktarlarının polinom eğri <u>denklemleri</u> | 146 |
| Şekil 8.11. Varyans analizi artıklar için elde edilen grafikler | 149 |
| Şekil 8.12.Yeniden oluşturulan modelde Varyans analizi artıklar için elde edilen grafikler | 151 |
| Şekil 8.13. 90° bükme işleminde Varyans analizi artıklar için elde edilen grafikler | 155 |
| Şekil 8.14. Farklı zımba yarıçapları ile Varyans analizi artıklar için elde edilen grafikler | 156 |

Şekil

RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim | Sayfa |
|---|-------|
| Resim 5.1. Gevrek kırılma | 58 |
| Resim 5.2. Koni-çanak biçimindeki kırılma yüzeylerinin görünümü | 60 |
| Resim 6.1. Martenzitik yapı | 77 |
| Resim 7.1. Deney numuneleri | 87 |
| Resim 7.2. Deneysel çalışmada kullanılan bükme kalıbı ve bükme zımbaları | 90 |
| Resim 7.3. Baykal HNC Serisi Hidrolik Giyotin Makas | 92 |
| Resim 7.4. BMK-10 marka dijital termostatlı fırın | 93 |
| Resim 7.5. Numunelerin açısını ölçmede kullanılan CMM cihazı | 95 |
| Resim 7.6. JOEL JSM–6060LV model taramalı elektron mikroskobu ve EDS bağlantısı | 97 |
| Resim 7.7. Mikro sertlik ölçüm cihazı | 97 |
| Resim 7.8. Çekme deney düzeneği | 98 |
| Resim 8.1. 3 mm kalınlığındaki II, NI ve MI sac malzemenin deformasyon alanlarının_mikro yapı görüntüleri | 106 |
| Resim 8.2. Sac malzemelerin SEM görüntüsü | 108 |
| Resim 8.3. 6 mm kalınlığındaki numunelerin 60° bükme işlemleri neticesinde elde edilen | 115 |
| Resim 8.4. II malzemenin SEM cihazında elde edilen görüntüsü | 116 |
| Resim 8.5. II malzemede elde edilen EDS analiz sonuçları-1 | 117 |
| Resim 8.6. II malzemede elde edilen EDS analiz sonuçları-2 | 118 |
| Resim 8.7. NI uygulanmış malzemenin SEM görüntüsü | 119 |
| Resim 8.8. NI malzemede elde edilen EDS analiz sonuçları | 119 |
| Resim 8.9. MI malzemenin SEM cihazında elde edilen görüntüsü | 122 |
| Resim 8.10. MI malzemede elde edilen EDS genel analiz sonuçları | 122 |

| Resim | ayfa |
|---|------|
| Resim 8.11. 5 mm kalınlığındaki sac malzemelerin 90° bükme işleminde elde edilen mikro yapı görüntüleri | 128 |
| Resim 8.12. II numunelerin çekme testi sonrasında kopma yüzeyleri | 131 |
| Resim 8.13. NI numunelerin çekme testi sonrasında kopma yüzeyleri | 132 |
| Resim 8.14. MI numunelerin çekme testi sonrasında kopma yüzeyleri | 132 |
| Resim 8.15. II malzemenin 90° bükülmesi ile elde edilen SEM görüntüsü | 135 |
| Resim 8.16. II malzemenin 90° bükme işleminde elde edilen mikro yapısının EDS analizi | 135 |
| Resim 8.17. NI malzemenin 90° bükülmesi neticesinde elde edilen SEM görüntüsü | 137 |
| Resim 8.18. NI malzemeden elde edilen EDS analizi sonuçları | 138 |
| Resim 8.19. II, NI ve MI malzemelerin mikro yapı görüntüleri | 143 |
| Resim 8.20. Isıl işlem uygulanarak bükülen malzemelerin element dağılım haritaları | 144 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Simgeler | Açıklama |
|-------------------|-------------------------------|
| Acm | Kritik sıcaklık çizgisi |
| Ac ₁ | Alt kritik sıcaklığı |
| Ac ₃ | Üst kritik sıcaklığı |
| Al | Alüminyum |
| A_0 | Kuvvete dik kesit alanı |
| В | Bekleme süresi |
| С | Karbon |
| С | W/T oranına bağlı bir katsayı |
| Со | Kobalt |
| Cr | Krom |
| Cu | Bakır |
| D | Bükme açısı |
| Ε | Elastik modül |
| F | Çekme kuvvet |
| Fe | Demir |
| Fe ₃ C | Sementit |
| HRB | Brinell sertlik |
| HV | Vickers sertlik |
| I | Malzeme özelliği |
| КО | Kareler ortalaması |
| KT | Kareler toplamı |
| L | Son ölçü boyu |
| Lo | İlk ölçü boyu |
| Mg | Magnezyum |
| Mn | Mangan |
| Мо | Molibden |
| Mo ₂ C | Molibden karbür |

Simgeler

| Ν | Azot |
|------------------|----------------------------------|
| Nb | Niyobyum |
| Ni | Nikel |
| P | Fosfat |
| Pb | V bükme kuvveti |
| Pe | Son bükme kuvveti |
| R _m | Zımba köşe yarıçapı |
| Rb | Zımba uç yarıçapı |
| S | Sac kalınlığı |
| sd | Serbestlik derecesi |
| Si | Silisyum |
| SiC | Silisyum karbür |
| Ti | Titanyum |
| V | Vanadyum |
| Zn | Çinko |
| Zr | Zirkonyum |
| W | Wolfram |
| W | Kalıp ağzı açıklığı |
| W ₂ C | Wolfram karbür |
| Α | Ferrit |
| α | A faktörünün i' nci düzey etkisi |
| αβij | Düzeylerin etkileşim etkisi |
| βj | B faktörünün j' nci düzey etkisi |
| μ | Genel ortalama |
| γ | Östenit |
| Yijk | Düzeylerin gözlem değeri |
| Ε | Gerinim |
| Ek(ij) | Hata terimi |
| σ_{b} | Malzeme çekme mukavemeti |

Kısaltmalar

Açıklama

| CAE | Computer-Aided Engineering |
|---------|--|
| ССТ | Continuous cooling transformation |
| CMM | Koordinant Ölçme Cihazı |
| CNC | Computer Numerical Control |
| DFB | Deformasyon Bölgesi |
| DFOB | Deformasyon Olmayan Bölge |
| EDS | Enerji Dağılım Spektrometresi |
| EN | Avrupa Normu |
| HMT | Hacim Merkezli Tetragonal |
| НМК | Hacim Merkezli Kübik |
| HSD | Hataya ait serbestlik derecesi |
| п | Isıl İşlemsiz |
| II-30 s | Isıl işlemsiz 30 saniye Bekleyerek Bükme |
| MI | Menevişleme İşlemi |
| MI-30 s | Menevişlenmiş 30 saniye Bekleyerek Bükme |
| NI | Normalizasyon İşlemi |
| NI-30 s | Normalizasyon 30 saniye Bekleyerek Bükme |
| SEM | Scaning Electron Microscope |
| SEY | Sonlu Elemanlar Yöntemi |
| TS | Türk Standardı |
| ТТТ | Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm |

1. GİRİŞ

Sac metal kalıpçılığı, günümüz modern toplumunun artan ihtiyaçlarını karşılama doğrultusunda çok büyük öneme sahiptir. Kara, deniz, hava ve uzay taşıtları, çeşitli ev eşyaları ve makineleri, endüstriyel araç-gereçler, endüstriyel yapılar ile makina imalatı, savunma sanayi, inşaat ve enerji sektörü, medikal ve daha birçok alandaki uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır. Bu şekilde yaygın kullanılmalarındaki en önemli etkenlerden bazıları, diğer alternatif malzemelere nazaran daha dayanımlı, ucuz, kolay işlenebilme, şekillendirilebilme ve birleştirilebilme özellikleri olmaları şeklinde sıralanabilir.

Günümüzde sac metal şekillendirme işlemi, başta enerji ve otomotiv sektörü olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. Günlük hayatta kullanılan bir binek araç ortalama 4000 kadar mekanik elemandan oluşmakta ve bu ihtiyaçlar oldukça karmaşık üretim ve montaj süreçlerini içermektedir. Montajda ve nihai ürün performansında oluşacak problemlerden kaçınmak için şekillendirilen parçanın kalitesi önemlidir [1-3].

Üretim yöntemleri içinde önemli bir yere sahip olan sac metal kalıpçılığı, çok sayıda üretim söz konusu olduğunda, seri olarak imalat yapıldığından dolayı büyük zaman kazancı sağlar. Sac metal şekillendirme işlemlerinin en önemli uygulama alanlarından biriside bükme işlemidir. Bükme yöntemi, bükülmüş numunenin tokluğunu arttırarak ve yönlendirilmiş bir malzeme akışı sağlayarak mekanik özellikleri de iyileştirdiği için tercih edilen bir imalat yöntemidir [4-20]. Bükme işlemlerinde sac malzemelerin akma dayanımları aşılmakta, fakat rezilyans enerjileri (elastik deformasyon için harcanan enerji) aşılamamaktadır. Bu nedenle plastik deformasyona uğrayan parçada geri ve ileri esneme davranışı meydana gelmektedir. Sac metallerin bükülmesi neticesinde, malzemenin iç deformasyon bölgesinde basma gerilmeleri ve dış deformasyon bölgesinde ise, çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Basma ve çekme gerilmeleri nötr eksende eşitlenmektedir. Basma gerilmeleri çekme gerilmelerinden büyük olduğunda sac malzemede geri esneme (sac malzemenin geriye doğru açılması), çekme gerilmeleri basma gerilmelerinden büyük olduğunda ise, ileri esneme davranışı (sac malzemenin içeri doğru kapanması) meydana gelmektedir. Sac levhanın plastik deformasyona uğrayarak şekillendirilmesi (bükülmesi) sırasında kalınlığında istenenden daha farklı bir değişim olursa sacda kırışmalar, buruşmalar ya da yırtılmalar meydana gelebilmektedir. Başarılı

olarak yapılmış bir şekillendirme işleminden sonra karşılaşılan diğer bir problem ise; geri ve ileri esneme davranışıdır [21-41]. Sac metal ürünlerde geri ve ileri esneme imalat işlemlerinin kontrolü için geometrik değişkenleri çözmek ve istenilen toleranslara sahip ürünler elde etmek için sac metal üretim işlemlerinde büyük bir öneme sahiptir. Geri ve ileri esneme olarak adlandırılan bu durum, sac parçaların şekillendirme işleminin ardından oluşan, çoğu zaman istenmeyen ya da oluşması halinde değerinin bilinmesi gereken bir problemdir. Geri ve ileri esneme değerlerinin önceden tahmin edilebilmesi, zaman sarfiyatı, iş gücü maliyeti ve deneme yanılma yöntemi ile harcanan malzeme israfının önüne geçmektedir. Geri ve ileri esneme açıları belirlenerek veya hesaplanarak, malzeme tasarrufu, istenilen tolerans ve kalitede ölçü tamlığı ve özdeş ürünler elde edilebilmektedir. Böylelikle ideal bükme açısı belirlenerek zamandan ve maliyetten kazanç sağlanılmaktadır [42-52].

Literatür taraması neticesi daha önce sac malzemeye uygulanan ısıl işlemlerin geri ve ileri esneme davranışı üzerindeki etkisi üzerine çalışmalar yapılmadığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda; gerçekleştirilen bu çalışmada, 3, 4, 5 ve 6 mm kalınlıklarda Cr-Mo alaşımlı 16Mo3 (1.5415) celik sac malzemeler kullanılmıştır. Sac malzemeler üzerine normalizasyon ve menevişleme ısıl işlemi uygulanmıştır. Uygulanan ısıl işlemlerinin sac malzemede meydana gelen geri ve ileri esneme değerlerine etkisini incelemek amacıyla zımba uç yarıçapı R4,5 mm olan 30°, 60° ve 90° bükme açılarında bükme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 4 mm kalınlığındaki ısıl işlemsiz, normalizasyon ve menevişleme işlemi uygulayarak, zımba uç yarıçaplarının geri ve ileri esneme davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla R2, R3, R4, R5 ve R6 mm uç yarıçapa sahip zımbalar kullanılarak 90° bükme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, zımba sac malzeme deformasyon bölgesinde bekletilmeden direk ve 30 s bekletilip kaldırılmak suretivle gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada, bükme işlemleri uygulanmış numunelerin orta deformasyon bölgelerinin mikroyapısal karakterizasyonu incelenmiştir. Bunun yanında; sac malzemelerin mekanik özellikleride incelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan bükme parametrelerinin etkisini belirlemek amacıyla Minitab programı yardımıyla istatistiksel olarak analiz edilerek, bükme işlemindeki en etkili faktörler ve etkisi bulunmayan faktörler tespit edilerek matematiksel modeller geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışma neticesinde, geri ve ileri esneme davranışı üzerine bundan sonra yapılacak çalışmalara öncülük edilerek, literatüre ışık tutulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bükme işlemi esnasında uygulanan kuvvete bağlı olarak sac malzeme üzerinde elastik ve plastik gerilmeler nedeniyle kalıcı şekil değişikliği meydana geldiği bilinmektedir. Sac malzemenin iç kısmında basma, dış kısmında ise çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Çekme gerilmeleri basma gerilmelerinden büyük olduğu durumlarda sac malzemelerde ileri esneme, basma gerilmesi çekme gerilmesinden büyük olduğu durumlarda ise geri esneme meydana gelmektedir [42-45, 52]. Bükme işlemi neticesinde, sac malzemenin büküm açısının küçülmesine geri esneme, büküm açısının büyümesine ise ileri esneme denilmektedir.

Sac malzemenin bükülmesi neticesinde, geri ve ileri esneme davranışı ortaya çıkmaktadır. Bu istenmeyen durumu en aza indirerek istenilen kalitede bükme işlemi yapabilmek önemlidir. Araştırmacılar tarafından, imalatın arzu edilebilir bir şekilde gerçekleştirilmesi için, bükmeyi etkileyen etkenler belirlenerek, en uygun bükme açısı tespit edilmeye çalışılmaktadır. Bu amaçlar doğrultusunda, gerek firmaların AR-GE birimleri, sac metal kalıpçıları tarafından ve gerekse akademik alanda birçok araştırma yapılmış ve yapılmaya da devam etmektedir.

Akademik alanda yapılan çalışmalar, bu çalışmada iki gruba ayrılarak değerlendirilmiştir. Önce geri esneme, daha sonra ise ileri esneme ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir.

2.1. Geri Esneme Üzerine Yapılan Çalışmalar

Sac malzemelerin şekillendirilmesinde karşılaşılan en büyük problemlerden birisi de geri esneme davranışıdır. Sac metal ürünlerde geri esneme, imalat işlemlerinin kontrolü için geometrik değişkenleri çözmek ve istenilen toleranslara sahip ürünler elde etmek için sac metal işlemlerinde büyük bir öneme sahiptir. Bükmede geri esneme ile ilgili yapılan bilimsel çalışmalar incelendiğinde, genellikle sac malzeme özellikleri, zımba yarıçapı, zımba bekleme süresi, deformasyon miktarı, haddeleme yönü gibi parametrelerin geri esneme miktarına olan etkilerinin belirlenmesi ile ilgili araştırmalar ön plana çıkmaktadır. Tekaslan ve arkadaşları, bükme kalıplarında farklı kalınlık ve özellikteki sac malzemelerin geri esneme durumlarının incelenmesi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Modüler V dip bükme kalıbı tasarlayarak farklı kalınlıklardaki çelik sac, bakır ve paslanmaz çelik sac malzemelerin farklı bükme açılarında, zımba sac malzeme üzerinde bekletilmeden ve bekletilerek geri esneme miktarları tespit edilmiş ve bu özelliklere bağlı olarak geri esneme grafikleri elde edilmiştir. Deney sonuçları, bilgisayar ortamında sayısal olarak değerlendirilip, grafik ve tablolara dönüştürülerek literatüre katkıda bulunmuşlardır. Zımba sac malzeme üzerinde bekleme süresinin geri esneme değerini azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, artan malzeme kalınlığının ve bükme açısının geri esneme değerlerini arttırırken, zımba bekleme süresinin azalttığı tespit edilmiştir [3-5].

Tekiner ve Özdemir, serbest V bükme yöntemi kullanarak geri esnemenin deneysel olarak tespiti ve sonlu elemanlar yöntemiyle tahmini üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarında, modüler serbest V bükme kalıbı kullanılmıştır. Deneylerde, DKP ve paslanmaz çelik sac malzeme kullanılmıştır. Numuneler farklı kalınlıklarda olup her kalınlık farklı bükme açılarında, her açı da 3 farklı radyüs değerinde bükülerek gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Marc-Mentat programında yapılan çözümlemelerle karşılaştırılmıştır. Bükme açısının artması ve malzeme kalınlığının artmasının geri esneme değerini azalttığı tespit edilmiştir. Bükme uç yarıçapı büyüdükçe geri esneme miktarının arttığı belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında %85' in üzerinde uyum gözlenmiştir [6, 7].

Işıktaş, V dip bükme kalıplarında geri esnemenin deneysel olarak tespiti üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. Geri esneme miktarlarının belirlenebilmesi için V bükme kalıbı tasarlanarak, deney malzemesi olarak DKP ve paslanmaz çelik malzemeler kullanılmıştır. Deney numuneleri 30x60 mm ebatlarında, kalınlıkları 1; 1,5 ve 2 mm olarak seçilmiştir. Numuneler 60°, 90° ve 120° derece kalıp açılarında ve her açı da 2 ve 6 mm olan farklı zımba uç radyüs değerleri kullanılarak bükme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler neticesinde, malzeme kalınlığı ve bükme açısının artması ile geri esneme değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Zımba radyüsü büyüdükçe, geri esneme miktarının arttığı belirlenmiştir [8].

Ötü ve Demirci tarafından, AA5754-O ve AL1050-O sac malzemeleri V bükme kalıplarında farklı bükme yöntemleri kullanılarak geri esneme miktarları araştırılmıştır.

Zımba bükme açıları 60°, 90° ve 120° olarak seçilmiştir. Numuneler, farklı hadde yönlerine (0°, 45° ve 90°) göre V bükme uygulamaları için hazırlanmıştır. Zımba yarıçapları ise 2, 4 ve 6 mm olarak belirlenmiştir. Bükme işlemleri neticesinde, zımba uç yarıçap değerlerinin artması ve zımbanın bükülen malzeme üzerinde bekletilme süresinin geri esneme değerlerini azalttığı tespit edilmiştir. Sac malzemenin haddeleme yönü değişkenleri geri esneme değerlerinde farklılıklar oluşturduğu belirlenmiştir. Çalışmada, elde edilen deney sonuçları sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile karşılaştırılmıştır [9,10].

Kılıç ve arkadaşları, 60° V bükme kalıbı kullanarak, farklı kalınlık ve genişlikteki DP600 sac malzemeyi, farklı deformasyon hızlarında şekillendirilmesi neticesinde meydana gelen geri esneme davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Sac kalınlığının artmasıyla geri esneme miktarının önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Sac malzeme genişliğinin geri esneme değerine önemli bir etkisi tespit edilememiştir. Artan deformasyon hızlarıyla birlikte ince saclardaki geri esneme değişimi, kalın saclara göre daha az olmuştur. 500 mm/dk yapılan deneylerde diğer deformasyon hızlarına göre farklı davranışlar tespit edilmiştir. SEY ile elde edilen sonuçlar bütün durumlarda deneysel sonuçlara göre daha düşük bulunmuştur. Yüksek hızlarda ise SEY analiz sonuçlarının deneysel sonuçlara yaklaştığı tespit edilmiştir. Analitik modelin tahminleri deneysel sonuçların altında kaldığı belirlenmiştir [11, 12].

Arslan ve arkadaşları, bükme işleminde geri esneme davranışı üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. V bükme işleminde, alüminyum sacların geri esneme değerlerini belirlemek için SEY kullanılmıştır. Analizi yapılan alüminyum sac parçaların geri esneme neticesinde meydana gelen form değişiklikleri belirlenmiştir. Geri esneme miktarları, toplam eşdeğer plastik gerinimleri ve Von Misses gerilmeleri gibi sonuçlar grafiksel olarak elde edilmiştir. Simülasyon sonucu geri esneme faktörünün kalınlıkla ters orantılı olduğu, kalınlık arttıkça geri esnemenin azaldığı tespit edilmiştir. Farklı kalınlıkta bükülmüş alüminyum parçalar için, SEY sonuçları ile deneysel sonuçların uyum içinde olduğu belirlenmiştir [13].

Yenice, değişik sac malzemelerde bükme işlemi neticesinde oluşan geri esneme davranışının incelenmesi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, DP600, HSLA350 ve FEP04 sac malzemeler kullanılmıştır. Bükme işleminde, 80°, 90° ve

100° açılara sahip zımba kullanılmıştır. Şekillendirme yöntemlerinden birisi olan V bükme operasyonunda elde edilen deney parçaları için, kalıp ve malzeme değişkenlerine bağlı olarak geri esneme davranışı incelenmiştir. Kalıp değişkeni olarak, V kalıp açısı ve zımba uç yarıçapı alınmıştır. Deneylerde malzeme değişkeni olarak üç tip sac malzemeden, üç ayrı hadde yönünde numuneler kullanılmıştır. Kalıp yarıçaplarına bağlı olarak numunelerde gözlenen geri yaylanma değerleri malzemelere göre değişkenlik göstermektedir. Fee355 ve FeP04 sacların kalıp açısına göre geri yaylanma davranışları benzerlik göstermektedir. Bu sacların kenarlarının, 90° kalıp açısında negatif yönde, 80° ve 100° kalıp açılarında ise pozitif yönde geri esneme davranışı belirlenmiştir. Hadde yönüne bağlı olarak numunelerde gözlemlenen geri yaylanma davranışlarının benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir [14].

Erhuy, yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik sac üzerinde geri esnemenin şekillendirmeye etkisinin incelenmesi üzerine deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, H320LA soğuk haddelenmiş ve tavlanmış yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik sac malzeme kullanılmıştır. Öncelikle, seçilen sacın tek eksenli çekme deneylerinde, çeşitli gerinim düzeylerinden itibaren yükleme ve yük boşaltma uygulamak suretiyle, haddeleme yönüne göre 0°, 45° ve 90° doğrultulardaki efektif modül değerleri ölçülmüştür. Yük boşaltmada lineer regresyon yoluyla tespit edilen efektif modül, geri esneme modülü olarak belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçları konkav kenar bükme işlemlerinde kullanılmıştır. Pres altında kenarı konkav formlarda bükülen saclarda ölçülen sonuçlar SEY ile tahmin edilen geri esneme açıları ile karşılaştırılmıştır. Simülasyonlarda, tek eksenli çekme ve şişirme deneylerinden elde edilen akma gerilmesi eğrileri denenmiş ve simülasyon yazılımına tanıtılan elastiklik modülü, deformasyon parametresine göre hesaplanmış olan geri esneme modülü değerleri ile değiştirilmiştir. Bu yolla, geri esneme tahminlerinde %26,5 ile %41,5 arasında iyileştirmeler sağlanmıştır. Sağlanan iyileştirmenin, parçaların konkavlık derinliğine ve SEY kullanılan akma gerilmeşi eğrisine bağlı olduğu tespit edilmiştir [15].

Kurumahmut çalışmasında, alüminyum-silisyum kaplamalı 22MnB5 çelik sac malzeme üzerinde şekillendirilebilirlik özelliklerinin geliştirilebilmesi için elektrikli ısıtma yöntemli özel bir test düzeneği tasarlamışlardır. Bu yöntemle, süratle ısıtılan levhalar üzerinde sıcak şekillendirme yönteminin uygulanması neticesinde ortaya çıkan mekanik özelliklerin ve

şekillendirilebilirlik özelliklerinin belirlenmesi için preste sertleştirme, U kanal ve çift eksenli germe kalıpları tasarlanmıştır. Bu kalıplarla fırında ve elektrikli ısıtmanın ardından kalıp teması ile su verme, düzlem birim şekil değişimi şartlarında gererek bükme ve çift eksenli germe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonrası numuneler üzerinde, mikro yapı ve mekanik özellikler incelenmiştir. Ayrıca, östenit sıcaklığının üstünde kalıp teması ile soğurken oluşan şekillendirilebilirlik sınırları elde edilmiştir. Sıcak şekillendirme, başlangıçta ferrit-perlit mikro yapısına sahip 22MnB5 numunesi süneklik ve darbe dayanımındaki düşüşe karşılık gerek sertlik, gerekse dayanımdaki güçlü artışla tama yakın martenzit veya martenzit-beynit karma yapıya dönüştürmektedir. İşlem sırasında malzemenin şekillendirilebilirliği önemli ölçüde artarken, geri esneme yok denecek kadar düşük olduğu tespit edilmiştir [16].

Bahloul ve arkadaşları, yüzey metodolojisi yöntemi kullanarak deneysel ve sayısal olarak geri esneme tahmininin optimizasyonu üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, kenar bükme ''L'' uygulayarak ve uygulamadan 3D modellemesi tekniğiyle parçaların geri esneme değerlerinin tahmini için bir metodoloji uygulanmıştır. Yapılan çalışma üç bölümden oluşmaktadır. İlk olarak, kenar bükme deneylerinde işlem değişkenlerinin etkisi (zımba kalıp açıklığı, zımba uç radüsü ve malzeme özellikleri) araştırılmıştır. Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde, elde edilen veriler ABAQUS yazılımı kullanılarak SEY ile karşılaştırılmıştır. SEY simülasyon sonuçları deneysel çalışma ile uyum içinde olduğu belirlenmiştir. Yüzeysel optimizasyon metodolojisi kullanılması ise, çalışmanın üçüncü amacıdır. Ürünleri hasarsız ve çatlaksız olarak geri esneme değerleri azaltılarak, uygun kalıp radyüsü, zımba ve kalıp arasındaki açıklığın optimum değerini elde etmede yüzey metodolojisi yöntemi kullanılmıştır. Optimum kalıp radyüsü, zımba ve kalıp arasındaki açıklığın en uygun değeri belirlenerek üretim problemlerinin (çatlak ve geri esneme değerleri) minumun seviyeye indirilebiceği tespit edilmiştir [17].

Kahraman, simülasyon modellerinin uygunluğunu kontrol etmek için bir otomotiv firmasında üretimi yapılmış hafif ticari bir aracın ön çamurluk üstü şasi parçası olan üç eşit parçanın simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda; DYNAFORM V5.6 yazılımında geri esneme telafisi ile plastik şekillendirme, geri esneme analizi, erkek ve dişi kalıp yüzey şekil algoritmaları geri esneme etkisini azaltacak şekilde değiştirilmiştir. Bunu yaparak değiştirilmiş kalıp yüzeyleriyle yeni plastik şekillendirme ve geri esneme analizi yapılmış ve sonuçlar üreticiden sağlanan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, simülasyonda hesaplanan geri esnemeler ile gerçek geri esnemelerin bazı bölgelerde tam uyuştuğu, bazı bölgelerde hem geometrik yapı hem de miktar olarak örtüşmediği ve yine bazı bölgelerde karakter olarak aynı olsa da nicel olarak farklı olduğu tespit edilmiştir [18].

Zang ve arkadaşları, plastik deformasyon ile elastisite modülü değişikliğinin kabul edildiği geri esnemenin tahmini için yapısal bir model üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sac metal şekillendirme işleminde geri esnemenin tahmin edilebilmesi amacıyla, doğrusal olmayan birleştirilmiş sertleştirme kuralının, gerilme-gerinim yapısal formülasyonu Lemaitre, Chaboche ve Hill 1948' deki anizotropik verimlilik fonksiyonunun doğrusal olmayan kinematik sertleşme teorisine göre tasarlamıştır. Elastiklik modülü, mühendislik uygulamalarının büyük bir çoğunluğunda sabit bir değer olarak alınmaktadır. Ancak, artan deformasyona bağlı olarak elastiklik modülünün değeri düşmektedir. Yani, geri esneme üzerinde plastik gerilim ile elastik modülün değişikliğe etkisi yapısal bir model olarak kabul edilmektedir. Sayısal ve deneysel sonuçlar göstermiştir ki, önemli ölçüde önerilen yapısal model geri esnemenin tam olarak hassasiyetini arttırmıştır [19].

Panthi ve arkadaşları, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak sac metal bükmede geri esnemenin analizi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Toplam elastik artışlı plastik gerilme üzerine dayalı büyük bir deformasyon algoritmasını tipik sac metal bükme işlemlerini modellemek için kullanmışlardır. Bükme işlemi, malzemenin elastik geri esnemesiyle birlikte büyük bir gerilme ve dönme içerir. Çalışmada, geri esnemenin tahminini simülasyon ile gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, geri esneme oranı açısından verilmiştir. Özellikle, bu çalışmada kalıp radyüsü, kalınlık değişkenleri ve geri esneme üzerindeki yükün etkisi incelenmiştir. Deney sonuçları ile sayısal sonuçların bir biri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Zımba radyüs değeri arttıkça geri esnemenin arttığı, radyüs değeri azaldıkça geri esnemenin azaldığı belirlenmiştir [20].

Zhu ve arkadaşları, soğuk bükme işleminde geri esnemenin tahmini için malzeme yapısal modelin uygulanması ve geliştirilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Soğuk bükme işleminde geri esnemenin tahmini için hassasiyet, malzeme yapısal modelin doğruluğu ve duyarlılığı ile belirlenmiştir. Malzeme yapısal modeli, birçok araştırmacı tarafından

geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller, teorik analiz veya sonlu elemanlar simülasyonu ile çeşitli malzemeler kullanılarak geri esnemenin hesaplanması için uygulanmıştır. Geri esneme tahmini sonuçları farklı elastik modül ve doğrusal olmayan geri dönüş olduğu zaman daha doğru ve yüksek olmaduğu belirlenmiştir. Sertleşme modeli, verim kriterinden geri esneme üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Geri esneme tahmininin doğruluğu, farklı elastik modüller etkili olduğu zaman başarılı olduğu tespit edilmiştir. Sac malzeme haddeleme yönü ve akma kriterlerinin geri esneme davranışı üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Sertleşme modeli ise, akma kriterinden daha fazla geri esneme üzerine etkili olduğu tespit edilmiştir [21].

Esat ve arkadaşları, farklı kalınlıktaki 2000 ve 6000 seri alüminyum malzemelerin farklı bükme açılarına sahip bükme kalıplarında geri esnemeyi deneysel ve sonlu elamanlar programı ile karşılaştırmıştır. Kalınlık arttıkça, geri esnemenin azaldığını, akma mukavemeti arttıkça geri esnemenin de arttığını tespit etmiştir. Sonlu eleman sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak geri esneme faktörü, bükme açısı ve farklılıklar açısından geri esneme miktarının kolay bir şekilde bulunabileceği belirlenmiştir [22].

Huang, soğuk haddelenmiş karbonlu çelik sac malzemenin, zımba radyüsü 0,5 mm olan V kalıp kullanarak zımba inme derinliğine göre meydana gelen geri ve ileri esneme davranışlarını SEY kullanarak analiz etmiştir. Havada bükme işlemlerinde geri esneme davranışı tespit edilirken, V dip bükme işlemlerinde geri ve ileri esneme davranışının meydana geldiği belirlenmiştir. Deney sonuçları ile sonlu elemanlar sonuçlarının uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir [23].

Parsa ve arkadaşları, çift kavisli sac metal şekillendirmede geri esneme fenomeninin araştırılması üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. Sac metalde geri esneme miktarını hesaplamak için çok başarılı denemeler yapmışlardır. Çalışmada, malzeme kalınlığı değişimlerini dikkate alarak, moment eğrilik ilişkisine dayanan analitik formülü çift kavisli sac metal şekillendirme işlemlerinde, geri esnemenin tahmini için bir yöntem sunmuştur. Formüllerin doğruluğu SEY ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Sac metalin geri esneme davranışı üzerinde kalınlık ve eğrilik radyüsü gibi bazı geometrik parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Farklı sac metaller, SPCC çelik saclar, geleneksel saf titanyum ve pirinç levhalar ile yapılan deneyler ve modellerle geri esneme davranışları incelenmiştir. Sac malzeme kalınlığının ve zımba radyüsünün geri esneme üzerinde etkili bir parametre olduğu belirlenmiştir [24].

Huang ve arkadaşları, gerdirme bükme tekniğinde, farklı zımba yarıçapları kullanılarak, farklı özelliklere sahip çift fazlı ve martenzitik yüksek mukavemetli çeliklerin kırılma davranışını incelemiştir. Mikro yapı analizleri neticesinde, makas kırığı yüzeylerinde tanelerde uzama gözlemlenmiştir. Tutucu kuvveti arttıkça kırık yüzeylerinin de arttığı tespit edilmiştir [25].

Quakdi ve arkadaşları, gerdirme bükme deneyinde, kalıp radyüsü ve zımba kuvvetinin etkisinin altında geri esnemenin değerlendirmesi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, U şekilli gerdirme bükme deneyleri kullanılarak geri esnemeyi değerlendirmişlerdir. Deneylerde, alüminyum alaşımlı sac malzemeler kullanılmıştır. Geri esneme üzerinde gerginlik derinliği, tutma kuvveti ve kalıp radyüsü gibi faktörler rol almaktadır. Gerdirme derinliğinin artması ile geri esnemenin kademeli olarak azaldığı belirlenmiştir. Kalıp eğrilik yarıçapının da geri esneme üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu da tespit edilmiştir [26].

Davoodi ve Zareh, çoklu şekillendirme işleminde geri esnemeyi etkileyen şekillendirme parametrelerinin değerlendirmesi üzerine deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, geri esneme üzerinde, elastik katman sayısı, elastik katman kalınlığı ve zımba elemanlarının sayısı gibi işlem parametreleri ile birlikte malzeme özellikleri, sac kalınlığı ve anizotropi oranının etkisi SEY ve deneysel testler uygulanarak çalışılmıştır. Deneyler V ve S şekilli geometriler oluşturularak farklı şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, 3105 alüminyum alaşımı, AISI304 ve saf bakır malzemeler kullanılmıştır. Kullanılan sac malzemelerin akma davranışının belirlenmesi Barlat-89, Hill-48 ve Von-Mises üç akma kriterleri kullanılarak yerine getirilmiştir. Sonuç olarak, malzeme özellikleri, kalıp boşluğu ve anizotropi çoklu nokta şekillendirmede geri esnemeyi etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, elastik katmanların kalınlığı ve sertliği geri esnemeyi en aza indirmek için önemli olduğu belirlenmiştir. Pimlerin maksimum sayısının yanı sıra daha büyük sertlik ve minimum kalınlık ile elastik katmanlar kullanılması geri esnemenin minimum olmasına sebep olacağı belirlenmiştir [27].

Moon ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, takım sıcaklıkları ve şekillendirme hızının uygun değerlerde seçilmesi halinde, alüminyum alaşımlı sacın geri esnemesinde belirgin azalmaların kaydedilebileceği belirlenmiştir. Özellikle, sıcak kalıp ve soğuk ıstampa uygulaması ile geri esnemenin %20 düzeyinde azaltılabildiği deneysel olarak tespit edilmiştir. Artan kalıp sıcaklıkları ile sac malzemenin akma dayanımında düşüsün, gerinim hızına duyarlılığında ise artışın söz konusu olduğu, dolayısıyla yüksek sıcaklıklar ve düşük şekillendirme hızlarının, geri esnemenin azaltılması bakımından en etkin kombinasyon olduğu belirlenmiştir [28].

Mkaddem ve arkadaşları, geri esnemeyi deneysel ve teorik olarak araştırmıştır. Çalışmada, kenar bükme yöntemi kullanılmıştır. Farklı kalıp radyüsü ve kalıp inme değerleri ile geri esneme incelenmiştir. Farklı kalıp açıklık değerleri neticesinde, elde edilen geri esneme değerleri için grafikler çizilmiştir. Deney sonuçları, geri esneme üzerinde anizotropik etkilerini göstermek için numunelerin farklı hadde yönleri için grafikler çizilmiştir. Ölçümler iç bükey ve dış bükey bükme durumları için gerçekleştirilmiştir. RSM metotta kübik interpolasyon fonksiyonları ve iki farklı numune haddeleme yönü, üç kalıp radyüsü ve yedi açıklık değeri kullanılmıştır. Elde edilen grafiklerin hassasiyeti ve geri esneme üzerinde her bir parametrelerin etkisi detaylı olarak araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, kalıp açıklığı miktarının azalmasının geri esneme değerini azalttığı belirlenmiştir. Haddeleme yönünde alınan malzemelerde şekillendirme sonrasında elde edilen geri esneme, haddeye dik doğrultudaki geri esneme değerlerine göre fazla olduğu tespit edilmiştir. Zımba uç yarıçapı arttıkça geri esneme değerini arttığı belirlenmiştir [29].

Nasrollahi ve Arezoo, deneysel, SEY ve yapay sinir ağları kullanarak bükme bölgesine delik delerek delik bileşeninin sac malzemenin geri esnemesine etkisinin tahmini üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışmada, HSLA360 ve St12 sac malzeme kullanılmıştır. Geri esneme üzerinde işlem değişkenleri olan delik tipi, delik sayısı, sac genişliğinin delik genişliğine oranı, kalıp radyüsü ve tutucu kuvvetin etkisi araştırılmıştır. Kullanılan SEY sonuçları önerilen modelin güvenilirliğini ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yapay sinir ağlarıyla denenerek kullanılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre, bükme bölgesindeki delik tipinin geri esneme üzerine etkili olduğu tespit edilmiştir. Dairesel delikler uzun delikler ile karşılaştırıldığında daha fazla geri esneme meydana gelirken, uzun delikler ise, kare delikler ile karşılaştırıldığında geri esneme değerinin

arttığı tespit edilmiştir. Deliğin varlığının geri esneme değerlerini azalttığı belirlenmiştir. Bükme bölgesindeki delik sayısının artması geri esneme değerini biraz azalttığı tespit edilmiştir [30].

Baseri ve arkadaşları, yapay sinir ağlarının bulanık mantık geri yayılım (FLBP) algoritması kullanılarak V bükme işlemlerinde geri esnemenin tahmini üzerine deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışmada, CK67 sac malzeme ve 60° V dip bükme yöntemi kullanılmıştır. Sac kalınlığı, haddeleme yönü ve zımba uç radyüsü parametrelerinin bükme açısı parametresine etkisi incelenmiştir. Tangent-sigmoid fonksiyonuyla geri yayılım yapay sinir ağları (BPNN) modeli sac kalınlığı, haddeleme yönü ve zımba uç radyüsü açısından tahmin edilen geri esnemenin değerlerinin hassasiyetini arttırmıştır. Tahmin edilen deney sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında iyi uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir. V bükme işleminde BPNN modelin girdi parametrelerine karşı geri esneme ilişkisinin yakın olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki, amaçlanan model diğer algoritmalara (sürekli mantık ve değişken mantık geri yayılma) göre geri esnemenin tahmin edilmesi için en iyi performansı verdiği belirlenmiştir [31].

Kumar ve arkadaşları, L kenar bükme uygulamalarında alüminyum sac malzemenin geri esneme ve deformasyon esnasındaki kesit incelmesi etkisini incelemek amacıyla deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada farklı kalınlıktaki sac malzemeler ve zımba kalıp arasında farklı açıklık değerleri kullanılmıştır. Sac malzeme kalınlıklarının belirli açıklık değeri, geri esneme ve incelmeyi doğrusal olarak arttırdığı belirlenmiştir. Ancak kritik açıklık değerlerinin altında sac malzeme yüzeylerinde sürtünmeden dolayı çizikler meydana geldiği belirlenmiştir. Açıklık değerlerinin azalmasından dolayı, zımba yüzeylerinde aşınma oranının arttığı tespit edilmiştir. Kalıp ve zımba arasındaki açıklık arttıkça hem çatlak uzaması hem de geri esneme etkisinin arttığı belirlenmiştir [32].

Chan ve arkadaşları, sac metal şekillendirme işlemlerinde V bükmenin geri esneme davranışının SEY analizi üzerine çalışma gerçekleştirilmiştir. Zımba radyüsü, zımba açısı ve kalıp uç radyüsü parametrelerinin geri esneme üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kullanılan elemanların sayısını doğrulamak amacıyla H yakınsama testi yapılmıştır. Patran, Abaqus/Standart and Abaqus/CAE yazılımları kullanılmıştır. Analizler neticesinde, geri esneme açısı zımba radyüsü ve zımba açısının artmasıyla azaldığı tespit edilmiştir.

Geri esnemenin zımba radyüsü, zımba açısı ve kalıp uç radyüsüne bağlı olduğu belirlenmiştir. Zımba açısı ve zımba radyüs değeri arttıkça geri esnemenin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, plastik deformasyon bölgesi arttıkça geri esneme azalmıştır. Zımba radyüsünün artmasıyla meydana gelen plastik deformasyon miktarının sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Zımba değerleri belirli değerleri aştığı zaman geri esneme değerinde önemsiz bir azalma meydana geldiği belirlenmiştir [33].

Liu ve arkadaşları, sac metal şekillendirme işleminde optimizasyon sorununun çözümünde gelişmiş evrimsel stratejiye dayanan geri esneme kontrol metodu belirlemiştir. Amaç, en küçük sac metal şekillendirmede geri esnemeyi sağlayacak en iyi işlem parametrelerini elde etmektir. Deney sonuçları, geri esnemenin bu şekilde kontrol edilebileceğini ve etkili olarak azaltılabileceğini tespit etmiştir [34].

Ling ve arkadaşları, AL2024-T4 sac malzemenin L kenar bükme işleminde, geri esneme analizini SEY kullanarak incelemişlerdir. Kalıp açıklığı, kalıp radyüsü ve kalıp temas yüzeyi parametrelerinin geri esneme üzerine etkisi araştırılmıştır. Analiz sonucunda, geri esnemeyi etkileyen faktörler tespit edilmiştir. Kalıp radyüs ve açıklık parametrelerinin geri esneme üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Kalıp açıklık değerlerinde kalıp radyüs değeri arttıkça geri esneme değerinin azaldığı belirlenmiştir. Kalıp radyüs değeri azaldıkça geri esneme değerinin arttığı tespit edilmiştir [35].

Wang ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada; serbest bükme işlemlerinde geri esneme özelliğinin kontrolü için yeni bir metot kullanmıştır. Kullanılan teknik zımbanın basma kuvvetine bağlı olarak meydana gelen geri esneme değerini tahmin edebilen sistem tasarımıdır. Çalışmada, malzeme özellikleri, bükme işlemi sonunda malzeme üzerinde elde edilen yükün ve malzeme üzerine uygulanan yükün kaldırılmasının, malzemedeki geri esneme miktarına ilişkilendirilmesi ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, malzemenin geri esnemesindeki değişim dağılımları bu yöntem ile daha iyi belirlenmiştir. Son zımba pozisyonu belirlenerek arzu edilen bükme açısı belirlenmiştir [36].

Asgari ve arkadaşları, iki farklı çeliğin DynaForm ve AutoForm SEY yazılımlarında geri esneme davranışlarını belirlemişler ve deneysel sonuçlarlarla karşılaştırmışlardır. Ayrıca, yapılan analizleri farklı elastisite modülü ve sürtünme katsayısına göre yaparak bu

özelliklerin geri esneme sonuçları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, AutoForm' un geri esneme tahminlerinin deneysel sonuçlara daha yakın olduğu belirlenmiştir. Ancak kullanılan farklı elastisite modül ve sürtünme katsayılarının sonuçlar üzerinde çok fazla etkisi olmadığı belirlenmiştir [37].

Fei ve Hodgson, soğuk haddelenmiş TRIP çeliğinin, serbest V bükme işlemiyle deneysel ve sayısal olarak geri esneme davranışını incelemişlerdir. Ayrıca, değişken ve sabit elastisite modül ile sürtünmenin geri esneme analizleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, analizlerde değişken elastisite modülünün hesaba katılması gerektiği ifade edilmiştir. Bunun yanı sıra, sürtünmenin geri esneme üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığı, sadece zımba kuvvetinin düşürülmesinde avantaj sağladığı tespit edilmiştir. TRIP çeliğinin geri esnemesi üzerinde zımba radyüsü ve zımba inme hızının etkisinin önemsiz olduğu belirlenirken, kalıp boşluğu ve kalınlığın ise etkili olduğu tespit edilmiştir [38].

2.2. İleri Esneme Üzerine Yapılan Çalışmalar

Sac metal kalıpçılıkta, özellikle son yıllarda bükme işlemlerinde sac malzemelerde meydana gelen ileri esneme miktarının araştırıldığı görülmektedir. Araştırmacılar, sac malzemelerde meydana gelen ileri esneme değerlerini etkileyen parametreler olarak sac malzeme özellikleri (bakır, pirinç, paslanmaz çelik, 16Mo3 vb), bükme zımba yarıçapı, bükme derinliği, haddeleme yönü gibi özelliklerin ileri esneme değerini etkilediğini belirlemişlerdir [39-41].

Thipprakmas ve arkadaşları, V bükme işlemlerinde, Taguchi ve ANOVA tekniği kullanarak; geri ve ileri esnemede bükme açısı, malzeme kalınlığı ve zımba radyüsü, zımba bükme derinliği gibi işlem parametrelerinin sonlu elemanlar yöntemi kullanarak uygun kalıp tasarımı üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Uygun zımba inme derinliği uygulayarak gerekli bükme açısının elde edildiği tespit edilmiştir. Kalıp ve iş parçası arasındaki boşluğun iyi ayarlandığında ideal bükme işlemlerinin uygulanabileceği belirlenmiştir. ANOVA sonuçları göstermiştir ki, geri esneme miktarlarına en etkili işlem parametresinin malzeme kalınlığı olduğu tespit edilmiştir. İleri esneme değerleri için en etkili işlem parametresinin malzeme kalınlığı ve bükme açısı parametrelerinin olduğu

belirlenmiştir. Taguchi ve ANOVA tekniği; geri ve ileri esnemeye bağlı olarak işlem parametrelerinin etkisi belirlenmiştir. Zımba radyüs değeri arttıkça, ileri esneme değeri azalırken, geri esneme değerinin arttığı tespit edilmiştir [42-45].

Phanitwong ve Thipprakmas, V bükme işlemlerinde istenilen açıyı elde etmek ve geri esneme özelliklerini minumum seviyeye indirmek amacıyla V bükme uygulamalarında ezerek bükme tekniğinde zımba ucuna dikdörtgen profil vererek deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen çalışmada, farklı zımba uç genişliği ve yüksekliği kullanılarak geri ve ileri esneme değerlerindeki farklılıklar deneysel ve SEY kullanılarak incelenmiştir. Zımba uç genişliği arttıkça, geri ve ileri esneme değerlerinde azalma ve artmalar meydana geldiği tespit edilmiştir. İleri ve geri esneme değerlerinde meydana gelen farklılıklar bükme parametreleri (bükme açısı, zımba profil genişliği, zımba profil yüksekliği ve malzeme özellikleri) ile doğrudan bağlantılı olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlara göre, en küçük zımba uç ölçüsü ve bükme kuvvetiyle, gerekli bükme açısını elde etmek için, zımba ölçüleri, bükme bölgesi ve tersine bükme bölgesindeki uygun gerilim dağılımları arasında düzenli bir ayar sağlanarak optimize edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir [46].

Dilipak ve arkadaşları, S235JR sac malzemenin ileri esneme miktarını incelemek amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Farklı bükme yöntemlerinin ve zımba yarıçaplarının kullanıldığı çalışmada, ileri esneme değerini azaltmak amacıyla sac malzeme üzerine farklı ısıl işlemler uygulamışlardır. Isıl işlemler neticesinde, zımba sac malzeme üzerinde bekletilmeden uzaklaştırıldığı ve zımbanın sac malzeme üzerinde bekletildiği bükme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyler neticesinde, zımbanın sac malzeme üzerinde bekleme süresi ve zımba yarıçapı arttıkça ileri esneme değerinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, artan menevişleme sıcaklığında ideal büküm açısını tespit etmişlerdir [47, 48].

Bakhshi ve arkadaşları, V ve U bükme işleminde, 0°, 45° ve 90° haddeleme yönlerinde CK67 sac malzemenin geri ve ileri esneme miktarı üzerinde zımba yarıçapı, hadde yönü ve sac kalınlıklarını kapsayan önemli parametrelerin etkisi sayısal ve deneysel olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, sac malzeme kalınlığı arttıkça, ileri ve geri esneme değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Bükme işlemlerinde, en uygun zımba uç yarıçapında
geri esneme meydana gelmediği belirlenmiştir. Zımba uç yarıçapı arttıkça ileri esneme değeri azalırken, geri esneme miktarının arttığı tespit edilmiştir. Haddeleme yönünün geri ve ileri esneme değerlerine etkili olduğu belirlenmiştir [49].

Shukla ve Gautam, düşük karbonlu çeliğin ileri esneme davranışının deneysel ve sayısal analizi üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. Sac metal şekillendirme işlemlerinde duyarlı faktörlerden birisi de yükün kaldırılması esnasında elastik geri dönüş sonucu meydana gelen geri esneme; bükme işlemleri neticesinde, bazı geometrik değişimleri meydana getirmektedir. Geri esneme; bükme açısı, bükme radyüsü, haddeleme yönü gibi değişkenlerden etkilenmektedir. Deneysel çalışmada, sac anizotropisinin etkisini araştırmak amacıyla 0°, 45° ve 90° haddeleme yönlerinde düşük karbonlu çelik sac malzeme kullanılmıştır. 90° V dip bükme kalıbında; 7,5 mm zımba uç yarıçapı kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler neticesinde, sonlu elemanlar simülasyonu sonuçlarıyla deneysel verilerin birbirlerine yakın olduğu belirlenmiştir. Haddeleme yönlerinin bükme açısı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Bükme işlemlerinde, geri esneme yerine ileri esneme değeri meydana geldiği belirlenmiştir [50].

Özdin ve arkadaşları, V dip bükme işleminde bükme açısı ve zımba radyüsüne bağlı olarak AISI 400 sac malzemenin geri ve ileri esneme davranışının incelenmesi üzerine deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada; 0,9 mm kalınlığındaki AISI 400 sac malzeme 30°, 45° ve 60° bükme açılarında ve 2, 4 ve 6 mm zımba radyüsünde bükülmüştür. Bükme açısı ve zımba radyüsü açısından, malzemelerin geri ve ileri esneme özellikleri tespit edilerek grafikler ve şekiller oluşturularak literatüre katkıda bulunmuştur [51].

Özdemir ve arkadaşları, farklı ısıl işlemlerin 16Mo3 sac malzemenin ileri-geri esneme miktarına etkisinin incelenmesi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, 16Mo3 malzemeler 90° V dip bükme kalıbında bükülerek, ileri-geri esneme miktarları arasındaki farklılıklar incelenmiştir. Bükme işlemlerinde malzemeler, ısıl işlem uygulanmadan, normalize edilerek ve (13 ve 30 dak) menevişleme işlemine tabi tutularak hazırlanmıştır. Deneyler, zımba parça üzerinde bekletilerek ve bekletilmeden direk uzaklaştırılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, ısıl işlemsiz ve normalize işleminde ileri esneme, menevişleme işleminde ise geri esneme meydana geldiği tespit edilmiştir. Zımbanın numune üzerinde 30 s bekletilmesi ileri ve geri esneme miktarını azalttığı tespit edilmiştir. Menevişleme süresinin artmasının geri esneme değerlerini arttırdığı belirlenmiştir [52].

2.3. Literatür Çalışmalarının Değerlendirilmesi

Literatür çalışmaları değerlendirildiğinde, sac metal kalıpçılığında karşılaşılan geri ve ileri esneme davranışını araştırmak amacıyla çalışmalar yapıldığı tespit edilmiştir. Geri ve ileri esnemenin bilinmesi, hem ürün kalitesi hem de kalıp açısından önem arz etmektedir. Yapılan araştırmalar neticesinde, bükmede geri ve ileri esnemeye neden olabilecek etkenler belirlenerek en uygun kalıp tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. İdeal kalıp tasarımı ve imalatı deneme-yanılma yöntemi ile harcanan zamanı ve iş gücü maliyetini de azaltmaktadır.

Geri ve ileri esneme üzerine yapılan deneysel ve teorik çalışmaların yanı sıra, bazı araştırmacılar matematiksel modellemeler geliştirerek bu konudaki eksiklikleri gidermeye çalışmışlardır. Genellikle, deneysel ve teorik çalışmalarda yaygın olarak V bükme, L kenar bükme ve V serbest bükme teknikleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar neticesinde, elde edilen geri ve ileri esneme sonuçları bazı araştırmacılar tarafından yeterli bulunurken, bazıları ise, farklı matematiksel modeller (SEY, YSA, Patran, Abaqus/Standart, Abaqus/CAE, Taguchi tekniği, vb.) geliştirmiş ve bunlardan faydalanılmıştır. Uygun bükme parametrelerine bağlı olarak geliştirilen modellerin ana amacı, bükme işlemi esnasında oluşan geri ve ileri esnemeyi en aza indirgeyerek istenilen boyutlarda üretim yapılabilmesini sağlamaktır.

Gerçekleştirilen literatür incelemesinde, malzemeye uygulanan ısıl işlemlerin geri ve ileri esneme davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmediği tespit edilmiştir. Uygulanan normalizasyon ve menevişleme işlemi neticesinde, malzeme özelliklerinin bükmede geri ve ileri esneme davranışına olan etkisi deneysel, mikro yapısal ve matematiksel olarak incelenmiştir. Çalışmada, ısıl işlemler uygulanmış sac malzemelerin bükme parametrelerine bağlı olarak, geri ve ileri esneme davranışına olan etkilerini esneme davranışına olan etkilerini aşlemler uygulanmış sac malzemelerin bükme parametrelerine bağlı olarak, geri ve ileri esneme davranışına olan etkilerini incelemek amacıyla, deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma neticesinde, elde edilen deney verileri yardımıyla matematiksel modeller geliştirilerek literatüre katkıda bulunmak amaçlanmıştır.

Yapılan bu tez kapsamında; Isıl işlemsiz (II), normalize (NI) ve menevişleme işlemi (MI) uygulanmış 3, 4, 5 ve 6 mm kalınlıktaki 16Mo3 sac malzemeler farklı bükme açılarında (30°, 60° ve 90°) ve 4,5 mm zımba uç radyüsünde bükülmesi neticesinde sac malzeme kalınlığının ileri ve geri esneme değerlerine olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, bükme parametrelerinden birisi olan, zımba uç yarıçapının, malzeme özelliklerine bağlı olarak, geri ve ileri esneme davranışlarına olan etkileri incelenmiştir. 90° bükme işleminde, farklı zımba uç radyüsleri (R2, R3, R4, R5 ve R6 mm) kullanılarak, 4 mm kalınlığındaki ısıl işlemsiz (II), normalizasyon (NI) ve menevişleme işlemi (MI) uvgulanmış sac malzemeler üzerine bükme işlemi uvgulanmıştır. Bükme işlemleri, zımbanın sac malzeme bükme deformasyon bölgesinde bekletilmeden direk ve 30 saniye (30 s) bekletilmesi neticesinde kaldırılarak gerçekleştirilmiştir. Isıl işlemsiz (II), normalize (NI) ve menevislenmis (MI) sac malzemelerin bükülmesi neticesinde, bükme deformasyon bölgelerinden parçalar çıkartılarak deformasyona bağlı tane yönlenmesi ve deformasyon bantlarının oluşumu elektron ve optik mikroskopta mikro yapısal (ferrit fazı, perlit ve martenzit yapısı) olarak karakterize edilmiştir. Çekme deneyleri uygulanarak, ısıl işlemsiz (II), normalize (NI) ve menevişleme (MI) işlemi neticesinde; çekme, akma ve % uzama değerlerindeki değişimler ve kırık yüzeyler incelenerek sünek ve gevrek kırılmanın oluşum mekanizmaları incelenmiştir.

Deneyler neticesinde elde edilen geri ve ileri esneme değerleri kullanılarak polinom eğri denkleri türetilmiş ve deneysel çalışmada kullanılan bükme parametrelerinin geri ve ileri esneme üzerine olan etkilerini incelemek amacıyla "minitab ile analiz" programı yardımıyla malzeme özellikleri, bükme açısı, bükme uç yarıçapı ve sac malzeme kalınlığı arasındaki ilişki matematiksel olarak modellenerek ve her bir parametrenin etkisi ayrı ayrı değerlendirilerek literatüre katkıda bulunulmuştur.

3. SAC METALLERDE BÜKME

3.1. Bükme

Bükme işlemi, sac metal şekillendirme tekniklerinde talaş kaldırmadan yapılan en önemli uygulama alanlarından bir tanesidir. Bükme; işleme uygun bir kalıp aracılığıyla iş parçasına istenilen şekli ve profili kazandırmak amacıyla bir eksen etrafında döndürülmesi işlemidir. Bükme işlemleri neticesinde, sac malzeme üzerine kuvvet uygulandığında elastik ve plastik deformasyon meydana gelmektedir. Uygulanan kuvvete bağlı olarak malzeme üzerinde akma gerilmesi aşılamadığı takdirde elastik deformasyon (kalıcı olmayan şekil değiştirme), akma gerilmesi aşıldığı takdirde ise, kalıcı şekil değiştirme plastik deformasyon meydana gelmektedir.

3.2. Bükme Tekniği

Sac metal şekillendirme işlemlerinde, zımba sac malzeme üzerinden kaldırıldığında sac malzemenin iç kısmında basma, dış kısmında ise çekme gerilmesi meydana gelmektedir. Çekme ve basmaya ayrılan kısımları birbirinden ayıran çizgiye nötr eksen denilmektedir [53]. Bükme uygulanan bölgede sac kalınlığı değişmediği kabul edilecek olursa, nötr eksen sac malzemenin ortasından geçmektedir. Malzeme üzerinde meydana gelen gerilmelerden dolayı, iç deformasyon bölgesinde kısalma, dış deformasyon bölgesinde ise uzama meydana gelmektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Bükme işlemi neticesinde meydana gelen basma ve çekme gerilmesi

3.3. Bükme Tekniği Çeşitleri

Endüstride sac metal şekillendirme yöntemlerinden biri olan bükme işleminde en çok kullanılan yöntemler V bükme ve U bükme teknikleridir. V bükme kendi içinde serbest bükme, dip bükme, kenar bükme ve açısal bükme gibi alt gruplara ayrılabilir.

Genellikle, endüstride 90° V-bükme kalıbı en çok kullanılanıdır. Bu tip bükme kalıplarına dip 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 (Şekil 3.2.a). "Dar açılı V-bükme" işlemi genellikle, basınçlı havayla çalışan bükme kalıplarında yapılmaktadır (Şekil 3.2.b). 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 (Şekil 3.2.c). "Ofset bükme" kalıbı, iki 90° bükme işlemini bir arada yapabilir. Bu nedenle, bu tip kalıplara ofset bükme kalıpları denir (Şekil 3.2.c).



Şekil 3.2. Bükme işlem çeşitleri-1; a) V dip bükme, b) Dar açılı V-bükme, c) Flanş bükme, d) Ofset bükme, e) Z bükme kalıbı

"Katlama kalıbı" sac malzemelerin kenarlarını birbiri üzerine katlayan kalıptır (Şekil 3.3.a). 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 (Şekil 3.3.b). Basit bükme kalıbı genellikle düz sac malzemelere, bazen de ön bükme işlemi yapılacak

parçalara uygulanır. "Kıvırma bükme" kalıbı parça ucunun yuvarlatılması veya halka şeklinde kalıplanması, kıvırma kalıplarıyla yapılır (Şekil 3.3.c) [54].



Şekil 3.3. Bükme işlem çeşitleri-2; a) Katlama kalıbı, b) Kavis bükme, c) Kıvırma bükme,

"Tüp bükme" kalıpları genellikle kıvırma kalıplarına benzer. Her iki ucu ön bükme kalıplarıyla biçimlendirilen parça, ikinci veya daha fazla kalıplama işlemleriyle tüp şeklinde kalıplayan kalıplara denir (Şekil 3.4.a). Dört kanallı bükme kalıbı küçük parçaların kısa zamanda ve seri halde kalıplanabilmesi için "çoklu V-bükme" kalıbı kullanılır (Şekil 3.4.b). 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 (Şekil 3.4.c). 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 3.4.d) [54].



Şekil 3.4. Bükme işlem çeşitleri-3; a) Tüp bükme, b) Çoklu V-bükme, c) Kanal bükme d) U-bükme

"Oluk bükme" kalıpları genellikle tek veya çok sıralı yapılmaktadır (Şekil 3.5.a). Bu kalıplarla tek vuruşta bir oluk bükmeden dört oluk bükmeye kadar kalıplama yapılabilmektedir. "Çok profilli bükme" kalıpları değişik konstrüksiyon ve uygulamalara açık kalıplardır (Şekil 3.5.b). 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 3.5.c) [54].



Şekil 3.5. Bükme işlem çeşitleri-4; a) Oluk bükme, b) Çok profilli bükme, c) Pabuç bükme

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 eksenlenmeleri gerekmektedir.

3.3.1. V dip bükme

V dip bükme süresince zımba (ıstampa-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 (Şekil 3.6.a). Bükme olayı ilerledikçe sürüklenme ve dolayısı ile malzemenin reaksiyonu daha da artmaktadır (Şekil 3.6.b). 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 3.6.c). Zımba sac malzeme üzerinden kaldırıldığında bükme işlemi tamamlanmaktadır. Şekil 3.6' da V dip bükme olayı yer almıştır [13].



Şekil 3.6. V dip bükme tekniği

3.3.2. Serbest bükme

Serbest bükmede; sac parça aşağıda yer alan kalıbın kenarları tarafından desteklenirken zımbanın aşağı doğru inmesi ile gerekli bükme açısı oluşur. Şekil 3.7' de görüldüğü üzere w kalıp açıklığı, R_p zımba radyüsü, R_d kalıp radyüsü, θ açısı bükme açısı θ' ise büküm öncesi zımba açısıdır. $\Delta\theta$ ise geri esneme açısıdır. Sac parçanın aldığı şekil itibari ile V dip bükmeye benzemesine rağmen sac parçanın kenarları bükme işleminin başlangıcında ve bitiminde de serbest haldedir.



Şekil 3.7. Serbest V bükme işlemi [13]

3.3.3. Kenar bükme

Kenar bükme yönteminde, sac malzeme pot çemberi tarafından sabit pozisyonda tutulur. Şekillendirici ıstampa aşağı doğru inerek sac malzemeyi şekillendirir. Bükülecek malzemenin uzunluğu sacın diğer bölgesinden kısa ise kenar bükme (L) yöntemi tercih edilir. Şekil 3.8' de kenar bükme işlemi ve elemanları görülmektedir [55].



Şekil 3.8. Kenar bükme işlemi ve elemanları

4. BÜKMEDE GERİ VE İLERİ ESNEME

Sac metal şekillendirme uygulamalarında, özellikle sac metal bükme işlemlerinde, istenilen açı ve ölçüye sahip ürünler elde edebilmek için geri ve ileri esneme miktarının dikkate alınması gerekmektedir. Sac malzeme şekillendirme işleminde, malzeme üzerinden yükün kaldırılması neticesinde, elastik geri dönüşten dolayı meydana gelen geri ve ileri esneme, çıkan ürünlerin kalitesini olumsuz yönde etkilemekte hatta ciddi geometrik hatalara sebep olabilmektedir [56]. Bu hataları minimum seviyeye indirebilmek için malzeme özellikleri, malzeme kalınlığı, sac anizotropisi, bükme açısı, bükme kavisi, bükme kuvveti, zımba uç radyüsü, vb. parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Bu parametreler kontrol altına alındığında uygun açı ve ölçüye sahip ürünler elde edilebilmektedir.

Bükme işlemi neticesinde sac malzemenin iç deformasyon bölgesinde basma dış deformasyon bölgesinde ise çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Malzeme üzerine uygulanan yük geri alındığı zaman iç ve dış kısımlardaki gerilmelerden dolayı bükülen malzeme bir miktar geri veya ileri doğru esnemektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Bükmede geri ve ileri esnemenin belirlenmesi; a) Geri esneme, b) İleri esneme

Malzemenin bükme işleminden sonra bükme açısının azalmasına geri esneme (Şekil 4.1.a), bükme neticesinde elde edilen büküm açısının büyümesine ise ileri esneme denilmektedir (Şekil 4.1.b). Sac metal endüstrisinde, özellikle sac bükme işleminde, geri ve ileri esneme çok önemli bir etkiye sahiptir [42-48]. Geri ve ileri esnemede yükün kalkması esnasında elastik düzelmeden dolayı en büyük etken ölçü hassasiyetidir.

4.1. Geri ve İleri Esneme Miktarına Etki Eden Faktörler

Bükme işlemi neticesinde meydana gelen geri ve ileri esneme birçok faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu etkenlerin bazıları aşağıda verilmiştir [57].

- Malzemenin özelliklerine (kimyasal bileşimine),
- Malzemenin kalınlığına,
- Zımbanın sac malzeme üzerinde bekleme süresine,
- Malzemenin hadde yönüne,
- Uygulanan kuvvete,
- Zımba uç yarıçapına,
- Bükme açısına,
- Federlemeye (güçlendirmenin),
- Kalıp boşluğuna,
- Bauschinger etkisine,
- Tane boyutuna,
- Kalıntı gerilmelere,
- İşlem parametrelerine (sıcaklık, ıslak/kuru işlem vb.),

Yukarıda verilen etkenlerin geri ve ileri esneme üzerindeki etkilerinin neler olduğu aşağıda detaylandırılmıştır [57-59].

4.1.1. Malzeme özelliklerinin geri ve ileri esneme miktarına etkisi

Geri ve ileri esneme değeri malzemelerin özelliklerine göre önemli değişiklikler göstermektedir. Malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak kalıp tasarımı yapılmasında fayda vardır. Kullanılan sac malzemelerin; elastikiyet modülü, akma gerilmesi, kopma gerilmesi ve çekme gerilmesi gibi önemli parametrelerin tespit edilmesi gerekmektedir. Geri ve ileri esnemenin sebeplerinden birisi olan malzeme özellikleri, malzemenin gerilme-gerinim ilişkisiyle açıklanabilir. Şekil 4.2' de gerilme-gerinim eğrisi gösterilmektedir.

26



Şekil 4.2. Gerilme-gerinim diyagramı

Şekil 4.2' de gerilme-gerinim eğrisinde G noktası, sac metal levhanın şekillendirilmesi esnasında uygulanan kuvvete ait gerilmeyi göstermektedir. O-A doğrusu ise gerilmegerinim ilişkisinin orantılı olarak değiştiği elastik bölgedir. Form verme işlemi tamamlanıp, parça üzerinden kuvvet kaldırıldığında gerinim X değerini alır. Bu malzemenin plastik bölgedeki elastikiyetini belirtir. X-G¹, parçanın eski haline dönmeye çalışan miktarını belirtir, O-X ise kalıcı deformasyon değerini belirtir. Şekillendirme sırasında akma bölgesini aşan gerilmenin oluştuğu durumda geri ve ileri yaylanma etkisi gözlenmektedir [14].

Malzeme özellikleri açısından, geri ve ileri esnemeye bir başka sebep ise, malzemenin bükülen bölgelerindeki atomların hareketleridir. Şekil 4.3' de malzemelerin atom hareketleri gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Bükmenin sebep olduğu atom hareketleri

Şekil 4.3 incelendiğinde, parçanın iç kısımlarında basma, dış kısımlarında ise çekmenin meydana geldiği görülmektedir. Parça büküldüğünde, iç ve dış yüzeyinde sırayla basma ve çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Genelde malzemede, bası yönündeki gerinim,

çeki yönündeki gerinimden daha büyüktür. Bu nedenle, atom hareketlerinin iç kısımda yoğunlaştığı görülmektedir.

4.1.2. Malzeme kalınlığının geri ve ileri esneme miktarına etkisi

Parça kalınlığı da bükme açısı kadar olmasa da geri ve ileri esnemeyi etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Bükme radyüsü (R) ile sac kalınlığının (S) geri ve ileri esnemeye etkisi R/S bükme oranına göre açıklanır. Sac kalınlığı azaldıkça R/S oranı artacağından dolayı geri ve ileri esneme miktarı da artar. Sac kalınlığı arttıkça R/S oranı azalacağından dolayı geri ve ileri esneme miktarı da azalır [60].

4.1.3. Zımbanın sac malzeme üzerinde bekleme süresinin etkisi

Zımbanın sac malzeme üzerinde bekleme süresi ileri ve geri esneme miktarlarını azaltmaktadır. Bu durum, dislokasyonların artan deformasyona bağlı olarak yoğunluğunun artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dislokasyon yoğunluğunun artmasıyla dislokasyonların birbirlerinin hareketlerini engelleyerek ileri ve geri yaylanma değerlerini etkilemektedirler. Zımbanın malzeme üzerinde bekletilmesi geri ve ileri esnemeyi azaltmasına rağmen, zamanı arttırdığından, maliyetin de artması söz konusudur. Bu nedenle uygulaması yapılırken bütün koşullar dikkate alınmalıdır [45, 57].

4.1.4. Hadde yönünün geri ve ileri esnemeye etkisi

Haddeleme yönü (anizotropi) şekillendirilebilirliği etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Metallerde anizotropinin en önemli nedeni, malzeme yapısındaki tanelerin kristalografik düzensizliğidir. Taneler, farklı doğrultularda yönlenmektedirler (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Metallerin haddeleme yönleri

Soğuk haddelenmiş saclarda kalıntı ve boşlukların haddeleme doğrultusunda uzaması ve sıralanmasıyla oluşan bantlı yapı malzemede anizotropi meydana getirir [8]. Bantlı içyapı, haddeleme doğrultusuna dik doğrultuda çok sık tekrarlanan süreksizliklerden dolayı anizotroptur ve bu doğrultuda süneklik düşüktür. Dolayısıyla bükmede hadde yönü çok önemlidir. Bükme kıvrımı sacın haddeleme yönüne dik olmalıdır aksi takdirde bükme bölgesinde çatlaklar oluşmaya başlar (Şekil 4.5). Bu nedenle bükülecek bir sac levha veya rulodan kesilirken bu nokta kesinlikle unutulmamalıdır [61].



Şekil 4.5. Bükme işleminde hadde yönünün gösterilmesi; a) Hadde yönüne paralel bükme, b) Hadde yönüne dik bükme [61].

Levha veya şerit malzemelerin hadde yönündeki bükme işleminde, bükme kavis yarıçapı (R) sınırlıdır. Hatalı bükmeyi önlemek için şerit malzeme, sac levha hadde yönüne göre belli bir eğim açısı altında kesilir. Hadde yönüne göre şerit malzeme eğim açısı β büyütülebilir. Genellikle hadde yönüne dik bükme en çok uygulanandır, ancak bazı malzemelerde kavis yarıçapı küçük bükmelerde mümkün olmayabilir. Bükme işlemi

esnasında haddeleme yönüne dikkat edilmezse, parçanın bükülen kısmında çatlaklar oluşabilir [61].

4.1.5. Bükme kuvvetinin geri ve ileri esnemeye etkisi

Komple kalıbı oluşturan elemanların dayanımı, kalıpta meydana gelen kuvvet dağılımına göre hesaplanır. Kalıplama kuvvetine kalıbın çift etkili oluşu, şerit malzemedeki ölçü fazlalığı, uygun olmayan kalıp boşluğu, kalıplanacak parçadaki ölçü fazlalığı ve benzeri sebepler etki etmektedir. Bükme kuvvetinin tam olarak hesaplanması etkin bir bükme yapılmasını sağlamaktadır. Çeşitli deneysel çalışmalar bükme kuvvetinin arttırılmasının geri esnemeyi azalttığını gösterse de, bükme kuvvetinin gereğinden fazla uygulanması hem malzemede istenmeyen şekil değişikliğine yol açacak hem de malzemenin dayanımını ciddi oranda azaltacaktır. Bunun yerine zımba sac malzemenin üzerinde biraz fazla tutularak geri esneme engellenebilir [62]. V dip bükme kalıplarında bükme işlemi ve kuvveti Şekil 4.6' da gösterilmektedir.



Şekil 4.6. V bükme işlemi ve kuvveti

V kalıplarda bükme kuvveti hesabı "Eş. 4.1" ile ifade edilmektedir [63].

$$P_{\rm b} = \frac{Cx\sigma_{\rm b}xBxS^2}{W} \quad (\rm kg) \tag{4.1}$$

C: W/S' ye bağlı bir katsayı olup ''Eş. 4.2'' ile hesaplanır.

$$C = 1 + \left(4x\frac{S}{W}\right) \tag{4.2}$$

 P_e , Son bükme kuvveti ''Eş. 4.3'' ile hesaplanır. $P_e = P_b x2$ (4.3)

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan notasyonlar aşağıda verilmiştir.

P_b; V bükme kuvveti (N),

- P_e; Son bükme kuvveti (N),
- B; Sac malzeme genişliği (mm),
- S; Sac malzeme kalınlığı (mm),
- σ_b ; Malzeme çekme mukavemeti (N/mm²),
- W; Kalıp ağzı açıklığı (mm),
- C; W/S oranına bağlı bir katsayı

4.1.6. Zımba uç yarıçapının geri ve ileri esnemeye etkisi

Bükme işleminde, bükme yarıçapının geri ve ileri esneme üzerindeki etkisi oldukça önemlidir. Bükme yarıçapı küçüldükçe şekil değişimi artar. Özellikle iç kavis 0' a yaklaştıkça, dış tarafta uzama artar ve çatlamalara neden olur. Bu durum bükmede iç kavisin '0' olamayacağını gösterir. Uygun olmayan bir bükme yarıçapı seçimi geri ve esneme miktarı artırır veya azaltır [42-46, 57]. Bükme yarıçapının geri ve ileri esnemeye etkileri aşağıda verilmiştir

- Geri esneme, bükme yarıçapıyla doğru orantılı; ileri esneme ise ters orantılı olarak değişir.
- R/S oranı geri ve ileri esnemeyi etkilemektedir. R/S oranı arttıkça geri esneme artarken, ileri esneme miktarı azalmaktadır.
- Geri ve ileri esneme daha çok kavisli kısmın kavisine bağlı olduğundan, kavisin esas yarıçapı ile ilgili daha iyi bir tanımlama vermek için bir K sabiti kullanılır.

K sabiti, sac numunelerin ortasından geçen tarafsız nötr eksenin, sac malzeme kalınlığına oranıdır. Bükme işlemi esnasında numunelerin üst kısmı çekmeye, alt kısmı ise basmaya zorlanır. Tarafsız eksen ise çekilen alandan basılan alana doğru kaymaya başlar. K sabiti, malzeme fiziksel özelliklerine ve kalınlığına göre değişir [59].

4.1.7. Bükme açısının geri ve ileri esnemeye etkisi

Bükme açısı, geri esneme miktarını etkileyen en önemli etkenlerin başında gelmektedir. İstenilen açıdaki bükmenin elde edilebilmesi için, zımbaya verilmesi gereken bükme açısı geri ve ileri esneme miktarı kadar azaltılır veya arttırılır. Bükme açısının arttırılması veya azaltılması malzeme cinsine göre değişkenlik göstermektedir [42-45, 52-55, 57]. Yumuşak çelik, alüminyum, bakır, pirinç için geri ve ileri esneme sert malzemelere göre daha azdır. Geri ve ileri esneme miktarı tam olarak bilindiği zaman, bükme zımbası, geri esneme miktarı kadar küçültülerek veya ileri esneme değeri kadar büyültülerek istenilen bükme elde edilebilir.

4.1.8. Federlemenin geri ve ileri esnemeye etkisi

Federleme; bükülen malzemenin dayanımını arttırmak amacıyla parça üzerine, özel formlar verme, kordon çekme, çeşitli kaburgalar oluşturma gibi işlemlere verilen addır. Amaç, hem malzeme dayanımını arttırmak, hem de geri ve ileri esnemeyi önlemektir [64]. Şekil 4.7'de parça üzerine oluşturulmuş çeşitli federleme örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Farklı biçim ve kalınlıkta federleme işlemi [57]

Şekillerden de anlaşılacağı gibi parça üzerinde oluşturulacak feder, hem malzemenin estetik görünümünü bozmayacak, hem de parçanın çalışmasına engel teşkil etmeyecek şekilde tasarlanmalıdır [57].

4.1.9. Kalıp boşluğunun geri ve ileri esnemeye etkisi

İstenilen bükmenin elde edilebilmesi için, yani geri ve ileri esneme miktarının azaltılması için bükme kalıbının kalıp boşluğu iyi ayarlanmalıdır. Genellikle, kalıp boşluğunun tek taraflı olarak verilmesinin, geri ve ileri esnemeyi azalttığı gösterilmiştir [65]. Malzeme kalınlığına göre, tek taraflı kalıp boşluğu değerleri Çizelge 4.1' de verilmiştir.

| Malzeme Kalınlığı, S, mm | Kalıp Boşluğu |
|--------------------------|-----------------|
| 0 - 0,50 | (1,07 - 1,09)xS |
| 0,50 - 1,25 | (1,08 - 1,10)xS |
| 1,25 - 3,25 | (1,10 - 1,12)xS |
| 3,25 ve yukarısı | (1,12 - 1,14)xS |

Çizelge 4.1. Tek taraflı kalıp boşluğu değerleri

Çizelgeden de anlaşılacağı gibi numunelerin sac kalınlığı (S) arttıkça kalıp boşluğu değerleri de artış göstermektedir. Yani, sac kalınlığı ile kalıp boşluğu doğru orantılı olarak değişmektedir.

4.1.10. Bauschinger etkisinin geri ve ileri esnemeye etkisi

Bauschinger etkisinde malzeme, başlangıçta çekmeye maruz bırakılarak plastik deformasyona maruz bırakılıp, yük boşaltıldıktan sonra ters yönde uygulanan basma işlemi neticesinde, malzemenin daha düşük gerilme seviyesinde aktığı gözlenmektedir [66]. Dislokasyon sayısının artmasından ve dislokasyonların tanecikli bir yapı içinde düzenlemesinden sonra, malzeme üzerindeki yükün kaldırılmasıyla, dislokasyonların oluşturduğu bu tanecikli yapıda bir değişim görülmemektedir. Mekanik açıdan oldukça kararlı bir durumda olan bu dislokasyon ağı ve engeller karşısında kilitlenmiş dislokasyonlar, numune üzerindeki yük kaldırıldığında, bulundukları konumları korumaya devam etmektedir. Fakat, numune üzerine ters yönde gerilim uygulandığı zaman, dislokasyonların çok daha kolay harekete geçmelerinden dolayı, malzemenin akma dayanımıda daha düşük bir değere düşmektedir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Bauschinger etkisinde akma dayanımında meydana gelen düşüş

Akma dayanımındaki bu düşüş, bir engel karşısına yığılan dislokasyonları ters yönde hareket ettirilmesinde, bir engelle karşılaşmadan, daha rahat harekete geçebilmelerinden kaynaklanmaktadır. Hatta engel karşısında yığılan ve sıkışan dislokasyonlar, ters yönde bir miktar gerilim de uyguladıkları için, dislokasyonların ters yönde harekete geçmeleri, hiç şekil değişimine girmemiş bir malzemeye kıyasla daha da kolay gerçekleşmektedir. Gerinim sertleşmesinin uygulanan gerilimin yönüne bağlılığını tarif eden bu etkiye, Bauschinger etkisi denilmektedir [67].

4.1.11. Tane boyutu

Bükme sonrası geri ve ileri esneme davranışının araştırıldığı çalışmalar incelendiğinde, sac malzeme tane boyutunun da geri esneme üzerine etkisinin bulunduğu söylenebilir. Literatür incelendiğinde, tane boyutunun geri yaylanma davranışı üzerine etkisini konu alan mikro sac şekillendirmede pirinç malzemenin geri esneme davranışını konu alan çalışmayla karşılaşılmaktadır. Bu çalışmada, pirinç sac malzeme mikro şekillendirme işlemine tabi tutulmaktadır. Şekillendirme işlemi sonrasındaki geri yaylanma davranışı incelendiğinde, kalınlığın tane boyutuna oranının (S/D) artmasıyla, geri yaylanma miktarının azaldığı gözlenmektedir [68]. Bu noktada, tane boyutu küçüldükçe, geri yaylanma miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Ancak, çelik sac malzemelerde durumun farklı olması düşünülmektedir. Tane boyutu küçük malzemelerde akma dayanımı yüksekken, şekillendirilebilirlik kötü olmaktadır. Tane boyutu büyük olanlarda ise akma

dayanımı düşmekte, şekillendirilebilirlik de iyileşmektedir. 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 esneme miktarının daha fazla olması beklenebilir [8].

4.1.12. Kalıntı gerilmeler

Dışarıdan herhangi bir etki olmadığı halde bir malzemede var olan gerilmelere kalıntı gerilmeler denir. Düzenli olmayan kalıntı gerilmeler, plastik deformasyon veya malzemedeki sıcaklık gradyanları nedeni ile oluşabilir. Sıcaklık gradyanları, ısıl işlem yapılmış metalik ürünlerin veya döküm ürünlerinin katılaşması sırasındaki, farklı kesitlerdeki farklı soğuma hızları sonucu meydana gelir. Bütün plastik şekil verme işleminde malzemeler düzenli olarak plastik deformasyona uğramadıklarından kalıntı gerilmeler oluşur (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Kalıntı gerilmeler, a) Haddelemede uniform olmayan plastik deformasyon, b) Oluşan kalıntı gerilmelerin şematik dağılımı [69]

Plastik deformasyon sadece yüzeye yakın kısımlarda meydana geldiğinden, buradaki taneler deformasyon sonucu uzar, iç kısımdaki taneler ise deformasyondan etkilenmediği için ayrı kalır. Bu farklılığa uyum sağlanması için iç gerilmeler oluşur. İç kısımdaki taneler, yüzeyde uzamış taneleri kendilerine uydurmak için yüzeyde basma, yüzeydeki tanelerin iç kısımdaki taneleri kendilerine uydurmak için uzatmak istediklerinden iç kısımda da çekme gerilmeleri meydana gelir.

Genel olarak düzenli olmayan deformasyonun meydana getirdiği kalıntı gerilmenin yönü, bu gerilmeyi meydana getiren plastik deformasyonun yönüne terstir. Örneğin; plastik deformasyonun çekme yönünde olduğu bir bölgede basma yönünde kalıntı gerilme meydana gelir. Kalıntı gerilmelerin bulunduğu metalik bir parça statik denge halindedir. Kalıntı gerilmeler sadece elastik gerilmeler olup, bir parçadaki kalıntı gerilmenin maksimum değeri ancak parçanın akma gerilmesi değerine ulaşabilir. Kalıntı gerilmeler ısıl işlem veya oda sıcaklığında yapılan plastik deformasyonla azaltılabilir veya yok edilebilir. Kalıntı gerilmelerin bulunduğu bir parça, yeterli bir süre oda sıcaklığında bırakıldığı zamanda bu gerilmeler yok olabilir [69].

4.1.13. İşlem parametrelerinin geri ve ileri esnemeye etkisi

İşlem parametreleri, malzemenin bulunduğu ortamın fiziksel koşulları ile ilgili etkenlerdir. Burada ortamın sıcaklığı, ısısı, kirliliği, ıslak/kuru gibi parametrelerin malzemenin fiziksel özelliklerini az da olsa etkilediği çeşitli deney ve araştırmalarla saptanmıştır [57]. Bu yüzden bükülecek sac malzeme istenilen çalışma koşullarına uygun olarak bükülmeli, büküm yapılan pres, kalıbın dişi ve erkek kısımları temiz olmalı, ortam sıcaklığı iyi ayarlanmalıdır.

4.2. Bükmede Geri ve İleri Esnemeyi Giderme Yöntemleri

Bükme işlemi neticesinde, sac malzemede meydana gelen elastik gerilmeler aşılmakta fakat akma gerilmeleri aşılmamaktadır. Sac malzeme üzerinden yük kaldırıldığında, iç kısımda basma gerilmeleri, dış deformasyon bölgesinde ise çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Genellikle sac malzemede, meydana gelen basma gerilmeleri, çekme gerilmelerinden büyük olduğunda sac malzemede geri esneme, deformasyon bölgesinde oluşan çekme gerilmeleri, basma gerilmelerinden büyük olduğunda ise, ileri esneme davranışı meydana gelmektedir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Bükmede meydana gelen gerilmeler ve geri-ileri esneme kuvvetleri

Bükme işlemi neticesinde meydana gelen geri ve ileri esneme, tamamen yok edilemez fakat minimum seviyeye indirilebilir. Bu nedenle, kalıp tasarımcıları ve imalatçıları tarafından farklı teknik ve yöntemler geliştirilmiştir [61]. Geri ve ileri esneme miktarlarını azaltmak amacıyla kullanılan bazı yöntemler şunlardır; bükme açısının artırılması, çift bükme tekniği, ezerek bükme, germe altında bükme, zımba ucunun iç bükey yapılması ve zımbanın malzeme üzerinde bekletilmesi geri ve ileri esneme değerlerini azaltmaktadır.

4.2.1. Zımba bükme açısının arttırılması veya azaltılması

İstenilen açıda bükme yapılabilmesi için bükme açısı geri esneme miktarı kadar azaltılır veya ileri esneme değeri bükme açısına eklenir. Bükme açısının azaltılması veya artırılması en çok tercih edilen yöntemdir. Şekil 4.11' de bükme açısının azaltılması ve arttırılması yönteminin uygulama şekli verilmiştir.



Şekil 4.11. Bükme açısının azaltılması ve arttırılması; a) Geri esneme, b) İleri esneme [70]

Bükme açısının azaltılması ve arttırılması yönteminin olumlu sonuçlarının yanı sıra çeşitli durumlarda da olumsuz sonuçlarıyla karşılaşılmaktadır. Bükme açısının arttırılması veya azaltılması malzeme özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Yumuşak çelik, alüminyum, bakır, pirinç için geri ve ileri esneme sert malzemelere göre daha azdır. Geri ve ileri esneme miktarı tam olarak bilindiği zaman, kalıp geri ve ileri esneme miktarı kadar küçültülüp büyültülerek istenilen şekle ve profile sahip ürünler elde edilebilmektedir.

4.2.2. Taban (ezme) bükme

Bükme bölgesi şekil değiştirmeyecek şekilde zımba ve dişi kalıp arasında ezilerek şekil verilir. Taban ezme işlemi, basma gerilmesini arttıracağından, geri ve ileri esneme miktarını ortadan kaldıracaktır. Ancak taban bükme yapabilmek için tonajı yüksek pres tezgahına ihtiyaç vardır. Ayrıca pres başlığının kurs boyu iyi ayarlanmalıdır. Aksi takdirde kalıba ve malzemeye zarar verilebilir. Eğer, pres kurs boyu iyi ayarlanmaz ise, fazla kurs boyundan dolayı kalıbın çatlamasına, malzemenin bükme alanının ezilmesine ve malzemede kulak verme olayına neden olacaktır [59]. Şekil 4.12' de ezerek bükme işleminin uygulanışı gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Ezerek bükme işlemi [70]

4.2.3. Gerdirme bükme

Gererek bükmede, saclar genellikle iki ucundan veya bazen tüm çevresi boyunca çenelere bağlandıktan sonra zımba ile bastırılarak şekillendirilir. Germe bükme işleminde, bütün

malzemeler akma sınırına yaklaşıncaya kadar çekmeye tabi tutulur ve gergin haldeki parça zımba üzerine bastırılır. Bu şekilde yapılan bükme işleminde parça bir miktar esner. Gerdirme bükme işlemi, kavis yarıçapı büyük parçalara uygulanır. Şekil 4.13' de gerdirme bükme işlemi uygulaması gösterilmektedir [59].



Şekil 4.13. Gerdirme bükme tekniği [71]

Şekil 4.13 incelendiğinde, gerdirme bükme yönteminde, sert bir yüzey üzerine bağlanan kalıba vuruş esnasında metal levhayı tutan iki çene levhayı gerdirecek şekilde hareket ettirilmektedir. Kalıp dikey olarak hareket ederken, çeneler yatay olarak hareket eder. Genel olarak 50-150 tonluk bir kuvvet hem kalıba, hem de çenelere uygulanmaktadır. İlk yapılan işlem gerdirme işlemi olup, sac levha elastik sınırının üstüne kadar gerdirilerek kalıp şeklini alması sağlanır. İşlem sonucunda, sac levhada ihmal edilebilecek bir incelme $(S_1 < S_0)$ ve yapılan işlem sonucu olarak da kalıcı olarak çok az bir geri esneme meydana gelmektedir. İki kez bükülecek geniş parçaların diğer metotlarla şekillendirilmesi zor olduğunda, germe bükme yöntemi kullanılarak kolayca şekillendirme yapılabilir. Artık malzeme miktarı oldukça fazla olduğundan, kenarları düzeltmek için biraz malzeme bırakılmalıdır [72].

4.2.4. Zımba ucunun iç bükey yapılması

Zımba ucunu iç bükey yapma fazla tercih edilen bir yöntem değildir. Uygulama alanı kalın parçalarla sınırlıdır [72]. Uygulama yöntemi Şekil 4.14' de aşamalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.14. Zımba ucunun iç bükey yapılması yöntemi

4.2.5. Zımbanın malzeme üzerinde bekletilmesi

Zımbanın malzeme üzerinde bekletilmesi geri ve ileri esnemeyi azaltmasına rağmen, zamanı arttırdığından, maliyetin de artması söz konusudur. Bu nedenle uygulaması yapılırken bütün koşullar dikkate alınmalıdır [57]. Yukarıda, sözü edilen yöntemler tek tek değerlendirildiğinde, en kolay çözümün, zımbanın bükme açısının geri ve ileri esnemeye bağlı olarak azaltılması veya arttırılması olduğu görülmektedir. Buradaki problem, bükme açısının ne kadar büyük veya küçük yapılacağına karar verilmesidir. Bunlar için daha önceden deneysel olarak çalışılarak hazırlanmış çeşitli grafik ve tablolardan yararlanılabilir. Ancak bu tablolar yeterli düzeyde olmamakla birlikte, farklı kalınlık, özellik ve kimyasal kompozisyonlara sahip malzemeler için geri ve ileri esneme değerlerini veren tabloların literatüre kazandırılması gereklidir.

5. METALLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Malzemelerin üzerine uygulanan kuvvetlere karşı gösterdiği tepkiler mekanik davranış olarak tanımlanmaktadır. Bu davranışlar; değişik tür zorlanmalar altında oluşan gerilme ve şekil değiştirmeleri ölçerek ve gözlemleyerek saptanmaktadır. Cisimler artan dış zorlanmalar karşısında önce şekil değiştirmekte, daha sonra dayanımını yitirerek kırılmaktadırlar. Metaller özellikle kuvvet taşıyan elemanlarda yaygın olarak kullanılır. Bu nedenle, malzemelerin mekanik özelliklerini bilmek büyük önem taşır. Mühendislik malzemelerin seçiminde sertlik, süneklik ve mukavemet gibi mekanik özelliklere bakılır. Bu mekanik özellikler ise, malzeme içyapısına bağlıdır. Malzeme içyapıları hakkında bilgi almak amacıyla metalografi deneyleri yapılır. Mühendislik malzemelerinin statik yük altındaki davranışlarını ve statik yüke dayanımlarını belirlemek amacıyla çekme veya basma deneyleri yapılır. Ayrıca malzemelerin kesilmeye, aşınmaya yani plastik deformasyona karşı direnci ise sertlik deneyleriyle ölçülür. Tüm bu deneyler tahribatlı malzeme muayenesi için gerekli yöntemleri kapsamaktadır [73, 74].

5.1. Çekme Deneyi

Tasarımda en çok önemsenen özellikler, malzemelerin ne kadar dayanıklı oldukları ve ne ölçüde şekil değiştirebilme kabiliyetine sahip olduklarıdır. Malzemelerin dayanım ve şekil değiştirme özelliklerini belirlemede kullanılan en yaygın teknik test çekme deneyidir. Deney sonucunda, gerçek gerilme, gerçek birim deformasyon eğrisinden akma gerilmesi, çekme dayanımı, elastisite modülü, elastik sınırı, rezilyans, tokluk, % uzama, % kesit daralması, pekleşme ve mukavemet katsayıları gibi mekanik özellikler belirlenmektedir. Çekme deneyi, bu amaç için hazırlanan bir test numunesinin (çekme numunesi) çekme makinesine bağlanarak çekme kuvvetine maruz bırakılmasıdır. Etki eden kuvvet numune koparılana kadar arttırılır. Bu esnada, etki eden kuvvet ve test numunesinde meydana gelen uzama sistem tarafından sürekli olarak kaydedilir [75]. Çekme deneyi standart olarak hazırlanmış deney numunesinin tek eksende belirli bir hızda ve sabit bir sıcaklıkta koparılıncaya kadar çekilmesidir. Çekme deneyi TS EN ISO 6892-1 standardında tanımlanmıştır. Çekme numunesi hazırlanması ise TS EN ISO 377 ve TS 138 EN 10002-1'

Çekme deneyi sonunda elde edilecek malzemenin mekanik özellikleri büyük oranda çekme numunesinin alındığı malzemenin imalat şekline, numunenin alınış şekli yönüne, numune boyutlarına ve numune şekline bağlı olmasının yanında deney şartlarına da bağlıdır. Şekil 5.1' de çekme cihazı ve elde edilen gerilme-uzama eğrisi gösterilmektedir [76, 77].



Şekil 5.1. Çekme cihazı ve elde edilen gerilim-uzama eğrisi [77]

Çekme deneyi sonuçları, belli bir miktar deformasyona veya uzamaya sebep olan kuvvet cinsinden bulunur. Çekme deneyi ile elde edilen gerilim–uzama (yük–uzama) eğrisini incelemek, malzemelerin deformasyon özelliklerini anlama açısından oldukça faydalıdır. Numune şekline bağlı kalmaksızın, deney ölçümleri gerilmenin tek eksenli halde olduğu kabul edilen bölgede yapılır [74].

Belirli bir yük seviyesine kadar numune elastik deformasyona uğradığından, kuvvetin kaldırılmasıyla birlikte numune orijinal boyutlarına döner. Bu kuvvet değeri genellikle elastik sınır olarak tanımlanır. Söz konusu kuvvetin yani elastik sınırın aşılması durumunda, malzemenin plastik deformasyona uğraması sonucu kalıcı bir şekil değişikliği meydana gelir.

Çekme deneyi sırasında parça, önce elastik şekil değişimine daha sonrada plastik şekil değişimine maruz kalmaktadır. Daha sonra parça kırılarak kopmaktadır.

5.1.1. Elastik şekil değişimi

Malzeme üzerine uygulanan kuvvet akma dayanımını geçmediği takdirde malzemenin elastik şekil değişimi, gerilim-uzama (σ - ε) diyagramının doğrusal olarak değiştiği ilk bölümünde gerçekleşmektedir. Burada uygulanan gerilme ve bu gerilmenin meydana getirdiği elastik birim şekil değişimi arasında *Hooke kanunu* geçerlidir. Elastik şekil değişiminde etkin olan malzeme özelliği (parametresi), elastiklik modülüdür. Kristal yapılı malzemelerde uygulanan gerilme (σ) ile birim elastik uzama arasında (ε) Hook kanunu ile ifade edilen doğrusal bir bağıntı ''Eş. 5.1'' de verilmektedir.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$
(5.1)

Burada, gerilme değeri ''Eş. 5.2'', birim şekil değiştirme ise ''Eş. 5.3'' eşitlikleri ile ifade edilmektedir [78].

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$
(5.2)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \tag{5.3}$$

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan notasyonlar aşağıda verilmiştir.

E; Elastik modül

F; Çekme kuvvet

A_o; Kuvvete dik kesit alanı

Δl; Uzama miktarı

l; Son ölçü boyu

l₀; İlk ölçü boyu

Elastisite modülü, malzemenin elastik davranışının en önemli faktörüdür. Geri yaylanmayı kontrol eden de elastisite modülüdür. Elastisite modülü malzemenin rijitliğinin bir ölçüsüdür. Sıcaklık arttıkça elastisite modülü azalır.

Sac malzemelerin elastiklik modülü değerinin geri esneme üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Bir malzemenin elastik deformasyona karşı koyma kabiliyeti, elastik rijitlik

olarak adlandırılmakta; elastiklik modülü de bunun bir ölçütünü ifade etmektedir. Elastiklik modülü yüksek olan malzemelerde, belli bir gerilme sistemi altında zorlanma ile ortaya çıkan elastik deformasyonlar, düşük elastiklik modülü değerine sahip malzemelere göre daha az olmaktadır. Metal malzemelerde atomlar arası bağ kuvvetine veya enerjisine dayanan elastik rijitlik ve bunun göstergesi olan elastiklik modülü, artan sıcaklık ve atomlar arası mesafe ile düşüş sergilemekte; malzemeye uygulanan ısıl işlemlerden, belli orana kadar yapılan alaşımlandırmadan, malzemenin mikro yapısından veya hata yapısından fazla etkilenmemektedir. Elastiklik modülünde sıcaklık ile ortaya çıkan düşüşler; atomlar arası mesafenin artması ve bağ kuvvetinin azalması ile bağdaştırılmaktadır. Anizotropik metallerin kafes yapıları dikkate alındığında, atomlar arası mesafelerin doğrultulara göre farklılaşması, bağ kuvveti ve elastik sabitlerin, dolayısıyla da elastiklik modülünün farklı kristalografik doğrultularda birbirinden farklı değerler sergilemesine yol açmaktadır [79].

Malzemelerin elastik özelliklerini belirleyen diğer bir parametrede poisson oranıdır. Elastik deformasyon esnasında, deney bölgesinin hacmi sabit kalmaz, poisson etkisi nedeniyle hacim değişimi meydana gelmektedir. Poisson oranı bir malzeme sabitidir. Çekmeye veya basmaya maruz kalan bir malzemenin elastik şekil değiştirmesi sırasında, atomlarının birbirine yaklaşması veya uzaklaşması söz konusu olduğu için hacminde de genleşme veya sıkışma şeklinde bir değişiklik söz konusu olacaktır. Bu şekilde hacim değişikliğine uğrayan bir malzemenin, zorlanma yönüne dik yönde uzanan doğrultulardaki boyutsal değişimi poisson oranı (v) ile hesaplanabilir (Şekil 5.2). Bu değer hemen hemen tüm metaller için 0,28-0,32 arasında bulunmakla beraber bir çok uygulamada genelde 0,3 değeri aldığı kabul edilir [75].



Şekil 5.2. Poisson oranının belirlenmesi

Şekil 5.2 incelendiğinde, plastik şekil değişimine maruz kalan bir malzemenin kafesinde genleşme veya sıkışma meydana gelmez, hacim şekil değişimi öncesi veya sonrası aynı değerdedir, diğer bir değişle plastik şekil değişimi sırasında hacim sabit kalır. Bu durumda, poisson oranı 0,5 değeri alır (şekil değişiminin yarısı x, diğer yarısı da y yönünde gerçekleşir).

5.1.2. Plastik şekil değiştirme

Malzemelerin akma dayanım değerinin üzerinde gerilme uygulanması durumunda, plastik yani kalıcı (geri dönüşümsüz) şekil değişimi başlamış olur. Bu durumda kayma mekanizması çalışır diğer bir değişle dislokasyonlar hareket ederek plastik şekil değişimi gerçekleşmeye başlar (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Plastik deformasyon bölgesi [75]

Ortam sıcaklık değerinin, plastik şekil değişim mekanizmaları üzerinde çok büyük etkisi vardır. Sıcaklık seviyelerine bağlı olarak plastik şekil değişimi; soğuk plastik şekil değişimi, ılık plastik şekil değişimi ve sıcak plastik şekil değişimi şeklinde olur. Bu iki mekanizmadan hangisinin etkin olduğu benzeş sıcaklık (T_B) ile belirlenir. Soğuk şekil değişimi için, T_B sıcaklığı $0 < T_B < 0.25$; ılık şekil değişiminde $0.25 < T_B < 0.5$; sıcak şekil değişimi için ise, $0.5 < T_B < 1$ değerleri arasındadır.

T_B sıcaklığı ''Eş. 5.4'' ile ifade edilmektedir [79].

$$T_B = \frac{T_{\rm C}}{T_{\rm E}} \tag{5.4}$$

Burada, T_C; çalışma sıcaklığı (°K), T_E ise, malzemenin ergime sıcaklığı (°K)'dır.

Benzeş sıcaklığın tanımından anlaşılacağı üzere, herhangi bir çalışma sıcaklığı, metalin erime sıcaklığına bağlı olarak soğuk şekil değiştirme veya sıcak şekil değiştirme olabilir. Örneğin; oda sıcaklığı, Fe, Al, Cu gibi birçok metal için soğuk şekil değiştirme bölgesinde kalır. Diğer yandan, Pb, Sn gibi düşük erime sıcaklığına sahip metaller için oda sıcaklığı sıcak şekil değişimi bölgesindedir.

<u>Soğuk şekil değişimi:</u> Soğuk şekil değiştirme, normal bir gerilim-uzama (σ - ε) eğrisinin plastik şekil değiştirme kısmı kullanılarak kolaylıkla açıklanabilir. Kayma ve ikizleme olarak iki çeşit soğuk şekil değiştirme mekanizması mevcuttur. Şekil 5.4' de kayma ve ikizleme deformasyon mekanizması görülmektedir [75].



Şekil 5.4. Soğuk deformasyon mekanizmaları; (a) kayma (b) İkizleme

Soğuk şekil değişiminde en etkin deformasyon mekanizması *kayma*' dır (Şekil 5.2.a). Kristal yapı içerisinde, dislokasyonların kayması ile plastik şekil değişimi gerçekleşir. Kayma ile hareket eden dislokasyonlar, yeni dislokasyonlar oluşmasına sebep olurlar. Böylece, dislokasyon yoğunluğu artar. Diğer yandan, yoğunluğu artan dislokasyonların hareketi, gerek diğer dislokasyonlar gerekse boşluk, arayer, yeralan, çökelti, tane sınırı gibi diğer engeller tarafından engellenmeye başlanır. Başka bir değişle dislokasyonların hareketlerini sürdürebilmeleri için gereken gerilme değeri gittikçe artar. Bu duruma *deformasyon sertleşmesi* veya *pekleşme* adı verilir. Bu nedenle, σ - ε diyagramının plastik bölgesinde artan şekil değiştirme ile gereken gerilme sürekli artma gösterir. Bu plastik şekil değişimi sırasında boyu sürekli artan deney parçasında hacmi sabit kalacak şekilde kesiti sürekli olarak azalma gösterir. Bu bölgede, kesitin azalması ''Eş. 5.2'' formülasyonu gereği aynı gerilmeyi sağlamak için gereken kuvvet değerinin sürekli azalması anlamına gelir. Öte yandan, pekleşme mekanizması ise şekil değişimini sürdürebilmek için gereken kuvvetin sürekli artmasını gerektirir. Pekleşmenin etkisinin baskın olması durumunda, ihtiyaç duyulan kuvvet sürekli artmaya devam edecektir. Ne var ki, plastik şekil değişimi devam ettikçe pekleşme etkisi dominantlığını kaybetmektedir. Şekil 5.5' de gerilim uzama eğrisi gösterilmiştir [75].



Şekil 5.5. Gerilim-uzama (σ - ϵ) eğrisi

σ-ε eğrisi incelendiğinde, burada pekleşmenin etkisi kesit daralmasının etkisi ile birbirini dengelemektedir. Bu noktadan sonra kesit daralmasının etkisi pekleşmenin etkisine göre daha baskın hale gelir ve şekil değişimi için gereken gerilme sürekli olarak azalır ve parça boyun vermeye (plastik kararsızlık) başlar, diyagram aşağı doğru yönlenir. Diyagram kopmanın meydana geldiği noktada son bulur. Boyun vermenin başladığı bu noktada, yani maksimum noktadaki gerilme değeri *çekme dayanımı* olarak adlandırılır. Kopmanın gerçekleştiği noktadaki gerilme değerine *kopma dayanımı* adı verilir. Soğuk şekil değişiminde kaymanın gerçekleşemediği noktalarda, *ikizleme* mekanizması da aktif hale gelebilir (Şekil 5.2.b). Fakat bu mekanizmanın plastik şekil değişimine katkısı oldukça sınırlıdır.

Şekil 5.5' de en büyük gerilme, *çekme dayanımı* olarak adlandırılır ve σ_{c} olarak simgelendirilir. Diyagramın elastik bölgesindeki lineer kısmın eğimi, *elastiklik modülünü* verir ve bu değer E olarak simgelendirilir. Malzemenin sünekliğini, δ ; *kopma uzaması* ve ψ ; *kesit daralması* değerleri belirler. Kesit daralması değerini diyagramdan elde edebilme imkânı yoktur. Deney sonrasında kırık kesitin alanı ölçülür ve başlangıç alanı ile kırık kesit

alanı farkının, başlangıç alanına bölünmesi ile elde edilir. Kopma uzaması değeri, diyagramdan elde edilebileceği gibi kopan parçaların tekrar bir araya getirilip ölçü boyunun son uzunluğunu belirlenmesi ve daha sonra bu değer ile ilk ölçü boyu arasındaki farkın ilk boya bölünmesi şeklinde elde edilebilir [75].

Kopma uzaması "Eş. 5.4" ile ifade edilmektedir.

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \tag{5.5}$$

Kesit daralması ise ''Eş. 5.6'' ile ifade edilmektedir.

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \tag{5.6}$$

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan notasyonlar aşağıda verilmiştir.

- l_k; Kopma anında ölçü boyu
- l₀; İlk ölçü boyu
- Ak; Kopmadan sonra ölçülen kesit alanı

A₀; İlk kesit alanı

Maksimum gerilmenin oluştuğu, kalıcı birim şekil değişimine (o noktadaki toplam şekil değişiminden elastik kısım çıkarılmalı) üniform uzama adı verilir. Deney sırasında kırılana kadar malzemenin harcadığı deformasyon enerjisi *statik tokluk* olarak adlandırılır. Bu değer, σ - ε diyagramının altında kalan alana eşittir. Malzemenin sadece elastik bölgesinde akmaya kadar gerektirdiği enerji *rezilyans* olarak adlandırılır. Bu değer ise, σ - ε diyagramında elastik bölgenin altında kalan alana eşittir.

Bir malzemenin plastik şekil değiştirme kabiliyetine *süneklik* denir. Bu değerin büyümesi, malzeme kopana kadar daha büyük plastik şekil değiştirme gerçekleştirebiliyor anlamına gelir. *Gevreklik* ise, kopma uzaması ve alan daralması parametreleri ile ifade edilebilir. Plastik şekil değiştirme kabiliyetinin olmaması durumunu ifade eder. Eğri bazen elastik sınırda bazen de elastik sınıra çok yakın bir noktada son bulur. Malzemenin kopana dek absorbe ettiği toplam enerjiye *tokluk* denir. Sünek malzemelerin tokluğunun daha yüksek, gevrek malzemelerin tokluğunun da düşük olduğu anlamı çıkarılabilir [70].

<u>Sıcak şekil değişimi:</u> Malzemenin maruz kaldığı deformasyonun sıcak olarak sınıflandırılan bölgede gerçekleşmesi durumudur. Bu durumda deformasyon mekanizmalarında bazı değişiklikler söz konusu olur. Artan sıcaklık, bazı noktasal kusurlarda yayınma mekanizmasının çalışması için gereken ısıl aktivasyonu sağlayabilir, böylece hareketleri sırasında bazı engellere takılan dislokasyonların (pekleşme) bu engellerden kurtulmaları mümkün hale gelir. *Örneğin*, kenar dislolasyonlar, tırmanma mekanizması ile, vida dislokasyonlar çapraz kayma mekanizması ile kayma düzlemlerini değiştirebilirler. Böylece pekleşme mekanizması işlemez hale gelmeye başlar (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Kenar dislokasyonunda tırmanma mekanizması [75]

Yine sağlanan ısıl aktivasyon ile pozitif ve negatif kenar dislokasyonlar yan yana ve alt alta dizilerek enerjilerinin minimize etmeye çalışırlar. İki ters işaretli dislokasyonun bir araya gelmesi ile eksik olan düzlem tamamlanmış olacağından dislokasyonlar yok olur ve bu şekilde dislokasyon yoğunluğu azalır. Diğer bir değişle, sıcak deformasyon sırasında dislokasyon oluşması ve yok olması aynı anda geliştiği için dislokasyon yoğunluğunda artış olmaz. Dolayısıyla bu etkinin de pekleşme olayına bir katkısı söz konusu değildir. Sıcak şekil değiştirmede sıcaklığın artması ile malzemenin elastiklik modülü azalır, diğer yandan tokluğu artar, kırılma daha geç gerçekleşir. Bunun nedeni, dislokasyonların belli engellerde yığılmalarının ve böylece mikro çatlak oluşumlarının güçleşmesidir. Yüksek sıcaklıklarda aktif hale gelen diğer bir mekanizmada *tane sınırı kayması*dır. Artan sıcaklıkla taneleri bir arada tutan kuvvet azalır ve etki eden gerilmelerin etkisi ile tanelerin birbirleri üzerinde kaymaları mümkün hale gelir (bu mekanizma sürünme de etkindir).

Plastik deformasyon mekanizmalarından biri de, çok yüksek sıcaklıklarda ve çok düşük deformasyon hızlarında meydana gelen *yayınma sürünmesi*dir. Bu mekanizmanın etkin olabilmesi için deformasyon sıcaklığının malzemenin ergime sıcaklığının %90' ının üzerinde olması gerekir. Bu durumda çok kristalli malzemeler dislokasyon hareketi için gerekli kritik gerilmeden daha düşük gerilmeler altında yayınma sürünmesi ile şekil değiştirebilirler. Bu mekanizmada malzeme içerisindeki atomlar gerilme ekseni doğrultusunda boşluklar ise gerilme eksenine dik doğrultuda yayınırlar. Bu yayınma sonucu malzemelerin taneleri uzayabilir. Bu durumda taneler en fazla tane boyutu kadar yol alabilirler [80].

Belirgin akma davranışına sahip olan malzemeler: Bazı metalik malzemeler elastik şekil değişiminden plastik şekil değişimine geçerken akma olayını belirgin bir şekilde gerçekleştirirler (Şekil 5.7). Bu malzeme gurubuna en iyi örnek yumuşak durumdaki (herhangi bir sertleştirme işlemi uygulanmamış) basit ve çoğunlukla düşük karbonlu çeliklerdir. Demir dışı metaller ve yüksek sıcaklıklarda metallerin hiçbiri belirgin akma özelliği göstermezler. Bu olay arayer atomlarının mevcudiyeti ile açıklanmaktadır. Örneğin, karbon ve azot (nitrogen)' tan arındırılan çeliklerde belirgin akma görülmemeye başlar. Bu arayer atomlarının dislokasyonların altındaki boşluklara yerleşerek dislokasyonları kilitledikleri düşünülmektedir. Bu atom gruplarına *cottrell atmosferi* adı verilmektedir.



Şekil 5.7. Gerilim-uzama eğrisinde belirgin akma davranışının gösterilmesi [75]

Şekil 5.7 incelendiğinde, üst akma noktası, bu atmosferin dislokasyonları kilitleme etkisinin kırıldığı gerilme değerini ifade etmektedir. İlk akmanın meydana geldiği kayma bandında bu atmosfer tarafından pekleşme meydana getirilmesi ile kayma durur. Diğer bir bölgede akma olayı başlar. Üst akma noktasından sonra gelişen testere dişi görünümündeki bölge kesit boyunca tüm kayma bantlarında akmanın gerçekleştiğini gösterir. Oluşan bu bantlara *lüders bantları* adı verilir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Gerilim-uzama eğrisinde lüders bantlarının gösterilmesi [75]

Bu olay tamamlanınca malzeme kesit boyunca homojen pekleşmeye uğrar. Bu gerilmenin en yüksek olduğu noktaya kadar homojen şekil değiştirme sürer (malzemenin boyu arttıkça kesit alanı boylamasında her noktada eşit daralır). Tepe noktasından itibaren ise heterojen şekil değişimi başlar, diğer bir değişle malzeme boyun vermeye başlar, bu boyun daralır ve en sonunda malzeme kesiti etki eden kuvveti taşıyamayacak hale gelince kopma gerçekleşir.

5.2. Malzemelerin Mukavemetini Artırıcı İşlemler

Malzemelerin mekanik özelliği başlıca kimyasal bileşime ve içyapıya bağlıdır. Malzemelerin içyapısı da uygulanan mekanik ve ısıl işlemlere bağlı olduğundan malzemelerin mekanik özellikleri bu işlemlerin bir fonksiyonudur. Malzemelerin mukavemetini veya sertliğini artırmak için uygulanan işlemler aşağıda verilmiştir [76].
5.2.1. Soğuk işlem

Soğuk işlem malzemeye plastik şekil verme yöntemleri ile uygulanır. Plastik şekillendirme hem dislokasyonların hareketini sağlar, hem de yeni dislokasyonların oluşumuna sebep olur. Soğuk işlem sonrası mukavemetin artması deformasyon sertleşmesi nedeniyledir. Deformasyon sertleşmesi, dislokasyonların birbirleri ve dislokasyonların hareketini zorlaştıran engeller ile etkileşimi sonucunda olur.

Soğuk işlem ile malzeme mukavemetindeki artış soğuk işlem miktarı ile orantılıdır. Tavlanmış bir malzemede dislokasyon yoğunluğu 10^{6} - 10^{8} cm⁻² civarındadır. Fazla miktarda soğuk işlem görmüş bir malzemede ise dislokasyon yoğunluğu yaklaşık olarak 10^{12} cm⁻² değerine ulaşmıştır [81].

Soğuk işlem sonucunda malzemenin taneleri deformasyon yönünde uzar ve belirli kristalografik doğrultularda yönlenirler. Tanelerde dislokasyon yoğunluğunun artmasının yanında birçok atom boşluğu da meydana gelir. Bu durum elektrik iletkenliğine de etki eder. Soğuk deformasyonun malzeme özelliklerine etkisi Şekil 5.9' da gösterilmektedir.



Şekil 5.9. Soğuk şekil vermede malzeme özellikleri [82]

Şekil 5.9 incelendiğinde, soğuk deformasyon oranı arttıkça malzemenin akma ve çekme mukavemeti ile sertliğinde artış, buna karşılık sünekliğinde azalma meydana gelmektedir. Metalik malzemelerde soğuk işlem miktarı sınırlıdır. Çünkü belirli bir soğuk işlem miktarında malzemenin sünekliği sıfıra iner. Soğuk işlem sırasında atom boşluklarının meydana gelmesi ve bunların konsantrasyonun soğuk işlem miktarı arttıkça artması malzemede çatlaklara sebep olur. Çatlak oluşumunu engellemek ve soğuk işlemle azalan sünekliği artırmak amacıyla malzeme soğuk işlem sırasında zaman zaman tavlanır[80].

Tavlama ile yüksek sıcaklıkta bir süre tutulan malzemenin soğuk işlem yapısı bozulur. Malzeme yapısının değişimini toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi olmak üzere üç safhada incelemek mümkündür (Şekil 5.10).



Şekil 5.10. Mekanik özelliklerin değişimi [82]

<u>Toparlanma:</u> Bu safhada soğuk işlenmiş malzemedeki dislokasyonlar yeni bir düzene girer. Bu düzen dislokasyonların daha düşük enerjiye sahip oldukları durum olup, poliganizasyon olarak isimlendirilir.

<u>Yeniden Kristalleşme:</u> Bu safhada dislokasyon içeren toparlanmış taneler kaybolur ve yerine yeni taneler çekirdeklenir. Çekirdeklenme genellikle hatalı bölgelerde, tane sınırlarında meydana gelir. Yeniden kristalleşme sıcaklığı, malzemenin pratik olarak bir saat içinde %50' sinin yeniden kristalleştiği sıcaklıktır. Yaklaşık olarak malzemenin ergime sıcaklığının %13 ile %12 arasındadır. Malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı sabit olmayıp soğuk işlem miktarı, kimyasal bileşim, ilk tane boyutu, tav süresi, malzemenin ergime sıcaklığı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Şekil 5.11).

<u>Tane Büyümesi:</u> Yeniden kristalleşen taneler, tavlama sıcaklığında uzun süre tutulursa veya yeniden kristalleşme sıcaklığında uzun süre tutulursa ya da yeniden kristalleşme sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda tavlanırsa yayınma ile zamanla büyürler [83]. Tane büyümesi, tavlama süresi ve sıcaklığa bağlıdır (Şekil 5.12).



Şekil 5.11. Soğuk deformasyona uğramış yeniden kristalleşmiş mikro yapı

- (a) Yumuşak tavlanmış yapı, (b) Yüksek deformasyonlu yapı,
- (c) Toparlanma, (d) Yeniden kristalleşmiş yapı [84]



Şekil 5.12. Tane boyutunun sıcaklık ve zamana göre değişimi; a) Sıcaklık, b) Zaman

5.2.2. Alaşım sertleşmesi

Alaşım sertleştirmesi kimyasal bileşimin değiştirilmesi ile mukavemet arttırılması işlemi olup, alaşım elementinin saf metal içinde eriyip tek fazlı bir yapı oluşturması halinde katı eriyik sertleştirmesi, ikinci bir faz oluşturması halinde ikinci faz sertleştirmesi olarak isimlendirilir.

5.2.3. Tane boyutunu küçültme

Tane boyutunu küçülterek bir malzemenin mukavemeti arttırılabilir. Tane boyutunu hızlı soğutma veya çeşitli termo-mekanik işlemlerle küçültmek mümkündür. Tane boyutu küçültme ile malzemenin mukavemetinin artması tane sınırlarının kaymayı önlemesi ve deformasyon sırasında taneler arasında uyum sağlaması ile ilgilidir [85].

Tane boyutunun mukavemete etkisi genel olarak Hall-Petch bağıntısı ile ilişkilidir. Yani tane boyutu azaldıkça mukavemet artmaktadır. Hall-Petch bağıntısında tane boyutu ile metalin akma dayanımı arasındaki bağıntı ''Eş. 5.7'' de verilmektedir [80].

$$\sigma_a = \sigma_i + k D^{-\frac{1}{2}}$$
(5.7)

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan notasyonlar aşağıda verilmiştir.

- σ_a ; Akma Mukavemeti σ_i ; Sürtünme Gerilmesi k; Sabit
- D; Tane Boyutu

5.2.4. Martenzitik dönüşüm sertleşmesi

Çeliğe su vermede, difüzyonsuz kayma tipi dönüşümü ile östenitten martenzite dönüşüm mühendislik malzemelerinde kullanılan en yaygın mukavemetlenme proseslerinden biridir. Her ne kadar martenzitik dönüşümler çok sayıda metalürjik sistemde meydana gelse de sadece demir ve karbon temelli alaşımlar bu kadar bariz mukavemetlenme etkisini gösterir.

5.2.5. Deformasyon yaşlanması

Şekil değiştirme yaşlanması genellikle akma noktası fenomeni ile ilgili bir davranış tipidir ve bu işlemde malzemenin mukavemeti artırılır ve sünekliği soğuk işlemden sonra nispeten düşük bir sıcaklıkta ısıtmada azaltılır. Bu düşünce en iyi düşük karbonlu çeliğin akma eğrisi üzerinde şekil değiştirme yaşlanmasının etkisi Şekil 5.13' de gösterilmektedir [86].



Şekil 5.13. Az karbonlu bir çelikte deformasyon yaşlanmasının çekme diyagramına etkisi

Şekil 5.13' de A bölgesi, herhangi bir X noktasına çekilerek plastik deformasyona uğramış, orijinal durumda süreksiz akma gösteren az karbonlu bir çeliğe ait çekme diyagramının bir parçasıdır. Söz konusu X noktasında numuneye uygulanan yük kaldırılıp gerilme sıfıra düşürüldükten sonra, Y noktasına kadar çekme deneyi yapılırsa süreksiz akma tekrar görülmez (B bölgesi). Ancak Y noktasında numuneye uygulanan yük kaldırılıp malzeme oda sıcaklığında birkaç gün bekletildikten veya 100-150°C sıcaklıklarda birkaç saat tavlandıktan sonra çekme deneyi yapılırsa, süreksiz akma olayı tekrar görülür ve akma

gerilmesi Y' den Z' ye artar (C bölgesi). Süreksiz akma olayının tekrar görülmesinin sebebi, az karbonlu çelik içindeki karbon ve azot atomlarının yaşlanma safhasında dislokasyonlara yayınması ile dislokasyon etrafında bir atmosfer (Cotrell atmosferi) meydana getirerek dislokasyonları kilitleyip hareketlerine engel olmasıdır. Bu olaya *statik deformasyon yaşlanması* denir [81, 87].

Deformasyon yaşlanmasının uygulamada önemi çok büyüktür. Özellikle yumuşatma tavlaması yapılmış az karbonlu çelik saclarda, derin çekme işlemleri sırasında, süreksiz akma olayı sebebi ile malzeme yüzeyinde pürüzler oluştuğundan deformasyon yaşlanması istenmeyen bir olaydır. Çelikte deformasyon yaşlanmasını veya süreksiz akma olayını gidermek veya geciktirmek için yapılan işlemler şunlardır:

- Ferrit fazında çözünmüş C ve N miktarlarını azaltmak için kuvvetli karbür ve nitrür yapıcı elementleri çelik üretimi esnasında ilave etmek (Al, Ti, V, Nb gibi).
- Yumuşatma tavından sonra, küçük deformasyon oranlarında (%0,5-1,5) soğuk haddelemek ve hemen kullanmak. Uygulamada bu gaye ile yapılan haddelemeye *temper haddesi* denir.

5.3. Kırılma

Gerilme etkisi altındaki bir cismin iki ya da daha fazla parçaya ayrılması olayına kırılma denir. Kırılma, gevrek ve sünek kırılma olmak üzere iki ana gruba ayrılır.

5.3.1. Gevrek kırılma

Minimum enerji soğurulması ile çatlağın hızlı ilerlemesi sonucunda meydana gelir (Resim 5.1). Tek kristallerde gevrek kırılma belirli kafes düzlemleri boyunca oluşan ayrılma ile ortaya çıkar. Gevrek kırılma davranışı sergileyen çok kristalli malzemelerin kırılma yüzeyi taneli bir görünüm sergiler, çünkü ayrılma düzlemlerinin yönlenmeleri taneden taneye değişir [88].



Resim 5.1. Gevrek kırılma [89]

Kırılma öncesinde çok az plastik deformasyon vardır, malzemenin tokluğu düşüktür, kırılma, parçanın genel akma gerilmesinden küçük gerilme değerinde oluşur. Yani, parça eğilmeden önce kırılır. Gevrek olarak kırılan bir malzemenin kırılan parçaları bir araya getirildiğinde malzemenin kırılmadan önceki boyut ve şeklin aynısı ortaya çıkar. Ancak, sünek kırılmada böyle bir şeyle karşılaşmak mümkün değildir [90].

Gevrek malzemeler (cam ve seramikler gibi) çekmeye karşı zayıf olup basmaya karşı daha mukavemetlidirler. Çünkü çekme kuvvetleri etkisinde mevcut çatlak ve boşluklar, yüzey hataları, açılma veya büyüme etkisi göstererek malzemenin çekme mukavemetini azaltırlar. Basma etkisi altında, basma kuvvetleri çatlak ve boşlukları kapatmaya çalıştıklarından dolayı hem basma mukavemeti çekmeye göre yüksek olur hem de çekme gerilmesinde olduğu gibi gerilme yığılması oluşmayacağından kuvvetler çatlağın bir yüzünden diğer yüzüne iletilir.

Malzemelerin teorik kırılma mukavemeti ile gerçek kırılma mukavemeti arasındaki fark, yapısal düzensizliklerden kaynaklanır. Yeni çekilmiş cam lifleri teorik değerlere yakın mukavemet değerlerine sahiptir. Ancak çentik ve çatlak gibi yüzeysel düzensizlik meydana getiren her etki söz konusu liflerin mukavemetini azaltır. Bu durum, ilk önce 1921 yılında Grifftth tarafından açıklanmıştır. Griffith' e göre, gevrek malzemelerin kırılması bunların içerisinde bulunan çok sayıdaki mikro çatlaklardan kaynaklanır. Çok keskin olan çatlak uçlarında yüksek miktarda gerilme yığılması meydana gelir ve bu gerilme söz konusu

malzemenin teorik kırılma mukavemetinden daha yüksek değerlere ulaşarak çatlağın ilerlemesine neden olabilir.

Metallerde, mikro çatlaklar genelde katılaşma veya şekil verme sırasında oluşur. Kusursuz malzemelerde bile şekil değişimi sırasında atomsal boyutta çatlaklar oluşabilir. Malzeme içerisindeki bir engelde toplanan veya biriken dislokasyonlar bir mikro çatlak oluşturabildiği gibi (Şekil 5.14.a), üç adet birim dislokasyonun tek bir dislokasyon içerisinde birleşmesi sonucunda da mikro çatlak oluşabilir (Şekil 5.14.b). Dislokasyonların hareketini kolaylaştıran herhangi bir yöntem gevrek kırılma olasılığını azaltır.



Şekil 5.14. Çatlak oluşma mekanizmaları; a) Kenar dislokasyonların toplanması, b) Üç dislokasyonun yığılması ile mikro çatlak oluşumu

5.3.2. Sünek kırılma

Yüksek orandaki plastik deformasyon sonucunda meydana bir ve koni-çanak oluşumu şeklinde kendini gösterir. Koni-çanak oluşumu ise çekme kuvveti uygulanan malzemenin boyun vermesi ile meydana gelir. Bu tür kırılma, boyun verme veya büzülme bölgesinin merkezinde mikro boşluk oluşumu ile başlar. Bu boşluklar ticari malzemelerin çoğunda metal olmayan kalıntılarda oluşur. Bu görüş, çok saf metallerin safsızlık elementleri içeren metallerden daha sünek olması gerçeği ile doğrulanmaktadır. Sürekli olarak uygulanan gerilme altında söz konusu boşluklar birleşerek malzemenin merkezinde çatlak oluştururlar. Oluşan çatlaklar uygulanan gerilmeye dik doğrultuda malzeme yüzeyine doğru ilerler. En son kırılma gerilme ekseni ile 45°' lik açı yapan bir yüzey veya düzlem üzerinde aniden ortaya çıkar. Sonuçta malzemenin bir parçasının yüzeyinde koni, diğer iş parçasının yüzeyinde ise çanak oluşur. Bu nedenle kırılma yüzeyleri için koni çanak

deyimi kullanılır. Sünek malzemenin koni-çanak biçimindeki kırılma eylemi Resim 5.2' de gösterilmektedir [90, 91].



Resim 5.2. Koni-çanak biçimindeki kırılma yüzeylerinin görünümü [92]

Kırılma öncesinde büyük miktarda plastik deformasyon vardır, malzemenin tokluğu kırılmadan önce plastik deformasyonla enerji absorbe etme yeteneği büyüktür, kırılma genel akma gerilmesinden büyük gerilme değerinde oluşur [90]. Yani, parça kırılmadan önce eğilir.

5.4. Gerçek Gerilme Uzama (σ-ε)

Şu ana kadar anlatılan, gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri *mühendislik* değerler olarak nitelendirilir. Mühendislik değerlerin hesaplanması, deney parçasının deney öncesi boyutları dikkate alınarak yapılmıştır. Ancak plastik deformasyonla birlikte parçanın boyunda sürekli bir uzama gerçekleşir ve buna bağlı olarak plastik şekil değiştirmede hacim sabitliği prensibine dayanarak kesitinde azalma gerçekleşir. Bu ölçüler esas alınarak elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme değerleri, *gerçek* değerler olarak nitelendirilir. Tasarımda, küçük miktarlarda şekil değiştirmeler söz konusu olduğu için mühendislik değerleri kullanmak yeterli olur. Ne var ki, imalatta büyük miktarlarda şekil değişimleri söz konusu olduğu için mutlaka gerçek değerleri kullanmak gerekir. Şekil 5.15' de gerçek ve mühendislik gerilme gerinim grafiği gösterilmektedir [75].



Şekil 5.15. Gerçek mühendislik gerilme gerinim grafiği [93]

Mühendislik birim uzama miktarı "Eş. 5.8" bağıntısı ile bulunur.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} + 1 = \frac{l}{l_0} = \varepsilon + 1$$
(5.8)

Gerçek birim uzama miktarı ''Eş. 5.9'' bağıntısı ile bulunur.

$$d\epsilon_{g} = \frac{dl}{l} = \epsilon_{g} = \int_{l}^{l} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_{o}}$$
(5.9)

Plastik şekil değişiminde hacim sabit kalır. Hacim sabitliği "Eş. 5.10" bağıntısı ile bulunur [94].

$$A_{0} \cdot l_{0} = A \cdot l \Longrightarrow A = A_{0} \cdot \frac{l_{0}}{l}$$
(5.10)

Gerçek mühendislik gerilme değeri ''Eş. 5.11'' bağıntısı ile bulunur.

$$\sigma_{g} = \frac{F}{A} = \frac{F \cdot l}{A_{o} \cdot l_{o}} = \sigma \cdot (1 + \varepsilon)$$
(5.11)

Eğer mühendislik değerler biliniyorsa yukarıdaki dönüşüm uygulanarak gerçek gerilme gerçek birim şekil değişimi değerleri saptanabilir. Gerçek değerlerle çizilen gerilme-birim şekil değişimi (σ g-ɛg) eğrisine akma eğrisi adı verilir. Metallerin akma eğrileri, *holloman bağıntısı* ile ifade edilir.

Hollaman bağıntısı "Eş. 5.12" ile ifade edilir

$$\sigma_{g} = \mathbf{K} \cdot \varepsilon_{g}^{n} \tag{5.12}$$

Bu bağıntının her iki tarafının logaritması alınırsa;

 $ln(\sigma_g) = lnK + n \cdot ln\epsilon_g$

Bu bağıntı logaritmik skalada bir doğru denklemi verir (y = a.x + b).

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan notasyonlar aşağıda verilmiştir.

K; Dayanım sabiti

n; Pekleşme üsteli

K ve n; malzeme sabitleri

5.5. Alaşım Elementlerinin Çelik Yapısına Etkileri

Karbonlu çeliklerden normal olarak sağlanamayan kendine has özellikleri sağlayabilmek amacıyla, bir veya birden fazla alaşım elementi ilave etmek suretiyle üretilen çeliklere *alaşımlı çelikler* denir [95].

Çelikte bulunan elementleri, yabancı madde ve katkı elementleri olarak tanımlamak mümkündür. Yabancı madde, genellikle çeliğin elde edilmesi esnasında hammaddeden çeliğe geçen ve arıtılmayan elementlerdir. Arzumuz dışında çelik içinde bulunurlar. Bunlar P, Si, S, Mn, O ve Azottur. Karbon çelikte daima mevcuttur ve çeliği çelik yapan en önemli elemandır. Alaşım elementleri ise çeliğe istenilerek katılan elementlerdir. Bazen yabancı madde olarak nitelediğimiz bir elementide alaşım elementi olarak çeliklere katabiliriz [96].

Alaşım elementlerinin çeliklere kazandırdığı özellikler genel olarak şunlardır [96, 97]:

- Dayanımı artırmak
- Sertliği artırmak
- Sertleştirmeyi kolaylaştırmak

62

- Çekirdeğe kadar sertleşmeyi sağlamak
- Korozyona karşı dayanımı artırmak
- Mıknatıslanma özeliğini geliştirmek
- Yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı artırmak
- Elektrik direncini değiştirmek
- Aşınma direncini artırmak
- Isı tesiri ile genleşmeyi değiştirmek

<u>Karbon (C)</u>: Çeliklerin temel alaşım elementi olan karbon, çeliklerin üretim işlemleri sırasında yapıdaki yerini alır. Karbon miktarı, çeliklerin mekanik özelliklerini en çok etkileyen faktördür. Karbon, çeliğin akma ve çekme mukavemetini artırır, yüzde uzamayı, şekillenebilirliği ve kaynak kabiliyetini azaltır. İşlenebilirliğin ön planda olduğu çeliklerde karbon miktarı düşük tutulmalı, dayanım değerlerinin yüksek olması gerektiği durumlarda ise çeliğin karbon içeriği yüksek olmalıdır.

Düşük karbonlu yumuşak çeliklerin şekillendirilmesi sırasında meydana gelebilecek en önemli problem mavi gevrekliktir. Bu olay karbon (ve/veya azot) atomlarının küçük çaplı olması nedeniyle kolay yayınmalarından kaynaklanır ve işleme sırasında kırılganlık yaratır.

<u>Mavi Gevreklik:</u> Yumuşak çelikler 270-350°C arasında şekillendirilirlerse küçük çaplı atomlar hızlı bir şekilde yayınır. Yayınan atomlar dislokasyonları kilitleyerek malzemenin akma sınırı noktasını yükseltir. Dolayısıyla malzeme daha gevrek davranır. Sözü edilen sıcaklıklar arasında çeliğin aldığı renk mavi olduğu için bu olaya *mavi gevreklik* denir [98].

<u>Mangan (Mn)</u>: Yapıya genellikle cevher halinde iken girer. Mekanik özellikleri iyileştirmesi dolayısıyla ayrıca da ilave edilir, temel alaşım elementi olarak da kendisini gösterebilir. Genel olarak sünekliği azaltmakla birlikte çeliğin dayanımını arttırma özelliğine sahiptir. %3 Mn miktarına kadar, her %1 Mn için çekme dayanımı yaklaşık 100 Mpa kadar artar. %3-8 arası artış azalır. %8 den itibaren düşüş görülür. Çeliğin dövülebilirliği ve sertleşebilirliğini iyileştirici özelliktedir. Kaynak kabiliyetini etkilemez ve kaynaklanabilir malzemeler içinde %1,6 oranına kadar yükseltilebilir. Manganın iyi yöndeki etkisi karbon oranının artmasıyla birlikte artar [99].

<u>Silisyum (Si)</u>: Silisyum oksijen giderici olarak kullanıldığı için çelik içinde yer alır. Çeliğin akma, çekme dayanımını ve elastikiyetini artırır. Çelik yapısındaki silisyum miktarı azaldıkça tufal yapma oranı artar. Silisyum ucuz bir alaşım elementidir, yaygın olarak yüksek elastikiyet gerektiren yay çeliklerinde kullanılır. Ayrıca elektriksel akım zaiyatını önleyen bir elementtir. Silisyum miktarı fazla olan filmaşinler çok küçük çaplara indirilmeleri zordur. Çünkü silisyum, malzeme tel haline getirilirken teli sertleştirir ve kopmalara neden olur. Filmaşinlerde bu yüzden düşük silisyum tercih ederler [100].

<u>Fosfor (P)</u>: Fosfor çeliğin akma ve çekme dayanımını arttırır, yüzde uzamayı ve eğme özelliklerini çok fazla kötüleştirir, soğuk kırılganlık yaratır, talaşlı şekillendirme kabiliyetini arttırır. Fosfor çelik içinde üretim işlemlerinden kalan bir elementtir ve istenmeyen özellikleri nedeniyle mümkün mertebe yapıdan uzaklaştırılır. Kaliteli ıslah çeliklerinde maksimum fosfor miktarı %0,045; asal ıslah çeliklerinde ise %0,035 dir [100].

<u>Kükürt (S)</u>: Demir ile birlikte FeS bileşiği oluşturarak, tane sınırlarında birikerek malzemenin gevrek olmasına yol açar.

- 800°C -1000°C arasında şekil değiştirme esnasında "kızıl sıcaklık kırılganlığı"
- 1200°C üzerindeki sıcaklıklarda "akkor sıcaklık kırılganlığı" meydana getirir.

Bu sebeplerle çelik için zararlı bir element olarak kabul edilerek, giderilmesi yönünde çalışılır. Ancak otomat çeliklerinde iki katı kadar Mn ilave edilerek kullanılmak suretiyle, talaşlı işlenebilirlik kabiliyetini artırmak amacıyla kullanılır. Genel olarak kaynak kabiliyeti ve sertleşebilirliği olumsuz etkiler [99].

<u>Krom (Cr)</u>: Krom paslanmaz çeliklerin temel alaşım elementidir. Krom, korozyon ve oksidasyon direnci sağlar. Sertleşebilme kabiliyetini artırır. Yüksek karbonlu çeliklerde aşınma direncini yükseltir. Krom karbon ile tane sınırlarında biriken Cr₂₃C₆ bileşiğini oluşturur. Oluşan bu bileşik paslanmaz çeliklerde tane sınırlarındaki krom miktarını paslanmazlık sınırı olan %12' nin altına çeker. Bu bileşik yüksek sıcaklıklarda karbon yayınımının hızlanması ile kolayca meydana gelir ve kaynaklı paslanmaz çeliklerde, kaynak dikişi yakınlarında kaynak bozulmalarına neden olur [100].

<u>Nikel (Ni)</u>: Nikelin darbe tokluğunu ve tavlı çeliklerde dayanımı artırır. Nikel östenitik paslanmaz çeliklerin kromdan sonra ikinci en önemli alaşım elementidir. Östenitik paslanmaz çeliklerdeki nikel miktarı %7-20 arasındadır. Nikel östenit kararlaştırıcı bir elementtir ve östenitik paslanmaz çeliklerin, adından da anlaşılacağı gibi oda sıcaklığında bile kafes yapısı YMK' dır. YMK kafes yapısı östenitik paslanmaz çeliklere yüksek şekillendirilebilme özelliği kazandırır [101].

<u>Cinko (Zn)</u>: Dökülebilirliği düşürür, yüksek çinkolu alaşımlar sıcak çatlama ve soğuma çekmesi gösterirler, %10' dan yüksek olduğunda gerilmeli korozyon çatlaması gösterir, diğer alaşım elementleriyle birlikte dayannımı çok artırır. %3' den daha az çinko içeren ikili alüminyum alaşımlarda belirli bir etkisi yoktur [102].

<u>Molibden (Mo)</u>: Tane büyümesini önler, sertleşebilme kabiliyetini artırır. Meneviş gevrekliğini giderir. Meneviş sıcaklığından yavaş soğumalarda bazı alaşımların tane sınırlarında karbür çökelmesi meydana gelir, bu da kırılganlığa neden olur. Molibden bu olumsuz etkiyi ortadan kaldırır. Ayrıca molibden çeliklerin sürünme dayanımını ve aşınma direncini yükseltir. Alaşımlı takım çeliklerinde önemli bir alaşım elementidir. Paslanmaz çeliklerde özellikle oyuklanma korozyonunu engellediği için korozyon direncini önemli ölçüde artırır. Bazı mikro alaşımlı çeliklerde nitrür veya karbonitrür oluşturan alaşım elementi olarak molibden kullanılır [101].

<u>Kobalt (Co):</u> Alaşımlı takım çeliklerinde kullanılan bir alaşım elementidir. Takım çeliklerinin sıcakta sertliğini muhafaza etmesi için kullanılır.

<u>Tungsten (W)</u>: Aşınma direncini artıran, sıcakta sertliğin muhafazasını sağlayan bir alaşım elementidir. Özellikle hız çeliklerinde olmak üzere alaşımlı takım çeliklerinde yaygın olarak kullanılan bir alaşım elementidir [98].

<u>Vanadyum (V)</u>: Tane küçültme etkisi yaparak çeliklerin akma ve çekme dayanımlarını oldukça artırır. Ayrıca sertleşebilme kabiliyetini artırır, menevişleme ve ikinci sertleşmede olumlu etkileri vardır. Alaşımlı takım çeliklerinde kullanım yeri olan bir alaşım elementidir.

Vanadyum, tane küçültücü ve karbür yapıcı etkisi ile mikro alaşımlı çeliklerde niyobyum ve titanyum ile birlikte kullanılan bir mikro alaşım elementidir. Mikro alaşımlı çeliklerde alaşım elementleri toplamı %0,25' i geçmez [98]. Bu elementler tek, ikili ve üçlü kompozisyonlar halinde mikro yapı içerisinde oluşturdukları karbonitrür çökeltileri ile tane boyutunu inceltmelerinin yanı sıra çökelti sertleşmesi mekanizmasıyla dayanımı artırırlar.

<u>Titanyum (Ti)</u>: Vanadyum gibi tane küçültücü etkisi vardır. Ancak bu etkisi vanadyumun etkisinden daha yüksektir. Mikro alaşımlı çeliklerde mikro alaşım elementi olarak kullanılır. Ayrıca paslanmaz çeliklerde krom karbürün olumsuz etkisini giderebilmek için karbür oluşturucu alaşım elementi olarak kullanılır.

<u>Niyobyum (Nb)</u>: Mikro alaşımlı çeliklerde tane küçültme etkisi en yüksek olan mikro alaşım elementidir. Paslanmaz çeliklerde titanyumun yaptığı etkiye yapar ve titanyumla birlikte veya tek başına kullanılır.

<u>Alüminyum (Al)</u>: Oksijen gidermek için kullanılır. Akma dayanımını ve darbe tokluğunu arttırıcı etki gösterir. Yüksek alüminyum miktarı sürekli dökümlerde nozul tıkanmalarına sebep olur. Ayrıca alüminyumun tane küçültücü etkisi vardır, nitrasyon çeliklerinin temel alaşım elementidir. Bazı mikro alaşımlı çeliklerde de nitrür ve karbonitrür oluşturan mikro alaşım elementi olarak da kullanılır [103].

<u>Kalay (Sn):</u> Akma ve çekme dayanımlarını pek etkilemez, fakat sıcak haddelemelerde sorunlar yaratır. Kalay düşük ergime sıcaklığına sahip bileşikler yaparak haddeleme sırasında kopmalara neden olur.

<u>Bakır (Cu)</u>: Akma ve çekme dayanımını arttırır, yüzde uzamayı ve şekillenebilirliği azaltır. Soğuk çekilebilirliği kötü yönde etkiler. Bu yüzden filmaşinlerde ki bakır oranın olabildiğince düşük olması istenir. Korozyon direncini yükselten etki gösterir.

<u>Wolfram (W)</u>: Çeliklerin aşınma dirençlerini, menevişleme tavlamasına dayanıklılığını ve sıcaktaki mukavemet değerlerini arttırır. Östenitin karbona doymuşluk çizgisini sola doğru kaydırır. W, çelikte zor çözünebilen (FeW)₆C karbürünü oluşturur [104]. Bu karbür, sertleştirme sıcaklığı arttırıldığında çözünebilir, böylece sertlik ve sertleşme derinliği artar.

Karbürlerin çok küçük çözünme hızından dolayı W çelikleri, aşırı ısıtmaya karşı hassas değildirler.

Kurşun (Pb): Haddelenebilirliği azaltır. Haddeleme esnasında kopmalara neden olur, yüzey kalitesini olumsuz yönde etkiler. Sürekli dökümlerde sorunlara sebebiyet verir. Kurşun çeliklerin talaşlı şekillendirme kabiliyetine artırır, çelikte çözülmediğinden, yalnızca otomat çeliklerinde talaşları kırılgan yapmak amacıyla % 0,2 ile 0,5 arasında katılır, fakat yapıda homojen ve ince dağılması gerekir [105].

<u>Azot (N)</u>: Nitrür teşekkül ettirdiği için önemlidir. Çelikte yaşlanma meydana getirir. Yaşlanmanın sorun olmadığı durumlarda, sertliği, mekanik dayanımı ve atmosfer korozyonuna karşı dayanımı arttırır. Uygun alaşımlı çeliklerin yüzeyine nüfuz ettirilerek, yaklaşık 1100 VSD değerine kadar yüzey sertliğine ulaşılmasını sağlar [105].

<u>Hidrojen (H)</u>: Hidrojen gevrekliğine neden olur. Azottan daha tehlikelidir. Malzemenin elastikiyetini azaltır [103].

Alaşım elementlerinin çelik özelliklerine etkisi Çizelge 5.1' de verilmektedir.

| Alaşım Elementi | Sertlik | Mukavemet | Akma Noktası | Uzama | Kesit Daralması | Darbe Direnci | Elastiste | Yüksek Sıcaklığa Dayanım | Soğuma Hızı | Karbûr Oluşumu | Aşınma Direnci | Dövülebilirlik | İşlenebilirlik | Oksitlenme Eğilimi | Korozyon Dayanımı |
|--|-----------|------------|--------------|-------|-----------------|---------------|-----------|--------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|----------------|----------------|-------------------------|-------------------|
| Si | 1 | 1 | 11 | ţ | ~ | ţ | 111 | 1 | ţ | ţ | ↓↓↓ | Ļ | Ļ | Ļ | - |
| Mn* | 1 | 1 | 1 | ~ | ~ | ~ | 1 | ~ | Ļ | ~ | ļļ | 1 | Ļ | ~ | - |
| Mn** | ţţţ | 1 | Ļ | 111 | ~ | - | - | - | ļļ | - | - | ↓↓↓ | ļļļ | $\downarrow \downarrow$ | - |
| Cr | †† | † † | 11 | ţ | ţ | ţ | 1 | 1 | ↓↓↓ | 11 | 1 | ţ | - | ↓↓↓ | 111 |
| Ni | t | 1 | 1 | ~ | ~ | ~ | - | 1 | ļļ | - | $\downarrow \downarrow$ | ţ | Ļ | Ļ | - |
| AI | - | - | - | - | ţ | ţ | - | - | - | - | - | ļļ | - | 11 | - |
| w | 1 | 1 | 1 | Ļ | ţ | ~ | - | 111 | $\downarrow \downarrow$ | 11 | † †† | ļļ | ļļ | 11 | - |
| v | 1 | 1 | 1 | ~ | ~ | 1 | 1 | 11 | ţ | †† †† | † † | 1 | - | Ļ | 1 |
| Co | 1 | 1 | 1 | ţ | ţ | ţ | - | 11 | 11 | - | 111 | ţ | 2 | Ļ | - |
| Мо | 1 | 1 | 1 | ţ | ţ | ţ | - | † † | ļļ | 111 | †† | Ļ | ţ | †† | - |
| s | | | | ţ | ţ | ţ | - | - | - | - | - | ţţţ | 111 | - | Ļ |
| Р | 1 | 1 | 1 | ţ | ţ | ↓↓↓ | - | - | - | - | - | ţţţ | ↓↓↓ | $\downarrow \downarrow$ | † † |
| * perlitik çeliklerde ** östenitik çeliklerde | | | | | ł | † arttirir | a | ↓ zaltır | de | ∼ ğiştirm | ez | önen | nsiz | | |

Çizelge 5.1. Alaşım elementlerinin çelik özelliklerine etkisi

6. ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

Çelik temelde bir Fe ve C alaşımıdır. Demir 1535°C' de ergiyen bir metalik elementtir. Oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar 3 farklı kristal yapıya sahip olur. Oda sıcaklığı ile 912°C arasında HMK yapılı, 912°C ile 1398°C arasında YMK yapılı ve 1398°C ile ergime sıcaklığı olan 1535°C arasında ise tekrar HMK yapılı demir bulunur. Yani, demir allotrompifik dönüşüm gösterir. Demir saf halde düşük mekanik özelliklere sahiptir ve önemli bir mühendislik malzemesi değildir. Demire karbon ilavesi demirin mekanik özelliklerini çok etkiler ve demir böylece dünyanın en mukavemetli malzemelerinden biri haline gelir.

Şekil 6.1' de demir-karbon (Fe-C) denge diyagramı verilmiştir. Bu denge diyagramı üzerinde α (alfa), γ (gama), δ (delta), sıvı ve sementit (Fe₃C) fazları ile ledebürit (γ +sementit) ve perlit (α +sementit) karışım yapıları bulunmaktadır.

Ayrıca, çelikte peritektik, ötektik ve ötektoid dönüşüm reaksiyonu meydana gelmektedir.

Peritektik Reaksiyon: 1494°C' de %0,15 C miktarında gerçekleşir. Peritektik reaksiyon δ + Sıvı $\rightarrow \gamma$ şeklindedir ve östeniti oluşturur.

Ötektik Reaksiyon: 1145°C' de % 4,3 C miktarında oluşur. Ötektik reaksiyon Sıvı $\longrightarrow \gamma +$ Fe₃C şeklinde olur ve ledebürit ($\gamma +$ Fe₃C) yapısını oluşturur.

Ötektoid reaksiyon: 727°C' de 0,8 C miktarında oluşur ve $\gamma \longrightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ile perlit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) yapısı oluşur.

Fe-C sisteminde bulunan fazlar aşağıda verilmektedir:

 α (ferrit): Ferrit, demirde (HMK) az miktarda karbonun erimesiyle oluşan bir arayer katı eriyiğidir. Demir-karbon denge diyagramında " α " işaretiyle gösterilen bölgede oluşur. Ferritte çözünebilen en fazla karbon miktarı % 0,008 karbon çözünür. Çelikteki en yumuşak fazdır.

 α + Fe₃C (perlit): % 0,83 karbon içeren ötektoid yapıdır. Ferrit ve sementit fazlarının karışımı olan perlit çok yavaş soğuma şartlarında 723°C sıcaklıkta oluşur. Yapıda yuvarlak

taneli veya lamelli olarak görülebilir. Taneli türü, 723°C sıcaklıkta tavlama ve çok yavaş soğutma ile elde edilebilir. Lamelli türü ise havada soğutma ile oluşur.

 γ (östenit): YMK şeklinde demir yapıda katı karbon çözeltisidir. Demir-karbon denge diyagramında " γ " işaretiyle gösterilen bölgede oluşan östenit yaklaşık % 2' ye kadar karbon çözündürebilir. Her cins çelikte 723°C' nin üzerinde bulunur. Ac₃ ve Acm sıcaklıklarının üzerinde ise çözünme tamdır. Yumuşak ve antimanyetiktir.

Fe₃C (sementit): % 6,67 karbon içeren demir karbür bileşiğidir. Çeliğin yapısındaki en sert fazdır. Yapıda iğneli veya ağ şeklinde bulunan sementit, çok sert ve kırılgandır. Çekme dayanımı düşük, buna karşılık basma mukavemeti yüksektir.

 γ +sementit (ledebürit): Östenit ve sementit fazlarının mekanik karışımıdır. Fe-C denge diyagramının ötektik pozisyonudur.

Grafit: Sementit (Fe₃C) her zaman kararlı bir faz değildir. Yavaş soğutulmuş dökme demirlerin çoğunda grafit oda sıcaklığında mevcut olan bir yapı elemanıdır. Çeliklerde ise östenit sıcaklığının altında çok uzatılmış tavlamalar sonucu ortaya çıkabilir. Silis, grafit oluşumunu özendirir.

Çelik, demir ve karbonun alaşımı olarak tanımlanır. Karbon oranındaki az miktarda değişim (Örneğin %0,2' den %0,8' e kadar), çeliğin ısıtıldığı sıcaklıktan soğutulması ile elde edilen özelliklerin büyük miktarda değişimine yol açar. Hızlı soğutma veya sulama, çeliği kırılgan yapar. Yavaş soğutma ve tavlama çeliği yumuşak ve sünek yapar. Bu iki durum arasındaki özellikler, sertleştirilmiş çeliğin menevişlenmesi ile elde edilir. Bu özellikler çeliğin içindeki elementlerin dağılımı, boyutu, şekli ve cinsi ile ilgilidir. Özel uygulamalar için çeliklere mangan, krom, nikel ve molibden gibi, çeliğin ısıl işlemdeki davranışını değiştiren ve özelliklerini iyileştiren alaşım elemanları katılır. Bütün çeliklerin ısıl işleminde esas olan, çelikleri belli bir sıcaklığa ısıtıp bu sıcaklıkta belli bir süre tutup önceden belirlenmiş soğutma hızı ile soğutmaktır [106-108]. Isıl işlem ürünü şekillendirmek ve parçaların uygun kullanım özelliklerini sağlamak amacıyla yapılır. Isıl işlem yöntemlerini üç ana başlık altında toplayabiliriz. Bunlar; tavlama, sertleştirme ve menevişlemedir.

6.1. Tavlama

Çeliklerde içyapıyı düzenlemek, taneleri inceltmek ya da kabalaştırmak, bileşim homojenliğini sağlamak, yapıyı yumuşatmak, iç gerilmeleri azaltmak, istenilen fiziksel ve mekanik özellikleri elde etmek ve talaş kaldırmayı veya soğuk şekillendirmeyi kolaylaştırmak amacıyla, çelik parçanın uygun sıcaklıklara kadar ısıtılıp gerekli değişiklikler sağlanıncaya kadar bu sıcaklıkta tutulması ve sonradan yavaş soğutulması işlemine *tavlama* adı verilir. Şekil 6.1' de Fe-C denge diyagramında tavlama yöntemleri ve uygulama sıcaklıkları şematik olarak gösterilmektedir [109].



Şekil 6.1. Fe-C denge diyagramında tavlama yöntemleri ve uygulama sıcaklıkları [110]

6.1.1. Yumuşatma tavlaması

Yumuşatma tavı, çelik içyapısındaki tane boyutunu küçülterek sertliği azaltmak, talaş kaldırmayı kolaylaştırmak veya döküm ve dövme parçalarındaki iç gerilmeleri gidermek için kullanılır. Ötektoid altı çelikleri Ac₃, ötektoid üstü çelikleri ise Ac₁ çizgilerinin üzerindeki belirli sıcaklıklara kadar ısıtılır, içyapılarını östenite dönüştürdükten sonra fırın içerisinde tutarak çok yavaş soğutulur. % 0,2 C içeren iri taneli ötektoid altı bir çelik parçanın tanelerinin tavlama işlemi sırasında içyapısında meydana gelen değişimler şu şekildedir;

- Ac1 çizgisinin üzerindeki bir sıcaklıkta perlit ince taneli östenite dönüşürken, ferrit yapıda aynen kalır. Eğer bu sıcaklıktan soğutmaya geçersek ferrit iri taneleri değişmediğinden tane boyutunda herhangi bir değişme olmaz (Şekil 6.2).
- Ac₃ çizgisinin üzerindeki sıcaklıkta yapı ince taneli östenite dönüşür (Şekil 6.2).
- Parça oda sıcaklığına soğutulduğunda, ince ferrit taneleri ile küçük perlit bölgelerini içeren bir iç yapı oluşur (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. %0,2 C içeren çeliğin içyapısında tavlama işlemi sırasında meydana gelen değişimlerin şematik gösterimi

Ötektoid altı çeliklerin yumuşatma tavına tabi tutulabilmeleri için Ac₃ çizgisinin üzerindeki uygun sıcaklıklarda tavlanmalarının gerekli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Ötektoid altı çeliklerin sağlıklı biçimde ısıl işleme tabi tutulabilmeleri için, önce homojen bir östenitik yapıya sahip olmaları gerekir. Bunun için, östenitleştirme sıcaklığına kadar ısıtılan çelik malzemelerin her 25 mm et kalınlığı için 1 saatlik bir süre o sıcaklıkta tavlanmaları tavsiye edilir [111].



Şekil 6.3. Ötektoid altı ve ötektoid üstü çeliklerin mikro yapısı (a) ötektoid altı (b) ötektoid üstü

Şekil 6.3 incelendiğinde, ilk veya orijinal yapı iri ferrit ve perlit tanelerinden oluşmaktadır (Şekil 6.3.a). Ötektoid üstü çelikler Ac_{3,1} çizgisinin yaklaşık 50°C üzerindeki sıcaklıklarda östenitleştirme işlemine tabi tutulurlar. Bu sıcaklıklarda tutulan çelikler, östenit ve sementit fazlarını içerir. Bu sıcaklıklardan çeliklere su verildiğinde sementit parçacıkları yapıda aynen kalır. Yapıdaki sementit fazı sertliği azaltmadığı gibi, çeliklerin aşınma dirençlerini de artırır. Bu nedenle, ötektoid üstü çeliklerin tamamen östenitleşmesine gerek yoktur. Bu çelikler Ac_{3,1} çizgisinin en az 10°C üzerindeki bir sıcaklıkta tavlanırlar. Yumuşatma tavına tabi tutulan ötektoid üstü çeliklerin içyapıları kaba lamelli perlit alanları ile bunları çevreleyen ötektoid dışı sementit fazından oluşur (Şekil 6.3.b). Bu yapıdaki perliti çevreleyen sementit ağı sert ve gevrektir. İçyapıda kalın ve sert tane sınırlarının bulunması, çeliklerin talaşlı yöntemle işlenmelerini zorlaştırır. Bu nedenle yumuşatma tavı, ötektoid üstü çeliklerin içitil.

6.1.2. Normalizasyon tavlaması

Malzemenin normal yapısını (eşit boydaki yuvarlak tanelerden oluşan ince taneli yapı) yeniden kazanmasıdır. Dövülmüş, haddelenmiş, çekilmiş, dökülmüş, iri taneli ve eş

yönlenmiş yapılar düzelir ve malzeme her zaman yeniden kazanabileceği özelliklere (çekme mukavemeti, süneklik, vs.) geri döner.

Çeliğin bileşimine göre Ac₃ veya Acm sıcaklıklarının 30°-50°C üstüne ısıtıp ve bu sıcaklıkta belirli bir süre tutulması ve bunu takiben durgun havada soğumaya tabi tutulmasıdır. Böylece özellikle, küçük taneli ve dolayısıyla mekanik özellikleri iyileştirilmiş, düzgün dağılımlı ferritik-perlitik bir yapı elde edilir. Ötektoid üstü çeliklerde ise normalleştirme, daha ziyade sürekli sementit ağını kısmen parçalayarak, sonraki yumuşatma tavını kolaylaştırıcı bir ön işlem olarak uygulanır [112]. Ötektoid altı bir çelikte normalleşme sonucu küçük taneli yapısının oluşması Şekil 6.4' de gösterilmektedir.



Şekil 6.4. Normalizasyon sonrasında küçük tane oluşması

Şekil incelendiğinde, başlangıçtaki iri taneli yapı, ısıtma sırasında 723°C üstünde her bir perlit bölgesinden çok sayıda küçük perlit tanesi meydana gelir, Ac₃ sıcaklığının üzerinde yapı sadece ince taneli östenitten meydana gelir, taneler zamanla irileşmeye başlar, ince taneli östenit soğutma sonucu yine ince taneli ferrit+perlit haline dönüşür [112, 113].

Normalizasyon tavlaması şu amaçları gerçekleştirmek için yapılır [110]:

- Tane boyutunu inceltmek
- Homojen bir içyapı elde etmek

- Ötektoid üstü çeliklerde tane sınırlarında bulunan karbür ağını dağıtmak
- Çeliklerin işlenme özelliğini iyileştirmek
- Mekanik özellikleri iyileştirmek
- Çelik parçasının türüne bağlı olarak mukavemetini arttırmak
- Çelik parçasını türüne göre düşük termal e mekanikliğini artırmak
- Yumuşatma tavın tabi tutulmuş çeliklerin sertlik ve mukavemetini artırmak için.

6.1.3. Gerilim Giderme Tavlaması

Metalik malzemeler bazen soğuk olarak deformasyona, kaynak işlemlerine maruz kalabilirler. Bu durumda yapısında dislokasyon yoğunlukları artabilir (yani iç gerilimleri artar) ve böylece deformasyon sertleşmesi gerçekleşir. Deformasyon pekleşmesi, malzemenin sertliğini artmasına ve böylece çatlama ve kırılma riskini ortaya çıkarır. Bu riski ortadan kaldırmak için çeliğin gerilim giderme tavlanmasına ihtiyaç duyulur. Gerilim giderme tavlamasının esası, çeliğin bozulmuş tane yapısını yeniden orijinal haline getirmek ve artan dislokasyon yoğunluğunu da minimum düzeye indirmek hatta yok etmektir. Bu ısıl işlem malzemenin toparlanma ve yeniden kristalleşme sürecini kapsar. Genellikle, 550-650°C arasında ısıtma ve sonra yavaş yavaş soğutma işlemidir [114].

6.1.4. Su verme tavlaması

Su verme, östenitleme bölgesinde belirli bir süre bekletilerek yapısı tamamen östenitleştirilmiş bir çeliğin soğutulması olayıdır. Su verme sözü her ne kadar çeliğin su içerisine daldırılarak soğutulması gibi bir anlam içeriyorsa da, çeliğin soğutulmasını ifade eden genel bir terimdir. Buna göre çelik östenitleştirme sıcaklığında tutulduktan sonra, su içerisine daldırılarak, yağ banyosu içerisine daldırılarak veya havada bırakılarak sertleştirilebilir. Çelikler ister suda, ister yağda veya havada sertleştirilsin, sertleşmeyi sağlayan mekanizma, östenitleme sıcaklığında beklemeyle oluşan östenitin soğuma sonrası hacim merkezli tetragonal (HMT) kristal kafes yapısına sahip martenzite dönüşmesidir.

Tavlama işleminden sonra, çelikler yavaş ya da orta seviyedeki bir hızla soğutulduklarında, östenit içerisinde çözünmüş durumda bulunan karbon atomları difüzyon ile östenit yapıdan ayrılırlar. Soğuma hızı arttırıldığında, karbon atomları difüzyon ile katı çözeltiden ayrılmak

için yeterli zaman bulamazlar. Demir atomları bir miktar hareket etseler bile, karbon atomlarının çözelti içerisinde hapsedilmeleri nedeniyle farklı bir yapı oluşur. Hızlı soğuma sonucunda oluşan bu yapıya "martenzit" adı verilir. Martenzit yapının oluşumu Şekil 6.5' te gösterilmektedir.



Şekil 6.5. Su verme işleminde martenzitik yapı oluşumu [116]

Martenzitin sertliğinin yüksek olmasının en önemli nedeni, kafes yapısının çarpıtılmış olmasıdır. Martenzitik dönüşüm sırasında çelik malzemelerde bir miktar hacimsel büyüme meydana gelir. Söz konusu hacimsel büyüme, çok yüksek düzeyde yerel gerilmeler oluşturarak çeliklerin yapısının aşırı ölçüde çarpılmasına veya plastik şekil değişimine uğramasına neden olur. Kafes yapısının çarpılması, su verilen çeliklerin sertlik ve mukavemetini arttırır [115].

Yayınamayan C atomları hacim merkezli kübik yapıyı gererek hacim merkezli tetragonal yapıya dönüşmesine sebep olur. Bu yapıya martenzit adı verilir. Çok serttir ve iğnemsi bir görünüşe sahiptir.

Su verme işleminden sonra oluşan martenzit mikroskop altında iğne veya diken biçiminde gözükür ve bazen saman demetini andıran bir görünüm sergiler. Çeliklerin çoğunda martenzitik yapı belirsiz ve soluktur, bu nedenle kolayca ayırt edilemez. Yüksek karbonlu çeliklerde ise kalıntı östenit arka fonu oluşturduğundan, martenzitin iğne veya diken biçimindeki yapısı daha belirgin bir görünüm kazanır (Resim 6.1).



Resim 6.1. Martenzitik yapı [117]

Martenzit Fe-C denge diyagramında olmayan bir fazdır. Çeliğin hızlı soğuması sonucunda oluşan martenzitik dönüşüm TTT diyagramı ile gösterilebilir (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. TTT (Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm) diyagramı [118]

Şekil incelendiğinde, burun noktası denilen bir nokta vardır. Herhangi bir çeliğin su verilerek sertleştirilmesi için gerekli soğuma hızı, o çeliğe ait TTT diyagramında burun noktasını kesmeyecek şekilde seçilecek bir soğuma hızıdır. Bu soğuma hızı o çeliğin sertleştirilebilmesi için gerekli kritik soğuma hızı olarak bilinir.

6.2. Sertleştirme

Takım çeliklerinin mümkün olan en yüksek sertlik derecesine ve aşınma mukavemetine sahip olması istenir. Bu arada soğuk şekil değiştirme kabiliyeti kaybolur ve süneklik çok düşer.

Sertleştirme işlemi, öncelikle çelik parçanın östenit faz sıcaklığına kadar ısıtılması ve bu sıcaklıkta belli bir süre tutularak uygun bir ortamda hızla soğutulması işlemidir. Östenit sıcaklığında tutma süresini çelik parçanın östenit fazda homojen bir yapıya ulaşması belirler ve bu süre çeliğin kimyasal bileşimine bağlı olarak değişir. Daha sonra su verilerek sertleştirilir. Bu suretle çelik cam sertliğinde fakat gevrek ve kırılmaya karşı duyarlı olur. Bundan dolayı, iş parçası bunu takiben ısıtılır ve sonra havada serbest olarak soğutulur. Çelik bu surette kendi kullanma sertliğine erişir [109, 112].

Aşağıda azalan soğutma şiddetlerine göre soğutma ortamları sıralanmıştır.

- % 10' luk NaCl₂ çözeltisi,
- Su
- Tuz banyosu
- Yağ çözeltileri
- Yağ
- Hava

6.3. Menevişleme

Sertleştirme sırasında oluşan martenzit yapı birçok uygulama için fazlasıyla sert ve gevrek olup darbe direnci ve dövülgenliği düşüktür. Aynı zamanda hızlı soğuma sonucu parçada yüksek gerilimler meydana gelir. Bu nedenle, hem parçanın gevrekliğini gidererek tok bir yapı kazandırmak hem de iç gerilimlerini azaltmak amacıyla menevişleme (temperleme) ısıl işlemi uygulanır. Temperleme sıcaklığı çeliğin türü ve parçanın kullanılacağı yere bağlı olarak 150-600°C arasında değişir. Tutma süresi parça kalınlığına bağlı olarak 1-2,5 saat arasında değişir. Genellikle 1 inç kalınlığında bir parça için 1 saatlik bir temperleme süresi uygulanır. Bu sürenin sonunda parça fırından çıkarılarak havada soğumaya bırakılır.

Temperleme bir difüzyon olayıdır, dolayısıyla temperleme sıcaklığı ve tutma süresi temperleme sonucunu etkiler (Şekil 6.7) [119].



Şekil 6.7. Su verme sonrasında uygulanan temperleme işlemi [110]

Menevişleme esnasında kristal kafes içinde hapsedilmiş karbonun bir bölümü ayrılarak serbest karbür tanecikleri oluştururken martenzit (M) yapı da ferrite (F) dönüşmeye çalışır. Bu dönüşümler menevişleme sıcaklığı yükseldikçe hızlanır. Düşük sıcaklıklar parçayı yumuşatmadan gerilmeleri alır. Sıcaklık yükseldikçe parçanın sertliği ve mukavemeti düşerken daha tok ve sünek olur. Tüm bu özellik değişmeleri, zamanla bağlantılı oluşur.

Bir çeliğin menevişlenmesi esnasında mekanik özelliklerdeki değişmeler, kısmen iç gerilmelerin azalması sonucu ise de, esas değişmeler ısıtma esnasında mikro yapıda meydana gelen olayların sonucudur. Bu değişmeler, temel olarak menevişleme sıcaklığına bağlıdır, fakat aynı zamanda karbon ve alaşım miktarı, meneviş sıcaklığında bekleme süresi ve başlangıçtaki yapının karakteri gibi birçok faktör rol oynar. Değişimler genel olarak, meneviş sıcaklığına gelindiğinde daha hızlı, bekleme esnasında ise oldukça yavaş seyreder.

Sertleştirilmiş çelikler menevişlendiğinde, çekme dayanımı ve akma sınırı düşük meneviş sıcaklıklarında pek az artma gösterebilir, ancak artan meneviş sıcaklıklarında sertlikte olduğu gibi devamlı düşme gösterirler [109]. Buna karşın, malzemenin şekil değişebilirlik karakteristikleri olan kopma uzaması, kesit daralması ve çentik darbe dayanımı, meneviş

sıcaklığı arttıkça artar (Şekil 6.8). Meneviş kırılganlığı gösteren çeliklerde, kırılganlığın meydana geldiği meneviş sıcaklıklarında tavlama yapılırsa ya da bu sıcaklık bölgesinden yavaş soğuma ile geçilirse, şekil değiştirme karakteristiklerinde büyük düşme görülebilir.



Şekil 6.8. Menevişleme sonrasındaki mekanik özelliklerin değişimi [113]

Şekil incelendiğinde, menevişleme işleminde, sertlik ve çekme dayanımına nazaran akma sınırının düşmesi daha azdır. Çökelerek dağılmış ince karbürler, kayma düzlemlerinin hareketini engellediğinden, bu durum özellikle yüksek meneviş sıcaklıklarında ortaya çıkar. Düşük meneviş sıcaklıklarında düşme, sertlik ve çekme dayanımı ile aynı olur. Artan meneviş sıcaklığı ile akma sınırında düşme devam ederken, artan şekil değişebilirlikle birlikte elastiklik sınırında da iyileşme görülür [120, 121].

6.4. Sayısal Analiz

Birçok araştırmada, yanıt değişkenini etkileyen faktör sayısı iki veya daha fazla olabilir. Bu faktörler ve düzeyleri araştırmacı tarafından seçilir. Faktörlerin düzeylerinin oluşturduğu tüm deneme kombinasyonları üzerine kurulduğu düzene *faktöriyel düzen* adı verilir. İlk faktörün düzen sayısı a, ikinci faktörün düzen sayısı b, ..., k' ıncı faktörün düzey sayısı k olsun. Bu durumda, axbx...xk faktöriyel düzeninde, axbx...xk kadar deneme kombinasyonu vardır denir. Örneğin, 2x2x2=8 tane deneme kombinasyonu vardır. Deneme kombinasyonları deney birimlerine rastgele atandığında, tamamen rastgele bir düzen elde edilir. Çalışmada, dört faktörlü model kullanılmıştır. Aşağıda iki ve üç faktör olduğunda matematiksel model ve denklemler verilmiştir [122].

6.4.1. İki faktörlü düzen

Yanıt değişkeninde meydana gelen değişim üzerinde her bir faktörün ayrı ayrı etkilerine *ana etki* adı verilir. Yanıt değişkeni üzerinde bir faktörün etkisi, diğer bütün faktörün düzeylerinde aynı değil ise, faktörler arasında *etkileşim vardır* denir. A ve B gibi ikişer düzeyli iki faktöre ilişkin etkileşim grafikleri Şekil 6.9' da verilmiştir [123]. Şekil incelendiğinde, 2x2 faktöriyel düzende A ve B faktörleri arasında etkileşimin olmaması durumu Şekil 6.9.a' da ve etkileşimin olduğu durumlar ise, Şekil 6.9.b' de gösterilmektedir.



Şekil 6.9. Faktöriyel deney etkileşim grafikleri; a) Etkileşimsiz faktöriyel düzen, b) Etkileşimli faktöriyel düzen

Etkileşimlere ilişkin verilen örneklerin grafik üzerindeki görünümü Şekil 6.9' da verilmektedir. Şekil 6.9.a' da görüldüğü gibi B(-) ve B(+) hatları yaklaşık olarak paraleldir. Bu durum A ve B faktörleri arasında etkileşimin olmadığını göstermektedir. Şeklin 6.9.b' de ise B(-) ve B(+) hatları paralel değildir. Bu durum A ve B faktörleri arasında etkileşim olduğunu göstermektedir. Bu grafikler etkileşimlerin anlamlı bir şekilde yorumlanmasında ve raporların kolay anlaşılmasında yardımcı olmaktadır [124].

N tekrarlı (n>1) ve iki faktörlü tamamen rastgele bir düzende, doğrusal model "Eş. 6.1" ile gösterilmektedir [125].

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha \beta_{ij} + \epsilon_{k(ij)}, \qquad i = 1, 2, ..., a$$

$$j = 1, 2, ..., b$$

$$k = 1, 2, ..., n$$
(6.1)

Yukarda verilen notasyonlar aşağıda verilmektedir.

- Y_{ijk} ; k. tekrarda, A faktörünün i' nci düzeyinde ve B faktörünün j' inci düzeyindeki gözlem değeri
- μ ; genel ortalama
- α_i ; A faktörünün i' nci düzey etkisi
- β_j ; B faktörünün j' nci düzey etkisi

 $\alpha\beta_{ij}$; A faktörünün i' nci düzey etkisi ile B faktörünün j' nci düzeyinin etkileşim etkisi $\epsilon_{k(ij)}$; hata terimi

İki faktörlü düzen için varyans analizi sonuç tablosu aşağıda verilmiştir. (Çizelge 6.1).

| Değişimin Kaynağı | Serbestlik derecesi (sd) | Kareler toplamı (KT) | Kareler ortalaması (KO) | Test istatistikleri (F _{Hes.}) |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|
| А | a-1 | KT _A | KOA | KO _A /KO _{Hata} |
| В | b-1 | KΤ _B | KOB | KO _B /KO _{Hata} |
| AB | (a-1)(b-1) | KT _{AB} | KO _{AB} | KO _{AB} /KO _{Hata} |
| Hata | ab(n-1) | KT _{Hata} | KO _{Hata} | |
| Genel | abn-1 | $\mathrm{KT}_{\mathrm{Genel}}$ | | |

Çizelge 6.1. İki faktörlü sabit etkili bir düzen için varyans analizi sonuç tablosu

Her bir deneme kombinasyonunda gözlem sayısı bir tane ise (n=1), hata terimine sıfır serbestlik derecesi kalacaktır. Böylece, en yüksek etkileşim (Çizelge 6.1 için AB' dir) hata terimi olarak kullanılır. Ancak, bu durumda temel etkileri test etmek mümkün olurken, etkileşim etkisini test etmek mümkün olmayacaktır. Bu nedenle, n>1 alınır.

6.4.2. Üç faktörlü düzen

A, B, C gibi üç faktör ele alalım. A faktörünün düzeylerinin sayısı a, B faktörünün düzeylerinin sayısı b, C faktörünün düzeylerinin sayısı c kadar olsun. Bütün mümkün etkileşimleri test etmek ve hata kareler toplamını belirlemek için en az iki tekrar yapılmalıdır (n>2). Deneydeki bu üç faktörü sabit etkili seçersek, ana etkiler ve etkileşim etkilerine ilişkin hipotezler kolayca test edilebilir [125-127]. Üç faktörlü sabit etkili bir düzen için varyans analizi sonuçları Çizelge 6.2' de verilmiştir.

Üç faktörlü tamamen rastgele bir düzende, doğrusal model "Eş. 6.2" ile gösterilmektedir.

 $Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha \beta_{ij} + \gamma_k + \alpha \gamma_{ik} + \beta \gamma_{jk} + \alpha \beta \gamma_{ijk+} \epsilon_{l(ijk),} \quad i=1, 2, \dots, a$ $j=1, 2, \dots, b$ $k=1, 2, \dots, c$ $l=1, 2, \dots, n$ (6.2)

| | Serbestlik | Kareler | Kareler | Test | |
|-------------------|-----------------|---------------------------|--------------------|---------------------------------------|--|
| Değişimin kaynağı | derecesi | toplamı | ortalaması | istatistikleri | |
| | (sd) | (KT) | (KO) | (F _{HES.}) | |
| А | a-1 | KT _A | KOA | KO _A /KT _{Hata} | |
| В | b-1 | KT _B | KOB | KO _B /KT _{Hata} | |
| AB | (a-1)(b-1) | KT _{AB} | KO _{AB} | KO _{AB} /KT _{Hata} | |
| С | c-1 | KT _C | KO _C | KO _C /KT _{Hata} | |
| AC | (a-1)(c-1) | KT _{AC} | KO _{AC} | KO _{AC} /KT _{Hata} | |
| BC | (b-1)(c-1) | K T _{BC} | KO _{BC} | KO _{BC} /KT _{Hata} | |
| ABC | (a-1)(b-1)(c-1) | KTABC | KO _{ABC} | KO _{ABC} /KT _{Hata} | |
| Hata | ab(n-1) | KT _{Hata} | KO _{Hata} | | |
| Genel | abn-1 | | | | |

Çizelge 6.2. Üç faktörlü sabit etkili bir düzen için varyans analizi sonuç tablosu

6.4.3. Tukey testi

Bazı çoklu karşılaştırma yöntemleri ile grup ortalamaları arasında önemli fark bulmak oldukça kolaydır, yani yanılma düzeyi 0,05 olarak seçilse bile, %5' ten daha fazla olasılıkla gerçekte fark olmadığı halde, fark varmış gibi sonuç elde edilir. Tukey testi ise varyans analizi sonrası uygulanan çoklu karşılaştırma yöntemleri içinde en doğru ve en güçlü testlerden biridir. Tukey testi ile yalnızca ikişerli karşılaştırmalar yapılabilir. Bu testle, hataya ait serbestlik derecesi (HSD) adı verilen en küçük önemli fark hesaplanır. Eğer iki grubun ortalamaları arasındaki fark, HSD' den fazlaysa, iki grubun ortalamalarının birbirinden önemli derecede farklı olduğu söylenebilir [126].

7. MATERYAL ve METOT

Deneysel çalışmada, Cr-Mo alaşımlı 16Mo3 (1.5415) çelik sac malzeme kullanılmıştır. Bu alaşımlarda krom miktarı %0,4 kadar küçük bir değerden %10' a kadar yüksek değer aralığında değişirken, molibden oranı %0,1 ile %0,25 arasındadır. Bu çeliklerde düşük düzeylerdeki krom ve molibdenin mekanik özellikleri düşük alaşımlı yapı çelikleri ile benzerdir. Dövme, dökme ve haddelemede kullanılabilirler. Yüksek krom miktarı, çeliğin korozyon direncini son derece artırır. 16Mo3 sac malzemeler yüksek sıcaklık ve basınç altında kullanıma uygun sıcak haddelenmiş kazan çelikleridir. Maksimum kullanma sıcaklığı 530°C' ye kadardır. 16Mo3 sac malzemeler çok uzun çalışma sürelerinde (105 saatten fazla) ve pek az form değiştirme olması gereken parçalarda, 450°C' nin altında da molibden alaşımlı çelikler kullanılır. 16Mo3 sac malzemeler; otomotiv endüstrisinde, buhar kazanları imalatlarında, türbin kanatlarında, basınçlı kaplarda, gaz türbinleri ve eşanjörlerde, petrokimya ve üretim endüstrisinde, ısıtma borularının imalatında kullanılırlar.

Bu çalışmada, farklı kalınlıklara sahip (3, 4, 5 ve 6 mm) 16Mo3 sac malzemenin, farklı bükme açılarında ve farklı zımba uç radyüslerinde bükülmesi neticesinde meydana gelen geri ve ileri esneme değerleri incelenmiştir. Yapılan literatür incelemesinde, malzemeye uygulanan ısıl işlemin geri ve ileri esneme üzerindeki etkilerinin incelenmediği belirlenmiştir. Bunun üzerine, malzemeye uygulanan ısıl işlemlerin (normalizasyon ve menevişlenmiş) bükmede geri ve ileri esnemeye olan etkilerini incelemek suretiyle literatüre katkıda bulunulmuştur. Deneysel çalışmada kullanılan bükme parametrelerinden, malzeme özellikleri, bükme açısı, bekleme süresi, sac malzeme kalınlığı ve zımba uç radyüsünün etkisi Minitab analiz programı kullanılarak istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve bilgisayar ortamında matematiksel modeller geliştirilmiştir. Elde edilen analizler neticesinde bükme parametrelerine etkili olan faktörler ve etkileşimler, yapılan analizler neticesinde uygun bükme parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Deney numunelerinin çekme, bükme ve sertlik deneyleri ile mekanik özellikleri, SEM, optik mikroskop ile mikro yapıları ve EDS çalışmaları ile de mikro yapısal etkiler incelenmiştir. Deneysel çalışmaların yapılma sıraları ve iş akış şeması Şekil 7.1' de gösterilmektedir.



Şekil 7.1. Deneysel çalışmada iş akış şeması

7.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme

Deneylerde 30x60 mm ebatlarında 3, 4, 5 ve 6 mm kalınlıklarında 16Mo3 (1.5415) sac malzemeler kullanılmıştır. Deney numunelerinin kimyasal bileşimi Çizelge 7.1' de, mekanik özellikleri ise Çizelge 7.2' de verilmiştir. Deney malzemeleri sertifikalı olarak temin edilmiş olup bu malzemelere ait sertifikalar EK-1' de verilmiştir.

| C | Si | Mn | Р | S | Cr | Co | Ni | Mo | Cu |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,149 | 0,230 | 0,737 | 0,011 | 0,007 | 0,042 | 0,014 | 0,039 | 0,286 | 0,006 |

Çizelge 7.1. 16Mo3 sac malzemenin kimyasal bileşimi (Ağırlıkça %)

Çizelge 7.2. 16Mo3 sac malzemenin mekanik özellikleri

| Çekme Dayanımı | Akma Dayanımı | Sertlik | Yüzde uzama |
|----------------|---------------|-----------|-------------|
| (Mpa) | (Mpa) | (Vickers) | (%) |
| 480 | 220 | 220 | 22 |

7.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney numuneleri, haddeleme yönünde (0°), 30x60 mm ebatlarında, hidrolik makas tezgâhında kesilerek hazırlanmıştır (Resim 7.1). Kesme sonucunda malzeme yanaklarında meydana gelen kesim izlerini gidermek için freze tezgâhında numunelerin yan kenarları işlenerek malzeme üzerindeki olumsuzluklar giderilmiştir.



Resim 7.1. Deney numuneleri

Deney numunelerine 3 farklı ısıl işlem açısından incelemeler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan yöntemlerinden birincisi olan, ısıl işlemsiz bükme işleminde (II), numune üzerine herhangi bir işlem uygulanmamıştır.
İkinci yöntem olan normalizasyon işleminde (NI) ötektoidaltı çeliklere Ac₃ sıcaklığının 30-50°C üzerindeki östenitleme sıcaklığında su verildiğinden dolayı, numuneler, 890°C' ye kadar ısıtılarak, sac kalınlıklarına göre fırında bekletilmiş (Çizelge 7.3) ve daha sonra serbest havada oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır (Şekil 7.2). Üçüncü yöntem menevişleme işleminde (MI) ise, numuneler Ac₃ sıcaklığı olan 850°C' ye kadar ısıtılarak, sac kalınlıklarına göre fırında bekletildikten sonra (Çizelge 7.3), sıcaklığı 20-40°C olan saf su içerisine daldırılmıştır. Su verilen parçanın tamamen soğuması çatlamaya sebep olması nedeniyle, numuneler 60-80°C sıcaklığa düştükten sonra, menevişleme işlemi için tavlama fırınına yerleştirilmiştir. Numuneler, 400°C sıcaklığındaki tavlama fırınında, kalınlıklarına göre menevişleme sürelerinde bekletilmiş daha sonra tav fırınından alınarak oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır (Çizelge 7.3).

Çizelge 7.3. 16Mo3 sac malzemelerin normalizasyon ve menevişleme sıcaklıklarında bekleme süreleri

| Malzeme Cinsi | Sac kalınlığı S. mm | Normalizasyon ve | | | | |
|---------------|---------------------|--------------------------|--|--|--|--|
| | Suo humingi S, min | Menevişleme Süresi (dak) | | | | |
| | 3 | 10 | | | | |
| | 4 | 13 | | | | |
| 16Mo3 | 5 | 15 | | | | |
| | 6 | 18 | | | | |

NI ve MI sonucunda sac malzeme içerisindeki kimyasal özelliklerinde herhangi bir değişiklik olup olmadığı malzeme analizleri yapılarak kontrol edilmiştir. Yapılan spektral analizleri sonucunda elde edilen ağırlıkça kimyasal değişim EK-2' de verilmiştir.



Şekil 7.2. 16Mo3 sac malzemenin CCT diagramı [128]

7.3. Deneysel Çalışmada Kullanılan Bükme Kalıbı

Deneysel çalışmada kullanılan bükme kalıbının erkek zımbası ve dişi kalıbı Ç1390 makas çeliğinden, CNC dik işleme merkezinde hassas olarak imalatı yapılmıştır. Makas çeliğinin spektral analizi yapılarak elde edilen kimyasal kompozisyonu Çizelge 7.4' de verilmektedir. Bükme kalıbı malzemesinde darbeden dolayı çatlama ve kırılma meydana

gelme ihtimaline karşı, malzemenin içyapısındaki gerilimleri gidermek için menevişleme işlemi uygulanmıştır. Resim 7.2.a' da bükme kalıbı, Resim 7.2.b' de bükme zımbaları görülmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan bükme kalıbının komple ve detay resimleri EK-3' de verilmiştir.

Çizelge 7.4. Makas çeliğinin kimyasal kompozisyonu

| C (%) | Mn (%) | Si (%) | P (%) | S (%) |
|-------|--------|--------|-------|-------|
| 0,87 | 1,53 | 0,18 | 0,04 | 0,038 |



Resim 7.2. Deneysel çalışmada kullanılan bükme kalıbı ve bükme zımbaları a) Bükme kalıbı, b) 30°, 60° ve 90° bükme zımbaları

Deneysel çalışma esnasında serbest bükme kuvveti alınmıştır. Kalıp ve zımba arasına sac kalınlığı kadar boşluk verilmesi nedeni ile "Pe" son bükme kuvvetinin kesit alanını ezmesine müsaade edilmemiştir. Bu nedenle, kesit alanı ezilmeyen numune üzerinde zımba sac kalınlığı kadar yaklaşmakta ve daha sonra tekrar kaldırılmaktadır.

Bükme kalıplarının tasarım aşamasında 3, 4, 5 ve 6 mm sac malzemeler üzerine bükme işlemi uygulanacağı için erkek zımba uç yarıçapı '' $0,5 \le S \le 1,5$ '' değerleri arasında olması gerekir [63]. Bükülecek parçaların farklı kalınlıkta (3, 4, 5 ve 6 mm) olmasından dolayı sac malzemelerinin 30°, 60° ve 90° bükme açılarında her bükme açısı için farklı zımba uç yarıçaplarının imalat edilmesi gerekmektedir. Bu durum maliyeti arttıracağından dolayı zımba uç radyüs değeri '' $0,5 \le S \le 1,5$ '' arasında 3, 4, 5 ve 6 mm sac malzemeler için ortak bir değer seçilmiştir. Alınan farklı yarıçap değerleri ve katsayılar Çizelge 7.5' de imalatı yapılmış olan zımba yarıçapları Şekil 7.3' de gösterilmiştir.



Şekil 7.3. 90° bükme işlemi için alınan farklı zımba yarıçap değerleri

Endüstride yaygın olarak kullanılan 90° bükme işlemi için 4 mm kalınlığındaki 16Mo3 sac malzeme üzerinde, farklı radyüs değerlerinin geri ve ileri esnemeye olan etkilerini araştırmak amacıyla R2, R3, R4, R5 ve R6 mm değerleri için 5 adet erkek zımba imalatı yapılmıştır (Şekil 7.3). Belirlenen radyüs değerleri $0,5 \le S \le 1,5$ değerleri arasından "R_b=1,5xS⁴, eşitliği kullanılarak elde edilen radyüs değerleri Çizelge 7.5' de gösterilmiştir.

| Sac kalınlığı | Bükme Açısı, | Katsayı | Zımba Uç | Zımba Köşe |
|---------------|--------------|-----------|-------------------------|-------------------------|
| (mm) | Derece | 0,5≤S≤1,5 | Radyüsü, R _b | Radyüsü, R _m |
| 3 | 30,60,90 | 1,5 | 4,5 mm | 4,5 mm |
| 4 | 30,60,90 | 1,125 | 4,5 mm | 4,5 mm |
| 5 | 30,60,90 | 0,9 | 4,5 mm | 4,5 mm |
| 6 | 30,60,90 | 0,75 | 4,5 mm | 4,5 mm |
| | 90 | 0,5 | 2 mm | 2 mm |
| | 90 | 0,75 | 3 mm | 3 mm |
| 4 | 90 | 1 | 4 mm | 4 mm |
| | 90 | 1,25 | 5 mm | 5 mm |
| | 90 | 1,5 | 6 mm | 6 mm |

Çizelge 7.5. Farklı kalınlıktaki sac malzemeler ve 4 mm için alınan zımba uç yarıçapları

7.4. Deneysel Çalışmada Kullanılan Makine ve Cihazlar

7.4.1. Sac kesme makası

Sac malzemelerin 30x60 mm ebatlarında kesilmesinde Baykal HNC Serisi ''Hidrolik Giyotin Makas'' kullanılmıştır (Resim 7.3).



Resim 7.3. Baykal HNC Serisi Hidrolik Giyotin Makas

Baykal HNC Serisi Hidrolik Giyotin Makasın genel özellikleri aşağıda verilmektedir.

- Statik ve dinamik rijitliği sağlanmış, kaynaklı sac konstrüksiyon gövde,
- Ayarlanabilir kesme açısı prensibine uygun tasarım,
- Kullanımı kolay dijital kontrollü makine ayar ve fonksiyonları,
- Ekstra derinlikte (350 mm) devamlı şerit kesmeye yarayan ayak boğaz derinliği,
- Bilyalı miller üzerinde hareket eden arka dayama sistemi,
- Arka dayama geri-çekilme özelliği,
- Ayarlanabilir kesme-strok uzunluğu,
- Az bakım gerektiren, kompakt, hidrolik donanım,
- Kesme anında sacın kaymasını önleyen hidrolik baskı sistemidir.

7.4.2. Tavlama fırını

Menevişleme işlemi için BMK-10 marka Dijital Termostatlı max. sıcaklığı 400° C olan tavlama firini kullanılmıştır (Resim 7.4).



Resim 7.4. BMK-10 marka dijital termostatlı fırın

BMK-10 firinin genel özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Max. 1sitma derecesi 0-400° C arasında,
- Çalışma gücü 3800 watt,
- Çalışma voltajı 380 V,
- Çalışma Akımı 16 amper,
- Ebatlar / Ağırlık; H-102cm x Y-67 cm x D-45 cm / 80,
- 1000 çubuk kapasiteli,
- Çekmeceli raflıdır.

7.4.3. Hidrolik pres

Deneysel çalışmalar, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde bulunan 600 kN basma kapasiteli C tipi Şahinler marka hidrolik pres tezgahında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların yapıldığı pres tezgahı ve kısımları Şekil 7.4' da, pres tezgahının teknik özellikleri Çizelge 7.6' da verilmiştir.



Şekil 7.4. Deneysel çalışmaların yapıldığı pres tezgahı ve bölümleri

| Presleme Kuvveti | 600 kN |
|---------------------|------------|
| Motor Gücü | 4 KW |
| Faydalı Kalıp Alanı | 500x500 mm |
| Piston Hareketi | 500 mm |
| Max. Açıklık | 650 mm |
| Presleme Hızı | 37,5 mm/s |
| Geri Dönüş Hızı | 50 mm/s |

Çizelge 7.6. Pres tezgâhının genel özellikleri

7.4.4. Ölçme işleminde kullanılan cihazlar

Bükme işlemleri sonucunda elde edilen numuneler, açı ölçerle ön bir ölçme işlemine tabi tutulmuş ve daha sonra her bir parça DEA marka koordinat ölçme cihazı (CMM) kullanılarak hassas olarak ölçülmüştür (Resim 7.5). Ölçme işlemlerinde numune üzerinden 8 nokta alınarak bu noktalar arasındaki açı değerleri hassas olarak ölçülmüştür (Şekil 7.5.a). Bu sayede ölçmede meydana gelebilecek hata en aza indirilmiş ve sonuçların güvenilirliği sağlanmıştır.



Resim 7.5. Numunelerin açısını ölçmede kullanılan CMM cihazı



Şekil 7.5. Deney numuneleri; a) CMM cihazında alınan noktalar; b) tel erezyonda kesilen bölge

7.5. Malzeme Karakterizasyonu

96

Bükme işlemi neticesince, ısıl işlemsiz, normalize ve menevişlenmiş numunelerin numune mikro yapılarında deformasyona bağlı olarak oluşumlarını incelemek amacıyla, numune deformasyon bölgesinden tel erozyon tezgâhı ile parça kesilerek, malzeme mikro yapısal karakterizasyonu ve sertlik değerleri incelenmiştir (Şekil 7.5.b).

7.5.1. Mikro yapı incelemeleri

Metalografik incelemeler için numuneler sırası ile 600, 800, 1000, 1200 grid' lik zımpara aşamalarından geçirilmiştir. Daha sonra elmas pasta kullanılarak parlatma işlemi yapılmış ve %2' lik nital çözeltisi ile dağlanmıştır.

Mikro yapı incelemelerinde Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümündeki JEOL JSM-6060LV marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır (Resim 7.6). Mikro yapıdaki faz ve/veya yapılardaki alaşım elementlerinin % dağılımları, Elektron Dağılım Spektrometresi (EDS) ile belirlenmiştir.



Resim 7.6. JOEL JSM–6060LV model taramalı elektron mikroskobu ve EDS bağlantısı

7.5.2. Sertlik ölçümleri

Numunelerin zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerinden sonra mikro yapıdaki fazların sertliklerini ölçmek için, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümündeki HMV, SHIMADZU marka mikro sertlik cihazı kullanılmıştır. Mikro sertlik ölçümlerinde 10g' lık yük kullanılarak ortalamaları Vickers (HV 0.1) sertlik cinsinden kaydedilmiştir (Resim 7.7).



Resim 7.7. Mikro sertlik ölçüm cihazı

II, NI ve MI uygulanmış numunelerin mikro yapısı incelendikten sonra, mikro sertlik değerleri alınmıştır. Sertlik değerlerinin güvenirliği açısından her numune için en az 5

farklı bölgeden mikro sertlik değeri alınmıştır. Her numune için elde edilen mikro sertlik değerlerinin ayrı ayrı ortalaması hesaplanarak sertlik değerleri elde edilmiştir.

7.5.3. Çekme deneyleri

Isıl işlemsiz, normalize ve menevişlenmiş numunelerin, mukavemet değerlerinin belirlenebilmesi için çekme deneyi sonucunda akma ve çekme dtestlerinin yanı sıra ayrıca ilk ve son boya göre % uzama değerleri de hesaplanmıştır. Çekme deneyleri, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi bünyesindeki, malzeme laboratuarında Dartec marka cihazda yapılmıştır (Resim 7.8).



Resim 7.8. Çekme deney düzeneği

Çekme deneyinde kullanılan ısıl işlemsiz, normalize ve menevişlenmiş numuneler haddeleme yönünde (0°) kesilerek hazırlanmıştır. Çekme testinde kullanılan numune teknik resmi Şekil 7.6' de verilmiştir.



Şekil 7.6. Çekme deneyi numunesi

Standartlara göre hazırlanmış çekme deney numuneleri çekme test cihazında, 10 mm/dk çekme hızlarında oda sıcaklığında test edilmiştir. Çekme testi verileri gerilim (MPa)-Uzama (%) miktarı olarak belirlenmiştir. Çekme deneylerinde II, NI ve MI uygulanmış numuneler için farklı kalınlık kullanılarak her birinden en az 3 adet numune kullanılmıştır ve elde edilen verilerin ortalaması hesaplanarak akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama değerleri elde edilmiştir.

Çekme testi yapılmış numunelerde kırılma tiplerinin belirlenebilmesi için, kırık yüzeyler taramalı elektron mikroskobunda (SEM) farklı büyütme oranlarında kırık yüzey değişimleri incelenmiştir. Böylece, farklı ferrit, perlit ve martenzit parçacık boyutu ve hacim oranına bağlı kalarak kırılma modundaki değişimler tespit edilmiştir. Oksitlenmeye bağlı olarak, malzeme yüzeylerinde oluşabilecek olumsuz etkilerden dolayı kırık yüzeyler çekme testlerinden hemen sonra incelenmiştir.

7.6. Metot

Bükme işlemi sac metal kalıpçılığın en önemli uygulama alanlarından bir tanesidir. Sac metal şekillendirme işlemlerinde zımba sac malzeme bükme deformasyon bölgesinden kaldırıldığında, elastik geri dönüşten dolayı sac malzeme özelliklerine bağlı olarak geri ve ileri esneme davranışı meydana gelmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmada, V dip bükme tekniğinde, farklı kalınlıklara sahip 16Mo3 sac malzemelerin (ısıl işlemsiz (II), normalize (NI) ve menevişlenmiş (MI)) farklı bükme parametrelerinde şekillendirilebilirliği esnasında meydana gelen geri ve ileri esneme davranışları araştırılmıştır.

Deneysel çalışmada, dört farklı kalınlıktaki (3, 4, 5 ve 6 mm) 16Mo3 sac malzemeler üç farklı bükme açısında; 4,5 mm zımba uç radyüsünde, zımba sac malzeme üzerinde bekletilmeden bükme işlemini yaptıktan hemen sonra üzerindeki yük kaldırılarak ve zımbanın sac malzeme bükme bölgesinde 30 s bekletilerek bükme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bükme işlemlerinde, farklı zımba uç radyüsünün geri ve ileri esneme davranışına etkisini araştırmak amacıyla, 4 mm kalınlığa sahip II, NI ve MI uygulanmış 16Mo3 numuneler kullanılmıştır. Numuneler üzerine 90° bükme işlemi uygulanarak, zımbanın numune üzerinde bekletilmeden direk kaldırıldığı ve zımbanın numune büküm bölgesinde 30 s bekleyerek yapılan bükme işleminde zımba uç yarıçapının etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bükme işlemi esnasında, zımba ve kalıp arasına sac malzeme kalınlığı kadar boşluk verilmiştir.

Bükme işlemleri esnasında, zımba ve kalıp arasına sac kalınlığı kadar boşluk bırakılarak numunenin kesit alanının ezilmesine izin verilmemiştir. Böylece, numunenin ezilerek ileri ve geri esnemeye olan etkisi engellenmiştir. Deneyler, serbest bükme kuvvetinde ve zımba inme hızı 20 m/s de gerçekleştirilmiştir. Deney serilerinde, 30x60 mm ebatlarında 1020 adet numune II, NI ve MI uygulanarak bükülmüştür. Her deney 10 kez tekrarlanmıştır. Ayrıca, deney serilerinden çıkan sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. II, NI ve MI sonrasında, zımbanın sac malzeme üzerinde bekletilmeden ve 30 s bekletildikten sonra kaldırıldığı deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan bükme parametreleri Çizelge 7.7' de gösterilmektedir. Deneysel çalışmada tekrarlanan değerlerin aritmetik ortalamaları alınarak ileri ve geri esneme grafikleri oluşturulmuştur. Bunun yanısıra, deney serilerinden çıkan sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Son olarak, bükme parametrelerin geri ve ileri esneme grafikleri oluşturulmuştur. Son olarak, bükme parametrelerinin geri ve ileri esneme üzerindeki etkileri istatistiksel olarak ayrı ayrı ele alınmıştır. Böylece, geri ve ileri esneme üzerinde en etkin parametrelerin belirlenmesine çalışılmıştır.

| Malzeme | Bükme Parametreleri | Zımba bekleme süresi, s | S, mm | Zımba Açısı,° | Zımba uç yarıçapı, Rm | Deney Sayısı |
|-------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------|--------------------------------------|---|
| 16162 | П | Direl | 3 mm 4 mm 5 mm 6 mm | 150 120 90 | 4,5 mm | 180 180 180 180 180 |
| 16Mo3 (1.5415) | NI MI | Direk 30 s bek | 4 mm | 90 | 2 mm 3 mm 4 mm 5 mm 6 mm | 60 60 60 60 60 |
| | | Çalış | şmada yapıl | an toplam d | eney sayısı | 1020 |

Çizelge 7.7. Deneysel çalışmada kullanılan bükme parametreleri

Bükme işlemleri sonucunda elde edilen numuneler, açıölçerle ön bir ölçme işlemine tabi tutulmuş ve daha sonra her bir parça CMM cihazı kullanılarak hassas olarak ölçülmüştür. Bükme işlemleri neticesinde, numune içyapılarında deformasyona bağlı olarak mikro yapı oluşumlarını incelemek amacıyla, numune deformasyon bölgesinden tel erozyon tezgâhı ile parça kesilerek, malzeme mikro yapısal karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaç için optik ve elektron mikroskop kullanılarak, özellikle bükme bölgesi malzeme deformasyonu açısından değerlendirilmiştir.

7.7. Sayısal Modelleme

Bükme açısı, malzeme özellikleri, bekleme süresi, sac malzeme kalınlığı ve zımba uç radyüsü parametrelerinin "girdi" parametreleri olarak değerlendirildiği deneysel çalışmalar neticesinde, "çıktı" parametreleri olarak; geri ve ileri esneme değerleri ortaya konulmuştur.

Çoklu varyans analizi için, Minitab 15 paket programı kullanılmıştır. Genelde varyans analizi; bağımlı değişkendeki değişimi açıklayabilmek; diğer faktörlerin etkisi olmaksızın, bağımlı değişkene etkilerinin tahminini yapabilmek; bağımlı değişkene ilişkin ortalama değerlerin bulunması amacıyla kullanılmaktadır. Böyle bir varyans modelinde bağımlı

değişkendeki değişim, bağımsız değişkenler ile açıklanılmaya çalışılmaktadır. Korelâsyon katsayısının karesi (R²) olarak bilinen bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranı ise, varyans modelindeki açıklama miktarının açıklanmayan miktara olan oranıdır. Varyans katsayısı ise, ilgili bağımsız değişkendeki bir birimlik artışın değişkende oluşturacağı değişim miktarıdır. Bu bilgiler sonucunda, çoklu varyans analizi, bükme açısı, malzeme özellikleri, bekleme süresi, sac malzeme kalınlığı ve zımba uç radyüsü değişkenleri ile bükme parametrelerinin geri ve ileri esneme değerlerine etkisinin belirlenmesini sağlamaktadır.

Deney sonuçlarına, çoklu varyans analizi uygulanırken bu analizde bağımlı değişkenler bükme açısı (D), malzeme özellikleri (I), bekleme süresi (B) ve sac malzeme kalınlığı (K) ve zımba uç radyüsü (R) alınırken; bağımsız değişkenler ise, geri ve ileri esneme değerleri olarak alınmıştır. Gerçekleştirilen analizler neticesinde, bükme parametrelerinin ayrı ayrı ve bir birleri ile olan etkileşimleri ve parametreler arasındaki etkileşim incelenmiştir.

Bükme parametreleri arasında etkili olmayan faktörler çıkartılarak yeniden analiz yapılmıştır. Analiz neticesinde anlamlı olmayan etkileşimler ve parametrelere anlamlılık kazandırılmaya çalışılmıştır. Minitab programında Tukey analizi kullanılarak her bir bükme parametresinin etkisi ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Daha sonra, faktör parametreleri arasındaki ilişki matematiksel olarak modellenerek açıklanmaya çalışılmıştır.

8. DENEYSEL SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Bükme işleminde, kullanılan deney parametrelerinin (uygulanan ısıl işlem, sac kalınlığı, bükme açısı, zımba uç radyüsü ve zımba bekleme süresi) etkisini ve meydana gelen geri ve ileri esnemenin malzeme mikro yapısal karakterizasyonu ve matematiksel olarak modellenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışma dört aşamada gerçekleştirilmiştir.

- Ilk olarak, sac malzeme kalınlığının (3, 4, 5 ve 6 mm) geri ve ileri esneme miktarına etkisini incelemek amacıyla ısıl işlemsiz (II), normalize (NI) ve menevişleme işlemi (MI) uygulanmış 16Mo3 (1.5415) sac malzemeler bükme işlemine tabi tutulmuştur. Çalışmada, zımba uç radyüsü 4,5 mm olan 150°, 120° ve 90° zımbalar kullanılarak sırasıyla; 30°, 60° ve 90° bükme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 90° bükme işleminde farklı zımba uç radyüslerinin (R2, R3, R4, R5 ve R6 mm) geri ve ileri esneme değerlerine olan etkilerini belirleyebilmek amacıyla, 4 mm kalınlığındaki 16Mo3 (1.5415) sac malzemeler; II, NI ve MI uygulanarak bükme işlemine tabi tutulmuştur. Deneyler, zımbanın sac malzeme deformasyon bölgesinde bekletilmeden direk kaldırıldığı ve bükme bölgesinde 30 saniye (30 s) bekletildikten sonra kaldırmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, elde edilen geri ve ileri esneme değerlerinden oluşturulan grafikler yardımıyla polinom eğri denklemleri elde edilerek literatüre katkıda bulunulmuştur. Bükme işlemi sonrasında, kullanılan bükme parametrelerinin geri ve ileri esneme miktarılarına olan etkisi ve neden olan oluşum mekanizmaları incelenmiştir.
- İkinci olarak; 3, 4, 5 ve 6 mm kalınlıklardaki II, NI ve MI uygulanmış sac malzemeler 30°, 60° ve 90° bükme işlemi neticesinde tel erezyon tezgahı ile orta deformasyon bölgesinden parçacıklar çıkartılarak meydana gelen ferrit fazı, perlit yapısı ve martenzit oluşumu incelenmiştir. Buna bağlı olarak, şekillendirme sonucunda meydana gelen deformasyon bantları, tane yönlenmeleri ve mikro yapısal karakterizasyonu (ferrit, perlit ve martenzit yapısı) incelenmiştir.
- Üçüncü olarak, II malzemeye uygulanan, NI ve MI sac malzemenin mekanik özelliklerine (akma, çekme ve % uzama) olan etkisini incelemek amacıyla standartlara uygun çekme numunesi hazırlanarak akma, çekme ve % uzama değerleri elde edilmiştir.

Uygulanan ısıl işlemlerin (NI ve MI) mekanik özelliklere etkisi ve kırık yüzeylerin mikro yapısal olarak karakterizasyonu incelenmiştir. Son olarak, bükme işlemi neticesinde, elde edilen geri ve ileri esneme değerleri kullanılarak matematiksel modeller oluşturulmuştur. Elde edilen analiz sonuçlarında, ileri ve geri esneme miktarlarında, kullanılan bükme parametrelerinin etkisi yapılan sayısal analizler neticesinde belirlenmeye çalışılmıştır.

8.1. Bükmede Geri ve İleri Esnemenin Değerlendirilmesi

8.1.1. 30°' lik bükme deneyleri

Farklı kalınlıklardaki ısıl işlemsiz (II), normalize (NI) ve menevişleme işlemi (MI) uygulanmış sac malzemeler 150° bükme açısına sahip zımba ile bükülmesi neticesinde elde edilen deney sonuçları EK-8' de verilmiştir. 30° bükme açısı için geri ve ileri esneme sonuçlarının aritmetik ortalaması ile zımbanın 30 s bekletilmesinin direk bükme işlemlerine göre esneme değerlerindeki % azalma değerleri Şekil 8.1' de gösterilmektedir.



Şekil 8.1. Farklı kalınlıktaki sac malzemelerin 30° bükme işlemi neticesinde elde edilen geri ve ileri esneme miktarı

Farklı kalınlıktaki 16Mo3 sac malzemenin II, NI ve MI olarak, 30° bükülmesi esnasında, zımbanın sac malzeme üzerinde bekletilmeden kaldırıldığı ve 30 saniye (30 s) bekletildiği deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bükme işlemi sonucunda, sac malzeme deformasyon bölgesinde uygulanan deformasyona bağlı olarak basma ve çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Malzemenin iç deformasyon bölgesinde basma gerilmeleri, dış deformasyon bölgesinde ise, çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Basma gerilmeleri iç kısımda kısalmaya, çekme gerilmeleri ise dış deformasyon bölgesinde, uzamaya neden olmaktadır. Bu gerilme değerleri nötr eksende eşitlenmektedir [129]. Basma gerilmeleri çekme gerilmelerinden büyük olduğunda sac malzemelerde geri esneme, çekme gerilmeleri basma gerilmelerinden büyük olduğunda ise, ileri esneme meydana gelmektedir [42-45, 49, 130]. Geri esneme bükme açısının küçülmesi, ileri esneme ise, bükme açısının büyümesi olarak ifade edilmektedir (Şekil 8.2). 30° bükme işlemi sonrasında elde edilen deney sonuçları incelendiğinde, malzeme özelliklerine bağlı olarak, II ve NI uygulanmış numunelerde ileri esneme, MI numunelerde ise, geri esneme davranışı tespit edilmiştir (Şekil 8.1).



Şekil 8.2. Bükmede geri ve ileri esneme prensibi [42]

Bükme işlemi esnasında plastik deformasyona maruz kalan farklı kalınlıklardaki (3, 4, 5 ve 6 mm) II, NI ve MI uygulanmış sac malzemelerin deformasyon bölgesinden tel erezyon tezgahı kullanılarak kesilen parçaların (Bkz. Şekil 7.5.b) optik ve elektron mikroskop görüntüsü neticesinde elde edilen mikro yapı görüntülerinin sac malzeme kalınlığına göre değişmediği yapılan mikro yapı incelemeleri sonrasında tespit edilmiştir. Bu nedenle, yalnızca 3 mm kalınlığa sahip II, NI ve MI sac malzemelerin deformasyon bölgelerinin mikro yapısı Resim 8.1' de, 30° bükme işlemi sonucunda deformasyon bölgelerinin elektron mikroskop görüntüleri ise Resim 8.2' de gösterilmektedir. Diğer kalınlıkların mikro yapı görüntüleri EK-4' te topluca verilmektedir.



Resim 8.1. 3 mm kalınlığındaki II, NI ve MI sac malzemenin deformasyon alanlarının mikro yapı görüntüleri; a) II, b) NI, c) MI

Deneysel çalışmada kullanılan II çelik malzemenin orijinal yapısında ferrit fazı ve perlit yapısı gözlenmiştir (Resim 8.1.a). NI ve MI grubu olmak üzere uygulanan iki farklı ısıl işlem sonucunda her bir gruba ait farklı mikro yapı morfolojisi elde edilmiştir (Resim 8.1.b, 1.c). II ve NI malzemelerde ferrit fazı ve perlit yapısı elde edilmiştir. Ferrit fazı, HMK yapılı demir içerisinde çok az orandaki karbonun çözünmesiyle oluşan bir arayer katı çözeltisidir. Az miktarda C içerdiği için sertliği ve mukavemeti düşüktür fakat sünekliliği ve işlenebilirliği yüksektir [131]. Perlit yapısı ise, ötektoid bileşime sahip çeliğin östenit bölgesinden yavaş soğutulmasıyla 723°C sıcaklıkta meydana gelen ötektoid dönüşüm sonucu elde edilir. Perlit; ferrit ana matrisi üzerine sementit (Fe₃C) lamellerinin dizilmesiyle oluşan mikro yapıdır. NI malzemelerde ferrit fazı (α) ve perlit yapının (α +Fe₃C) oluştuğu ve ferrit matris içerisinde uniform olarak dağılım gösterdiği tespit edilmiştir (Resim 8.1.b). Su verme işlemi sonrasında, hızlı soğumada C atomları, yayınma (difüzyon) için zaman bulamaz ve ferrit içerisinde hapis olur. Yayınamayan C atomları hacim merkezli kübik yapıyı gererek hacim merkezli tetragonal (HMT) yapıya dönüşmesine sebep olmaktadır [131]. Bu yapıya martenzit adı verilir. Çok serttir ve iğnemsi bir görünüşe sahiptir. Kırılganlığı azaltmak amacıyla menevişleme işlemi uygulanmaktadır. Deneyler neticesinde, uygulanan MI neticesinde, gelişi güzel ve iğnemsi martenzit yapısı ortaya çıkmıştır (Resim 8.1.c).

Plastik deformasyona uğrayan malzemenin elastik şekil değişimi sırasında absorbe ettiği enerjiyi, şekil değişimine neden olan kuvvet kalktığında geri vermesi özelliğine rezilyans denilmektedir [132]. Akma dayanımı geçen malzeme plastik olarak deformasyona uğrarken uygulanan kuvvete bağlı enerji dönüşümleri, ısı ve plastik deformasyona harcanan enerji olarak açığa çıkar. Bu sırada; rezilyansında bir miktar kayba uğradığı bilinmektedir. Bu durum yay malzemelerde açıkça görülmektedir. Buna paralel olarak, sac malzeme üzerine uygulanan bükme işleminden sonra ileri ve geri esneme meydana gelmektedir. Resim 8.1 incelendiğinde, sac malzeme üzerine uygulanan deformasyondan dolayı özellikle II ve NI malzemelerde plastik deformasyondan dolayı tane yönlenmesi meydana gelmektedir. II malzemelerde homojen bir yapı olmamasından dolayı deformasyon sonucunda oluşacak bantlaşmayı engellemektedir. Geleneksel olarak yapılan ısıl işlemlerden NI malzemelerin tane yapısında homojen bir dağılım meydana gelmesinden dolayı ferrit fazı ve perlit yapısı deformasyona bağlı bantlaşmayı meydana getirmiştir [133]. Yönlenen taneler özellikle, NI malzemelerde yoğun bir şekilde deformasyon bantlarını oluşturduğu Resim 8.2' deki SEM görüntüleri ile gösterilmektedir.

Şekillendirme işlemine bağlı olarak sac malzemelerde perlit yapısı deformasyon bantlarına ve bükme açısına bağlı olarak tane yönlenmelerine neden olmaktadır. Resim 8.2.a, 2.b' de özellikle tane yönlenmeleri görülmektedir. Menevişlenme işlemi uygulanan malzemelerde deformasyon bantları ve tane yönlenmeleri fark edilememektedir (Resim 8.2.c).



Resim 8.2. Sac malzemelerin SEM görüntüsü; a) II, b) NI, c) MI

Yapısal olarak menevişlenmiş malzemenin oluşturmuş olduğu tane yapısı gelişi güzel, iğnemsi bir yapı olduğu için oluşturulacak deformasyon etkileri bu iğnemsi yapının giriftliğinden dolayı, her ne kadar deformasyon etkin olsada yönlenme sağlayacak kadar bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca oluşan martenzitik yapının sertliği de dikkate alındığında bu etkinin II ve NI malzemelerde meydana gelen ileri esnemenin aksine, geri esneme olayında meydana getirdiği değişiklikle açıklanabilir.

MI uygulanmış, 16Mo3 numunelerin içerisinde bulunan C, Cr, Si, Mn, Mo ve V gibi alaşım elementleri su verme ve menevişlenme işlemlerinden dolayı yay çeliği özelliğine sahip olmaktadırlar [134]. Bu çeliklerin yaylanma yeteneği, esnek şekil değiştirme özelliğine dayanmaktadır. Menevişleme sonucunda malzeme içyapısında enerji birikir. Bu enerji zımbanın etkisi altında büyük miktarlarda deformasyon gösterir ve bu deformasyon esnasında enerjiyi biriktiren numune eski halini almak için depoladığı enerjiyi geriye doğru açılmak için kullanmaktadır. Sac malzeme üzerine uygulanan plastik deformasyon sonrasında, malzemenin bükme bölgesinde biriktirmiş olduğu enerji, sac malzemeyi geriye doğru açılmak için kullanmaktadır. Bu nedenle, gerilmelerden dolayı malzeme geriye doğru esneme davranışı göstermektedir.

MI neticesinde uygulanan kuvvete bağlı olarak deformasyon bölgesinde meydana gelen rezilyans enerjisi (elastik deformasyon için harcanan enerji), MI malzemelerde geriye doğru esneme davranışı, II ve NI malzemelerde meydana gelen rezilyans enerjisi ise, ileriye doğru esneme davranışı meydana getirmiştir. Bu nedenle, MI malzemede ki rezilyans enerjisi, II ve NI malzemede biriken enerjiden büyük olduğu düşünülmektedir.

II ve NI numunelerde, sac malzeme kalınlığı arttıkça ileri esneme değeri artarken, MI' de ise, geri esneme miktarı azalmaktadır. Deney sonuçlarında, V dip bükme yönteminde, II ve NI numunelerin bükülmesi sonucunda, numune kalınlığı arttıkça ileri esneme değerinin arttığı görülmektedir. Bu durum 45°' lik bükme işlemlerinde 3, 4, 5 ve 6 mm kalınlıklarda ileri esneme miktarının eşitleneceği düşünülmektedir. Elde edilen sonuç literatüre paralellik göstermektedir [41, 130].

Sac metal malzemelerde, iç makro gerilmelerin meydana gelme nedeni, eşit veya homojen olmayan plastik deformasyon veya cismin özgül hacminin çeşitli noktalarında farklı değişimlere maruz kalmasıdır. Metal şeridi gerçekte yekpare cisim olduğuna göre, metalin cesitli tabakaları birbirinden ayrı ayrı farklı boyutlarda deforme olamaz. Bundan dolayı, daha fazla deforme olma çabasında bulunan merkez tabakalar kenar tabakalar tarafından engellenerek, normalde gerekli boyuta kadar ulaşamaz. Diğer bir deyişle, merkez tabakalarda basma yönünde iç gerilmeler meydana gelir. Kenar tabakalar ise tersine, merkez tabakalar etkisinden, deformasyon oranına uygun olan uzamadan daha büyük uzamaya maruz kalır. Bundan dolayı kenar tabakalarda çekme yönünde iç gerilmeler meydana gelir. Şerit içerisinde farklı işaretli gerilmeler karşılıklı olarak dengeleşir ve haddeleme sonunda metalde muhafaza edilir [109]. Özgül hacim; ısıl büzülmede ve genleşmede eriyiğin katılaşmasında, katı halde gerçekleşen faz dönüşümlerinde ve yüzey tabakalarının kimyasal bileşiminin değişiminde değişir. Eğer ısıl büzülme ve genleşme, eriyiğin katılaşması ve katı halinde gerçekleşen faz dönüşümleri aynı zamanda ve aynı derecede cisim tüm hacminde gerçekleşmiş olsaydı, iç gerilmeler meydana gelmezdi. Ancak, ısıtmada ve soğutmada cismin kesit yüzeyi boyunca daima sıcaklık farkı mevcut olur ve dolayısıyla metalin farklı noktalarında, özgül hacimde değişimler aynı tarzda gerçekleşmez. Bu nedenle, metalin farklı noktalarında iç gerilmeler oluşur. İsi ve faz iç gerilmeler fark edilir. Isıl iç gerilmeler ısı büzülme veya genleşmeden sonra, faz iç gerilmeleri ise, malzemenin iç bölgelerinde sıcaklık farkına bağlı olarak katı halde

gerçekleşen faz dönüşümleri sonucunda meydana gelir. MI uygulanmış numunelerde sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarı da azalmaktadır. Bu durum, sac malzeme kalınlığının artması ile malzeme içyapısında meydana gelen gerilme değerlerinin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [30, 135, 136].

Farklı ısıl işlemlerin uygulandığı 16Mo3 sac malzemenin zımba uç radyüsü R4,5 mm ile 30° bükülmesi neticesinde elde edilen polinom eğri denklemleri Şekil 8.3' de verilmektedir.



Şekil 8.3. Geri ve ileri esneme miktarları ve elde edilen polinom eğri denklemi a) II, b) II-30 s, c) NI, d) NI-30 s, e) MI, f) MI-30 s

Şekil 8.3 incelendiğinde, deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler ile elde edilen polinom eğri denklemlerinin bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Şekil 8.3' de elde edilen polinom eğri denklemlerinde R² değerlerinin 1' e yaklaşması neticesinde deneysel veriler ve polinom eğri denklemleri arasındaki ilişkinin anlamlı olduğu sonucuna varılmaktadır [137].

Bükme işlemi neticesinde, II ve NI malzemelerde ileri esneme meydana geldiği Şekil 8.3.a ve Şekil 8.3.d arasındaki grafiklerde gösterilmektedir. MI numuneler de ise, malzeme özelliklerine (1s11 işleme) bağlı olarak geri esneme davranışı sergilemektedir (Şekil 8.3.e, 3.f). Şekil incelendiğinde, ileri esneme davranışının en az olduğu bükme yönteminin 3 mm kalınlığa sahip sac malzemenin II-30 s bekletilerek bükülmesi sonucunda 0,15° olarak elde edilirken, en fazla olduğu bükme yönteminin ise 6 mm kalınlıktaki malzemenin NI şekillendirilmesi esnasında 1,86° olarak belirlenmiştir. MI uygulanmış numunelerde ise, geri esneme değerinin en fazla olduğu bükme kalınlığının 3 mm sac malzemeye MI uygulanarak bükülmesi neticesinde 3,86° olarak elde edilirken, en düşük geri esneme değeri ise 6 mm sac malzemenin MI-30 s bekletilmesi sonucu 0,74° olarak elde edilmiştir.

II, NI ve MI numunelerde, zımbanın sac malzeme üzerinde 30 s bekleme süresi ileri ve geri esneme miktarlarını azaltmaktadır. Zımbanın sac malzeme deformasyon bölgesinde bekleme süresi, malzemede alternatif kayma düzlemlerini harekete geçirmekte ve bükme işleminin gerçekleştiği iç ve dış deformasyon bölgesinde sırasıyla, meydana gelen basma ve çekme gerilmeleri arasındaki farkı azaltmasından dolayı yapı daha dengeli bir hal almaktadır. Yapılan tüm basmalı kuvvet uygulamalarında uygulanan kuvvetin bekletilme süresine bağlı olarak geri basınç miktarının azaldığı rapor edilmiştir [1-5, 9, 10, 42-48].

Deneysel çalışmada elde edilen ileri ve geri esneme değerleri ve polinom eğri denklemleri kullanılarak ideal zımba açısı imalatı yapılarak ileri ve geri esneme davranışının önüne geçilerek en uygun bükme açısı elde edilmektedir. Bu sayede, deneme-yanılma yöntemiyle harcanan zaman ve malzeme israfi gibi etkenlerden tasarruf edilecektir.

İleri esneme miktarı, bükme işlemi neticesinde elde edilen açıdan, bükme açısı çıkarılarak elde edilir. Örneğin, 4 mm kalınlığındaki NI uygulanmış malzemenin 30° direk bükülmesi

neticesinde elde edilen ileri esneme miktarı 1,10° (Bkz. Şekil 8.1), zımba açısı olan 150°' ye eklenerek ideal bükme açısı elde edilir. Buradan, erkek zımbaya verilmesi gereken açı;

Erkek zımbaya verilmesi gereken açı = Zımba açısı+ileri esneme miktarı $\alpha = 150^{\circ}+1,10^{\circ}=151,10^{\circ}$ olarak elde edilir.

Geri esneme miktarının hesaplanması ise, bükme açısından elde edilen açı çıkarılarak tespit edilir. Örneğin, 3 mm kalınlığa sahip MI malzemenin 150° direk bükülmesi sonrasında elde edilen geri esneme miktarı 3,58° (Bkz. Şekil 8.1), zımba açısı 150°' den çıkarılarak uygun bükme açısı elde edilir. Buradan, erkek zımbaya verilmesi gereken açı;

Erkek zımbaya verilmesi gereken açı = Zımba açısı-Geri esneme miktarı $\alpha = 150^{\circ}-3,58^{\circ}=146,42^{\circ}$ olarak bulunmaktadır.

Dolayısıyla, V dip bükme uygulamalarında ideal bükme açısı elde etmek için; zımba açısına ileri ve geri esneme miktarları kadar açı üzerine ilave edilmesiyle veya çıkarılmasıyla istenilen açıda bükme işlemi gerçekleştirilmektedir. Tasarımcı bulduğu değere göre uygun kalıp tasarımını gerçekleştirecektir.

8.1.2. 60°' lik bükme deneyleri

3, 4, 5 ve 6 mm kalınlıklara sahip ısıl işlemsiz (II), normalize (NI) ve menevişleme işlemi (MI) uygulanmış 16Mo3 (1.5415) sac malzemenin 60° bükülmesi neticesinde elde edilen geri ve ileri esneme deney sonuçları EK-8' de, aritmetik ortalaması ise, Şekil 8.4' te verilmektedir. Zımbanın sac malzeme deformasyon alanlarında 30 s bekletilmesinin direk bükme işlemlerine göre geri ve ileri esneme değerlerinde meydana getirdiği yüzde (%) değişim Şekil 8.4' te gösterilmektedir.

Şekil 8.4 incelendiğinde, II ve NI uygulanmış numunelerde malzeme özelliklerine ve ısıl işleme bağlı olarak ileri esneme meydana geldiği görülmektedir. V dip bükme uygulamalarında, deformasyondan dolayı, zımba ve kalıp arasında sıkışan sac malzemede çekme ve basma gerilmeleri meydana gelmektedir. Genelde çekme yönündeki gerinim basma yönündeki gerinimden daha büyüktür. Bu nedenle, malzeme içyapısında oluşan

atom hareketlerinin dış kısımda yoğunlaştığı düşünülmektedir. Bu nedenle sac malzeme bükme işlemi sonrasında içeriye doğru kapanma eğilimi göstererek ileriye doğru esneme davranışı meydana gelmiştir. MI uygulanmış numunelerde ise, basma gerinimleri çekme gerinimlerinden büyük olmasının nedeni ise, malzeme yapısındaki martenzitik oluşumun etkisi olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle atom hareketlerinin iç kısımda yoğunlaşmasından dolayı, sac malzeme geriye doğru esneme davranışı sergilemiştir.



Şekil 8.4. Farklı kalınlıktaki II, NI ve MI uygulanmış sac malzemelerin 60° bükme işleminde elde edilen geri ve ileri esneme miktarı

Sac metal bükme işlemlerinde, geri ve ileri esneme değerini etkileyen en önemli parametrelerden birisi de malzeme kalınlığıdır. Zımba uç radyüsünün sac malzeme kalınlığa oranının (R/S) artmasıyla geri ve ileri esneme davranışının da artış gösterdiği gözlenmektedir Malzeme kalınlığı arttıkça deformasyon bölgesinde birim hacme düşen gerilme miktarının da azaldığı düşünülmektedir. Şekil 8.4 incelendiğinde; II, NI ve MI numunelerde de sac malzeme kalınlığının artmasıyla geri ve ileri esneme değerleri azalmakta olup benzer çalışmalarda aynı durum rapor edilmiştir [6, 38, 42-45].

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 esneme açılarının oluşmasına neden olmaktadır. Zımba sac malzeme deformasyon bölgesinde bekletildiğinde (30 s), malzeme içyapısındaki kalıntı gerilmeler azalmaktadır. Bu nedenle, gerilmeleri azalan malzemede daha düşük bir yaylanma değeri meydana gelmektedir. Sac malzeme üzerinde zımba bekleme süresinin, ileri ve geri esneme değerlerini azalttığı Şekil 8.4' de görülmektedir.

60° bükme işlemi sonucunda; II, NI ve MI uygulanmış sac malzemelerden tel erezyon tezgahı kullanılarak orta deformasyon bölgelerinden parçalar kesilerek mikro yapısal karakterizasyonu incelenmiştir (Bkz. Şekil 7.5.b). Yapılan metalografi çalışmalarından sonra 3, 4, 5 ve 6 mm kalınlıklara sahip II, NI ve MI uygulanmış malzemelerin mikro yapı görüntüleri incelenmiştir. Mikro yapı incelemeleri neticesinde, bütün kalınlık değerlerinin mikro yapı görüntüleri benzer çıkmıştır. 3, 4 ve 5 mm kalınlığa sahip II, NI ve MI malzemelerin mikro yapı görüntüleri EK-5' te verilmiştir. Deformasyon bantlarının daha belirgin olarak görüldüğü 6 mm kalınlığa sahip II, NI ve MI sac malzemenin mikro yapı görüntüsü Resim 8.3' de gösterilmektedir.



Resim 8.3. 6 mm kalınlığındaki numunelerin 60° bükme işlemleri neticesinde elde edilen mikro yapı görüntüleri; a) II, b) NI, c) MI

Resim 8.3 incelendiğinde, 60° bükme işlemlerinde uygulanan deformasyondan dolayı tane yapısında deformasyon bantları ve tane yönlenmesinin belirgin olarak görüldüğü bükme yönteminin II bükme işlemleri sonrasında elde edildiği görülmektedir (Şekil 8.3.a). Uygulanan ısıl işlemler sonucunda, normalize numunelerin mikro yapısının homojen bir yapı kazanması nedeniyle deformasyon bantları ve tane yönlenmeleri dikkat çekmektedir (Şekil 8.3.b). Menevişleme işlemi neticesinde elde edilen martenzitik yapı gelişi güzel ve iğnemsi olması nedeniyle deformasyona karşı gösterdiği dirençten dolayı deformasyon

bantları ve tane yönlenmelerinin elde edilen mikro yapı görüntüleri üzerinde belirgin olmadığı görülmektedir (Şekil 8.3.c).

II numunelerin bükme deformasyon bölgelerinin mikro yapı incelemeleri sonucunda elde edilen elektron mikroskop görüntüsü, Resim 8.4' te EDS analiz sonuçları ise Resim 8.5' te gösterilmektedir.



Resim 8.4. II malzemenin SEM cihazında elde edilen görüntüsü

Resim 8.4' de II malzemenin 60° bükme işlemi neticesinde deformasyon bölgesinin SEM görüntüsü üzerinden yapılan EDS analizi verilmiştir. Resim 8.4' de verilen mikro yapı görüntüsü incelendiğinde, II malzemenin orta deformasyon bölgesinden 4 farklı noktadan alınan nokta analizinin yanı sıra, beşinci analiz olarak genel EDS analizi yapılmıştır. Resim 8.5' teki EDS analiz sonuçları ise, II malzemenin 1, 2, ve 3. nokta analizlerini göstermektedir. Resim 8.6' daki EDS analizi sonuçları ise 4. nokta ve genel EDS analizlerini tanımlamaktadır.



Resim 8.5. II malzemede elde edilen EDS analiz sonuçları-1; a) 1. nokta, b) 2. nokta, c) 3. nokta

Resim 8.5 incelendiğinde sac malzeme üzerine her hangi bir ısıl işlem yapılmamış malzemenin mikro yapısal karakterizasyonu görülmektedir. 16Mo3 sac malzemenin mikro yapısı ferrit fazı ve perlit yapısından oluşmaktadır. Resim 8.4 üzerinde gösterilen 1, 2 ve 4 nolu yapının perlitik olduğu görülmektedir. Perlit yapısı plastik deformasyondan dolayı tane yönlenmesi meydana getirmektedir. Perlit yapısının % ağırlıkça alaşım elementleri oranları 1, 2 ve 4. noktada verilmektedir. 3. nokta ise, ferriti oluşturmaktadır. Resim 8.6'

da II malzemenin mikro yapısında bulunan ferrit ve sementit fazlarının içerisinde bulunan alaşım elementlerinin (C, Si, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu ve Mo) EDS genel analiz sonuçlarını göstermektedir (Resim 8.6.e).



Resim 8.6. II malzemede elde edilen EDS analiz sonuçları-2; d) 4. nokta, e) EDS genel analizi

Yapılan EDS analizlerinde genel ve noktasal analizlerde tespit edilen C oranlarının net sonuçlar olmadığı bilinmektedir (Resim 8.6). EDS cihazlarında ölçümü gerçekleştirilen elementlerin 16 atom numarasından küçük olan malzemeler için net sonuçlar olarak değerlendirilemeyeceği bilinmektedir. Yapılan EDS analiz sonuçlarıda, bunu göstermektedir. Her ne kadar bazı bölgelerde noktasal analiz sonucunda, C değerlilikleri tespit edilse de genel analizde C tespit edilememesi bu durumu izah etmektedir.

16Mo3 sac malzeme üzerine uygulanan NI sonrasında numunenin orta deformasyon bölgesinden kesilen parçanın mikro yapı görüntüsü (Resim 8.7) ve EDS analiz sonuçları Resim 8.8' de verilmektedir. NI uygulanmış malzemelerde ferrit fazı ve ince perlit yapı oluşmaktadır. NI malzemenin mikro yapısı II malzemenin mikro yapısı ile karşılaştırıldığında (Bkz. Resim 8.4) perlit yapının (beyaz renk) ferrit fazları (siyah renk) etrafında yoğunlaştığı dikkat çekmektedir. Ferrit fazları etrafındaki tane sınırlarını perrit yapısı çevrelemektedir.



Resim 8.7. NI uygulanmış malzemenin SEM görüntüsü



Resim 8.8. NI malzemede elde edilen EDS analiz sonuçları; a) 1. nokta



Resim 8.8. (devam) NI malzemede elde edilen EDS analiz sonuçları; b) 2. Nokta, c) 3. nokta, d) EDS genel analizi

NI uygulanmış malzemelerin mikro yapısında bulunan faz ve yapıların içerdiği elementleri belirlemek ve mikro yapı dönüşümleri hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan EDS analizlerinde, 1 ve 3. nokta analizleri perlit yapısının kimyasal analizlerini göstermektedir (Resim 8.8.a-8.c). Yapılan 2. nokta analizi ise, ferrit fazının kimyasal bileşimi hakkında bilgi vermektedir (Resim 8.8.b). Resim 8.7' de verilen elektron mikroskop görüntüsünün genel EDS analiz sonuçları Resim 8.8.d' de verilmektedir.

16Mo3 sac malzemenin alaşım elementlerinden birisi olan molibden (Mo) kuvvetli bir karbür oluşturucu bir elementtir [139]. NI uygulanan malzeme Ac₃ sıcaklığının 30-50° üzerinde ısıtılarak östenit bölgesinden serbest havada (oda sıcaklığında) soğumaya bırakılmıştır. Bu nedenle, NI uygulanmış numunelerde alaşım elementlerinin perlit yapısı üzerinde dönüşümü gerçekleşmiştir. Yapılan II malzeme ile NI malzemelerin EDS analizleri karşılaştırıldığında, alaşım elementlerinde azalmalar ve artmalar meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 8.5). Uygulanan ısıl işlem literatürdeki benzer durumlarla karşılaştırıldığında ve EDS sonuçlarında elementel olarak Cr, Mo azalımları, C ile bileşik yaparakta oluşturabilecekleri karbür türevlerini düşündürmektedir.

| Elt. | Line | intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc | | (a) | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc | | (b) |
|----------------------------|----------------------|---------------------------------------|---|--|--------------------------------------|-------|----------------------------|----------------------------|---|---|---|--------------------------------------|-------------|
| C Si V | Ka Ka Ka | 0.00 0.38 0.62 0.85 | 0.000 0.391 0.499 0.584 | 0.000 0.576 0.867 1.189 | wt.% wt.% wt.% wt.% | | C Si V | Ka Ka Ka | 0.00 1.55 1.49 | 0.000 0.788 0.773 | 0.000 1.592 1.367 | wt.% wt.% wt.% | |
| Mn Fe Ni Cu Mo | Ka Ka Ka La | 1.45 32.41 1.32 1.07 1.12 | 0.761 3.599 0.727 0.654 0.668 | 3.005 80.015 4.991 5.067 4.290 | wt.% wt.% wt.% wt.% wt.% | | Mn Fe Ni Cu Mo | Ka Ka Ka Ka La | 1.30 1.35 49.38 2.10 1.06 0.69 | 0.735 4.443 0.916 0.651 0.523 | 1.355 1.890 83.162 5.410 3.439 1.785 | wt.% wt.% wt.% wt.% wt.% | |
| kV Take Elap | eoff An sed Liv | 18.0 gle 35.0 etime 10.0 | 0 | 100.000 | wt.% | Total | kV Take Elap | off An sed Liv | 18.0 agle 35.0 retime 10.0 | 0 | 100.000 | wt.% | Total |

Şekil 8.5. II ve NI malzemelerin genel EDS analizi; a) II, b) NI

16Mo3 krom-molibdenli (Cr-Mo) çelikler, ferritin çökelmesi ile katılaşmaya başlar. Bu aşamada alaşım atomları ferrit içerisinde çözünür, ancak karbonun çözünebilirliği oldukça düşüktür, bu durumda sıvı içerisinde bu atomların büyük bir segregasyonu vardır. Segregasyonun sonucu olarak peritektik reaksiyon ile östenit oluşur. Daha sonraki soğumada ferrit stabilize edici elementlerin segregasyonu oluşur ve ötektik reaksiyon primer karbürleri oluşturmaya başlar. Tercihli olarak östenit tane sınırlarında MC, M₂C ve M₆C karbürler oluşur. Ötektik reaksiyon karbon içeriği, soğuma hızı tarafından etkilenmektedir. Daha sonraki tavlama işlemlerinde yarı kararlı olan M₂C karbürü, M₆C ve MC karbürlerine ayrışır. M bir veya daha fazla metal atomunu göstermektedir [140]. 16Mo3 sac malzemenin içerisinde bulunan C, Mo, V ve Cr önemli derecede karbür yapıcı alaşımlardır. Isıl işlem neticesinde 16Mo3 malzemenin alaşım elementlerinden birisi olan molibden (mo) alaşımının M₆C=Fe₃Mo₃C, Fe₂Mo ve FeMo₃C karbürlerini meydana getirdiği düşünülmektedir. Resim 8.7 incelendiğinde, NI sonrasında perrit miktarında artma meydana geldiği görülmektedir. Perlit miktarının artması oluşan karbürlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. V alaşım elementi ise, V_4C_3 karbürleri oluşturduğu düşünülmektedir.

Menevişleme işlemi (MI) uygulanan sac malzemenin elde edilen elektron mikroskop görüntüsü Resim 8.9' de EDS analizi ise Resim 8.10' da verilmektedir.



Resim 8.9. MI malzemenin SEM cihazında elde edilen görüntüsü

| | Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc | | (a) |
|---|-----------|---------|--------------------|----------------|-----------|------|------------|
| je. | С | Ka | 0.00 | 0.000 | 0.000 w | vt.% | |
| | Si | Ka | 0.61 | 0.496 | 0.908 w | vt.% | |
| | v | Ka | 1.44 | 0.760 | 1.802 w | vt.% | |
| | Cr | Ka | 0.90 | 0.600 | 1.075 w | vt.% | |
| | Mn | Ka | 0.33 | 0.362 | 0.653 w | vt.% | |
| | Fe | Ka | 37.70 | 3.883 | 92.612 w | vt.% | |
| e | Ni | Ka | 0.57 | 0.477 | 2.145 w | vt.% | |
| | Cu | Ka | 0.00 | 0.000 | 0.000 W | vt.% | |
| Fe | Mo | La | 0.22 | 0.296 | 0.806 w | vt.% | |
| Mn | | | | | 100.000 w | vt.% | Total |
| MoVMnCu Si MoMo V Cr Cr Fe Ni Cu MouMn Si MoMo Mo V Cr Mn Mn Fe Ni Cu Cu MouFFeNi Ai Mo MouMouta annu A Y Leffin Mn Mu Ni CuNi a Gu | kV Tak | eoff An | 18.0 igle 35.0 | 0 | | | |
| S. 10. | Elap | sed Liv | retime 10.0 | | | | |
| B Ne Al S Ar Ca Ti Cr Fe Ni Zn Ga Ge | | | | | | | |

Resim 8.10. MI malzemede elde edilen EDS genel analiz sonuçları

Su verme işlemi sırasında oluşan martenzit yapı birçok uygulama için fazlasıyla sert ve gevrek olup darbe direnci ve şekil verilebilirliği düşüktür. Aynı zamanda hızlı soğuma sonucu parçada yüksek gerilimler meydana getirmektedir [141]. Bu nedenle, hem parçanın

gevrekliğini gidererek tok bir yapı kazandırmak hem de gerilimlerini azaltmak amacıyla menevişleme (temperleme) ısıl işlemi uygulanmıştır. Menevişleme sonrasında elde edilen mikro yapının gelişi güzel ve iğnemsi şeklinde olduğu belirlenmiştir. Sac malzemenin Ac₃ sıcaklığında; ısıtma, bekletme ve soğutma aşamalarında oluşabilecek karbürler düşündürmektedir.

Malzeme içyapısında bulunan karbon, kuvvetli bağ yapılı karbürleri oluşturmaktadır. Mo, özel karbür oluşturur, bu karbürler sıcakta mukavemeti uzun süre korurlar. Özellikle V, W ve Cr ile bileşim yaparak çeliğin kesme kabiliyetini arttırır [104]. Mikro yapıda yüksek miktarda M₆C tipi karbürleri (Fe₃Mo₃C, Fe₃W₃C ya da Fe₄W₂C) ve M₂C karbürü (W₂C ve Mo₂C) oluşturur. M₆C tipi karbür östenitleme esnasında yüksek sıcaklıkta çözünerek matrisin sertleşmesini sağlar. Menevişleme sırasında 16Mo3 çeliğin sertliği zayıf alaşımlandırılmış demir-karbürün ayrışması sonucu biraz azalır. Menevişleme sıcaklığının üzerinde Mo₂C ve W₂C karbürleri ayrışır ve sertliği önemli ölçüde arttırırlar. Çözünmemiş M₆C karbürleri ise, aşınma direncinin artmasına yardımcı olurlar. Vanadyum, kuvvetli karbür oluşturucu olarak MC tipi (V₄C₃) karbür oluşturur. Çok sert ve kimyasal kararlılığı yüksek olan bu karbür, östenitlemede çok az çözünür; çözünmeyen serbest karbür partikülleri abrasif aşınma direncini artırır. Krom ise hem karbür oluşturur, hem de katı eriyik sertleşmesi sağlamaktadır [104].

16Mo3 sac malzemenin zımba uç yarıçapı R4,5 mm ile 60° bükme işlemi sonucunda; II, NI ve MI uygulanmış sac malzemelerin bükülmesi sonucu elde edilen verilerin aritmetik ortalaması kullanılarak polinom eğri denklemleri türetilmiştir. Elde edilen polinom eğri denklemleri Şekil 8.6' da gösterilmektedir. Polinom eğri denklemleri incelendiğinde, II ve NI numunelerde sac kalınlığı arttıkça ileri esneme değerinin arttığı, MI numunelerde ise, kalınlık arttıkça geri esneme değerlerinin azaldığı görülmektedir.


Şekil 8.6. 60° Bükme işlemi neticesinde elde edilen polinom eğri denklemleri a) II, b) II-30 s, c) NI, d) NI-30 s, e) MI, f) MI-30 s

Şekil 8.6 incelendiğinde, bükme işlemleri esnasında en düşük ileri esneme miktarının elde edildiği bükme parametresinin II-30 s bekletilerek bükme işlemlerinde 0,88°; en büyük değerin ise 2,64° ile NI bükme işlemlerinde elde edilmiştir. Bükme işlemlerinde, MI uygulanmış numunelerde meydana gelen en büyük geri esneme değeri MI bükülmesi neticesinde 3,82°; en düşük geri esneme ise; 0,74° ile MI-30 s bekletilmesi neticesinde elde edilmiştir.

Bükme işlemleri esnasında, zımbanın sac malzeme bükme bölgesinde bekletilmesi geri ve ileri esneme değerlerini azaltmaktadır. II-30 s bekletilerek bükme işlemi II bükme

işlemlerine göre ileri esneme değerlerindeki azalma sac malzeme kalınlıklarına göre sırasıyla; 3 mm' de %6,93; 4 mm %8,16; 5 mm' de %7,06; 6 mm kalınlıkta ise %25,4 ileri esneme değerlerini azaltmıştır.

3, 4, 5 ve 6 mm kalınlıklardaki normalize numunelerin, NI-30 s bekletilerek bükme işleminin NI bükme yöntemine göre sırasıyla; %17,08; %0,46; %0,46; %1,42 ileri esneme değerlerini azaltmaktadır. Dikkat edildiğinde zımbanın bükme işlemi tamamlandıktan sonra direk kaldırıldığı ve 30 s bekletildiği uygulamalarda özellikle normalizasyon işlemlerinde çok fazla bir değişme olmadığı dikkat çekmektedir. Bu durunum nedeni; normalizasyon işlemi sonrasında sac malzemenin içyapısındaki gerginliklerin giderilmesinden dolayı nispeten homojen bir yapı meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

MI uygulanmış numunelerde, zımbanın sac malzeme üzerinde 30 s bekletilmesinin etkisi dikkat çekmektedir. MI-30 s bükme tekniği, MI bükme yöntemine göre geri esneme değerlerinde 3, 4, 5 ve 6 mm kalınlıklara göre, sırasıyla %21,72; %47,57; %50; %20,43 geri esneme değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Uygulanan MI sonrasında 16Mo3 sac malzeme yay özelliği kazanmasından dolayı gerginlikleri artmıştır. Zımba bekletildiğinde ise, gerilmeler azalmıştır. 3, 4, 5 ve 6 mm kalınlıklardaki MI numunelerin geri esneme değerleri artarken, 6 mm kalınlıktaki numunede azaldığı belirlenmiştir. Belirli bir kalınlık değerinden sonra geri esneme değerlerinin azalması, numune kalınlığına bağlı olarak, kalıntı gerilme değerlerinde meydana gelen azalmadan kaynaklandığı düşünülmektedir.

8.1.3. 90°' lik bükme deneyleri

3, 4, 5 ve 6 mm kalınlığındaki ısıl işlemsiz (II), normalize (NI) ve menevişlenmiş (MI) sac malzemelerin zımba uç radyüsü R4,5 mm olan 90° zımba ile bükülmesi sonrasında elde edilen geri ve ileri esneme değerleri EK-8' de aritmetik ortalaması ise, Şekil 8.7' de gösterilmektedir. Ayrıca, zımba bekleme süresinin direk bükme işlemlerine göre geri ve ileri esneme değerlerinde meydana gelen azalmalar yüzde (%) cinsinden Şekil 8.7' de verilmiştir.



Şekil 8.7. Farklı kalınlıktaki II, NI ve MI uygulanmış sac malzemelerin 90° bükme işlemi neticesinde elde edilen geri ve ileri esneme miktarı

Şekil 8.7 incelendiğinde II ve NI uygulanmış malzemelerde ileri esneme, MI uygulanmış numunelerde ise geri esneme meydana geldiği tespit edilmiştir. Artan sac malzeme kalınlıklarında ileri ve geri esneme değerlerinde azalma meydana geldiği Şekil 8.7' de gösterilmektedir. II bükme yönteminde malzemeye herhangi bir işlem uygulamadan elde edilen ileri esneme miktarlarını göstermektedir. Bükme zımbasının sac malzeme büküm bölgesinde bekletildiğinde ileri esneme miktarı da azalmaktadır. II malzemelere NI uygulandığında ise ileri esneme değerleri artmaktadır. Uygulanan MI sonrasında, sac malzemeler II ve NI uygulanmış numunelerin aksine geri esneme davranışı sergilemektedirler. II neticesinde elde edilen ileri esneme sac malzeme özellikleri ve bükme parametrelerine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Uygulanan NI sonucunda, sac malzemenin mikro yapısında tane boyutları azalmakta ve yapı ferrit ve ince perlitten oluşmaktadır. NI sonrasında sac malzemenin sertliğinin artmasında ndolayı bükme işlemi sonrasında sac malzemede ileri esneme değerinin artmasına sebep olmuştur. MI sonrasında gelmesi, sac malzemeye uygulanan su verme ve menevişleme işlemi sonucunda sac malzemenin içerisinde bulunan C, Mn, Mo, V gibi

alaşım elementleri sac malzemenin yay özelliği kazanmasına neden olmuştur. Yay çelikleri esnek şekil değiştirme özelliğine sahiptirler. Deformasyon esnasında bükme bölgelerinde biriken enerji zımbanın sac malzeme üzerinden kaldırılması sonucunda, malzeme tekrar eski halini almaya çalışmakta fakat plastik deformasyondan dolayı gerçekleşen kalıcı şekil değişikliği nedeniyle sac malzeme bir miktar geriye esneme davranışı göstermiştir.

Uygulanan deformasyona bağlı olarak, elastik ve plastik özellik sergileyen malzemenin şekillendirilmesi işleminde, belli düzeylerde kuvvet uygulayarak parçaya şeklini veren zımbanın geri dönüşü ile başlayan yük boşaltma (zımbanın kaldırılması) sürecinde, malzeme içyapısında biriken rezilyans enerjisi sonucu malzeme formunda meydana gelen sapmalar, genel itibariyle geri ve ileri esneme olarak adlandırılabilir [142]. Geri dönüşte gerilmelerin elastik anlamda yeniden dağılımı, meydana gelen geri ve ileri esnemeyi karakterize etmektedir. Parçaların kalıpta, şekillendirme kuvveti altındaki geometrisi ile geri ve ileri esneme sonrasında ortaya çıkan geometri karşılaştırıldığında, gözlenen sapmaların derecesi, meydana gelen geri ve ileri esnemenin düzeyini ortaya koymaktadır.

II, NI ve MI sac malzemelerin bükme işlemlerinde, plastik deformasyondan dolayı bükme bölgelerinde meydana gelen ferrit, perlit ve martenzit yapısı ile deformasyon bantlarına bağlı olarak meydana gelen tane yönlenmeleri, Resim 8.11' de gösterilmektedir. Deformasyon bölgesi açısından incelendiğinde, II ve NI malzemelerde deformasyon izleri fark edilebilir derecesinde görülürken, MI sonucu oluşan martenzit yapının düzensiz ve iğnemsi olmasından dolayı deformasyon bantları ve tane yönlenmelerinin fark edilemediği dikkat çekmektedir. Diğer kalınlıkların mikro yapı görüntüleri EK-4' te verilmektedir.



Resim 8.11. 5 mm kalınlığındaki sac malzemelerin 90° bükme işleminde elde edilen mikro yapı görüntüleri; a) II, b) NI, c) MI

Resim 8.11 incelendiğinde, deformasyon sonrası tane yapısındaki değişim ve yönlenme özellikle NI malzemelerde daha yoğun olarak gözlemlenmiştir. Mikro yapısal açıdan bir değerlendirme yapıldığında, deformasyona bağlı olarak özellikle dislokasyon yoğunluğundaki artış ve çelik malzemelerde ortaya çıkan tane yapısındaki değişim, kalıntı gerilmeler ve kılcal çatlak oluşumu gibi olumsuz etkilerin yer aldığı bilinmektedir [52]. Bu sebeple, Resim 8.11' deki menevişleme ve normalize ısıl işlemi sonrasındaki numunelerin mikro yapı görüntüleri incelendiğinde, ortaya çıkan bu olumsuz etkilerin minimize edildiği belirtilebilir. 16Mo3 sac malzemesinin ısıl işlemsiz mikro yapısındaki düzensiz ve kaba taneli ferrit fazı ve perlit yapısından ziyade normalize ısıl işlemi ile birlikte ince taneli yapısının yer aldığı tespit edilmiştir. Menevişlenmiş numune mikro yapı görüntüleri incelendiğinde ise, mikro yapısal homojenliğinde getirmiş olduğu ve bunun sonucu olarak deformasyon etkisinin eşit dağılımından bahsedilebilir. Dolayısıyla diğer numunelerden farklı olarak menevişlenmiş numunelerdeki mikro yapısal farklılık, geri esneme miktarı açısından da önemli olduğu belirlenmiştir.

Resim 8.11 incelendiğinde, II ve NI numunelerde ferrit ve perlitten oluşan bir yapı görülürken, MI numunelerde ise, su verme işlemi neticesinde malzeme mikro yapısı kaba, iğnemsi martenzite dönüşmektedir. Malzemeye uygulanan su verme işleminden sonra oluşan martenzitik yapı çok sert, kırılgan olup içinde büyük, kalıcı gerilmeler meydana gelmektedir. Oluşan bu kalıcı gerilmeleri gidermek ve yapıyı daha tok ve sünek bir duruma getirmek amacıyla malzemelere MI uygulanmıştır.

Uygulanan ısıl işlemler sonrasında, sac malzemelerin çekme mukavemet değeri arttıkça malzemelerin önemli bir şekil verilebilirlik kriteri olan % uzama değeri hızla düşmektedir. Farklı kalınlıktaki II, NI ve MI sac malzemeler üzerine uygulanan çekme deneyleri neticesinde elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması Çizelge 8.1' de sertlik değerleri ise Çizelge 8.2' de gösterilmektedir. Orijinal çekme grafikleri EK-7' de verilmiştir.

| Malzeme | Akma Mukavemeti (Mpa) | Çekme Mukavemeti (Mpa) | Akma /Çekme | % Uzama |
|---------|-----------------------------|------------------------------|-------------|---------|
| II | 298,75 | 504,75 | 0,59 | 37,13 |
| NI | 333,75 | 524,38 | 0,64 | 34,75 |
| MI | 262,50 | 822,50 | 0,32 | 24,25 |

Çizelge 8.1. II, NI ve MI malzemelerin çekme deney sonuçları

Çizelge 8.2. Sac malzemelerin HV sertlik değerlerinin aritmetik ortalaması

| Bölge | Isıl işlemsiz (II) | Normalize (NI) | Menevişleme (MI) |
|-------|--------------------|----------------|------------------|
| DFOB | 218 | 229 | 389 |
| DFB | 235 | 295 | 465 |

Çizelge 8.1 incelendiğinde, II malzemeler üzerine uygulanan NI ve MI sonrasında akma, çekme ve % uzama değerlerindeki değişimler görülmektedir. II malzemeye uygulanan NI neticesinde tane boyutunda küçülmeler nedeniyle çekme mukavemetlerinde II malzemeye göre %3,81 artma, % uzama değerlerinde ise %6,4 azalma meydana gelmiştir. NI işlemi sonrasında sac malzemenin darbe dayanımı artmakta, fakat süneklik değeri azalmaktadır.

Cr-Mo çelikler, krom, nikel, molibden, mangan ve diğer elementlerle alaşımlandırılmıştır. Östenit durumda 850°C sıcaklıklarda Cr-Mo çelikler mukavemet arttırmak amacıyla pekleştirilir. Bu durumda dislokasyonlarda karbürler çökelir, östenit karbona göre fakirleşir ve M_d noktası oda sıcaklığı üzerine kadar ulaşır. Böylece çelik yüksek mukavemet (deformasyon sertleşmesi ve östenitin deformasyon yaşlanması sayesinde) ve önemli derecede yüksek plastikliğe sahiptir. Oda sıcaklığında numune çekmeye tabi tutulduğunda, numunenin belli bir bölgesinde lokal deformasyon oluşur. Bu bölgede sağlamlaştırıcı martenzit meydana gelir ve deformasyon numunenin komşu bölgelerine geçer. Böylelikle, plastik deformasyon etkisinden martenzitin meydana gelmesi deformasyonun lokalleşmesini (boyun meydana gelmesini) önler. Bu durum, büyük çekme uzamayı sağlamaktadır [109]. Uygulanan MI yönteminde ise, malzemelerin akma dayanımı azalırken, çekme dayanımlarındaki artış dikkat çekmektedir. MI malzemelerin akma dayanımları, II ve NI malzemeler ile kıyaslandığında sırasıyla; %12 ve %21,3 değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Çekme dayanımlarındaki artış miktarı; II ve NI malzemeler ile karşılaştırıldığında %38,6 ve %36,24 mukavemetinde artış meydana gelmiştir. MI uygulanan malzemelerin mikro yapısı su vermeden dolayı martenzitik bir yapı kazanmıştır. Martenzitik yapı, hem malzemenin yüksek mukavemet özelliğinin hem de yüksek deformasyon sertleşebilirliğinin ana kaynağıdır. Martenzit oranı arttıkça sacın mukavemeti artarken şekil verilebilirlik özelliği düşmektedir [143]. Buna paralel olarak, MI uygulanmış malzemelerin mukavemet değerleri artarken, % uzama şekil verilebilirliği azalmıştır. Bükme işleminde deformasyon olmayan bölgeler (DFOB) ve bükme işlemi esnasında zımba ucunun temas etmesinden dolayı plastik deformasyona maruz kalan bölgelerin (DFB) Hv (0,1) sertlik değerlerinin aritmetik ortalaması (Bkz. Çizelge 8.2) verilmektedir. II malzemeye uygulanan NI ve MI sonrasında sertlik değerleri artmıştır (Bkz. Çizelge 8.2). Sertlik değerlerindeki bu artış dislokasyonlar ile katı ergiyik içerisinde serbest halde bulunan karbon ve azot gibi arayer atomlarının etkileşim içerisinde olduğunu veya ikinci faz partiküllerinin etkisinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Bu atom kümeleri ve

ikinci faz partikülleri dislokasyonların hareketini engelleyerek sertliğin artmasına neden olmuştur. Deformasyon neticesinde, malzemenin taneleri uzar ve belirli kristalografik doğrultuda yönlenirler. Tanelerde dislokasyon yoğunluğunun artmasının yanında birçok atom boşluğu da meydana gelir, aynı zamanda malzemenin yoğunluğunda bir miktar azalma meydana gelir. Deformasyon oranı arttıkça malzemenin kafes ve tane yapılarında meydana gelen çarpılma oranı ve dislokasyon yoğunluğu da artar. Gerek çarpılma oranı, gerekse dislokasyon yoğunluğunun artması dislokasyon hareketini zorlaştırmaktadır. Dislokasyon hareketinin zorlaşması malzemelerin sertlik ve mukavemetinin artmasına neden olmaktadır. Plastik deformasyon sonucunda, malzemelerin sertlik ve mukavemetinin artması deformasyon pekleşmesine neden olmaktadır [144, 145]. Bu nedenle, DFB' de sertlik değerleri de artış göstermiştir.

Çekme testleri sonucunda, sac malzemelerin (II, NI ve MI) kırık yüzeyleri SEM cihazı kullanılarak kopma yüzey morfolojisi incelenmiştir. II, NI ve MI malzemelerin kırık yüzey morfolojisi sırasıyla; Resim 8.12, Resim 8.13 ve Resim 8.14' de gösterilmektedir.



Resim 8.12. II numunelerin çekme testi sonrasında kopma yüzeyleri





Resim 8.13. NI numunelerin çekme testi sonrasında kopma yüzeyleri



Resim 8.14. MI numunelerin çekme testi sonrasında kopma yüzeyleri

Resim 8.12' de ferrit ve perlit yapısına sahip II malzemenin kırık yüzey resimlerini göstermektedir. Resim 8.13' de NI uygulanmış malzemelerin ferrit ve ince perlit mikro yapısına sahip sac malzemenin, Resim 8.14' de ise, martenzit morfolojisine sahip sac malzemenin kırık yüzey morfolojisinin SEM cihazında elde edilen resimleri gösterilmektedir.

Çekme deney numunelerinin kırılma mekanizmaları elektron mikroskop ile incelenmiştir. Kırılan yüzeyler genelde çanak ve koni kırılma modu sergilemişlerdir. Çanak ve koni kırılma ile birlikte mikro boşlukların oluşumu sünek kopma karakteri için tipik göstergelerdendir. Çekme deneyi sırasında mikro plastik bölgelerde, partiküller arası yakın yerlerde gözenek görüldüğünde gerilmeler düşebilir. Plastik bölgelerdeki matris dağıldıkça ve gözenek hacmi büyümesiyle beraber yük dayanım bölgesini azaltıcı etkiye sahip olabilir. Ayrıca düzensiz gözeneğe ve matrisin şekil değiştirilebilirliğine, gözenek kenarlarında mikro çatlakların oluşmasına ve çekme testi sırasında daha kolay çatlakların oluşmasına bağlıdır [146, 147]. II numunelerin mikro yapıları ferrit+perlit yapıya sahip olduklarından akma ve çekme değerleri düşüktür ve NI ve MI uygulanmış numunelerden yüksek süneklik değerlerine sahiptirler. II ve NI numunelerinde ferrit yumuşak matrisinden dolayı çukurcuk tipi kırılmalar gözlenmiştir. II ve NI uygulanmış numunelerin kırık yüzeylerinde kısmen düzgün yüzey ayrılma tipi (klivaj) kopma ile birlikte sünek çukurcuklar (dimples) gözlenmiştir. Resim 8.12 ve Resim 8.13' de klivaj kopmayı karakterize eden ferrit tanesi büyüklüğünde düz, klivaj yüzeyler görülmektedir. II ve NI uygulanmış numunelerin kırık yüzeylerinde ise tipik sünek kırılma gözlenmiştir; mikro boşluklar birleşmiş haldedir ve klivaj kırılma meydana gelmiştir. II ve NI numunelerde, son kopma anında ferrit içerisinde klivaj kırılma için gerekli olan kritik gerilme değerinin aşıldığı görülmektedir. Resim 8.12 ve Resim 8.13' den anlaşıldığı gibi, II ve NI numunelerde ferrit ve perlit yapıdan dolayı sünek kırılma ile arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır. Kırık yüzeyler incelendiğinde, NI malzemelerin kırılma yüzeylerinde, II malzemelere göre daha çok derin boşluklar görülmektedir. Bu derin boşlukların varlığı inklüzyonların kırılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [148]. Sac malzeme üzerine uygulanan MI neticesinde; sac malzemenin çekme gerilme değerinde büyük bir artış meydana geldiği görülürken, % uzama değerinde de azalma meydana gelmiştir (Bkz. Cizelge 8.1). Su verme neticesinde sac malzemede martenzit fazi meydana gelmiştir. Martenzit sert ve gevrek bir faz olması nedeniyle, MI uygulanarak sac malzemenin sertlik

artışı ve sünekliğinde bir miktar azalma meydana gelmiştir. Resim 8.14 incelendiğinde, gevrek bir kırılma meydana geldiği görülmüştür. Kırık yüzeyler üzerinde derin çukurlar ve inklüzyonlar oluştuğu Resim 8.14' te görülmektedir. Mikro boşluklar martenzit ve inklüzyonlar üzerinde cekirdeklenmektedir. Streinbrunner ve arkadaşları, mikro boşlukların öncelikle martenzit üzerinde çekirdeklendiğini inklüzyonlar üzerinde çekirdeklenmenin ise ikincil bir olay olduğunu bildirmişlerdir [149]. Mikro boşlukların martenzit üzerinde çekirdeklenmesinin nedeni, bitişik martenzit parçacıklarının ayrışması ve martenzit parçacıklarının bölgesel deformasyonu veya ferrit-martenzit ara yüzeyinin ayrışmasına atfedilmektedir [149]. Kırılma yüzeyine yakın bölgelerde mikro boşluk yoğunluğu artmaktadır. Mikro boşluk yoğunluğunun kırılma yüzeyine yaklaştıkça artması bu bölgedeki gerinimin yüksek olması ile açıklanmaktadır [150, 151]. Uygulanan MI neticesinde sac malzemenin çekme gerilme değerleri artmaktadır. MI uygulanan malzemelerde, yarılma tipi kırıkların arttığı ve çukurcuk tipi kırıkların azaldığı gözlenmiştir. Buna sebep olarak, martenzit sert yapısının artması ve ferrit sünek fazının azalması gösterilmektedir. Çünkü martenzit yapısı üzerinde yarılma tipi kırıklar, ferrit fazı üzerinde çukurcuk tipi kırılma meydana gelmektedir.

Farklı kalınlıktaki sac malzemeler (II, NI ve MI) üzerine uygulanan bükme işlemi sonrasında orta deformasyon bölgesinden tel erezyon tezgahı kullanılarak parça kesilmiştir (Bkz. Şekil 7.5.b). Çıkartılan parçalar üzerinde metalografik işlemler yapıldıktan sonra elektron mikroskop kullanılarak mikro yapı resimleri incelenmiştir. 3, 4, 5 ve 6 mm kalınlıktaki II, NI ve MI malzemelerde benzer mikro yapı resimleri elde edilmiştir. Bu nedenle, 4 mm kalınlıktaki II, NI ve MI malzemelerin mikro yapısı ve EDS analizleri incelenmiştir. II malzemenin bükülmesi neticesinde elde edilen orta deformasyon bölgesinin mikro yapı görüntüsü Resim 8.15' de EDS sonuçları ise, Resim 8.16' da gösterilmektedir.



Resim 8.15. II malzemenin 90° bükülmesi ile elde edilen SEM görüntüsü



Resim 8.16. II malzemenin 90° bükme işleminde elde edilen mikro yapısının EDS analizi; a) 1. nokta, b) 2. Nokta



Resim 8.16. (devam) II malzemenin 90° bükme işleminde elde edilen mikro yapısının EDS analizi; c) 3. Nokta, d) 4. nokta,e) 5. nokta

Resim 8.16 incelendiğinde, II sünek sac malzemenin mikro yapısal karakterizasyonu hakkında bilgi vermektedir. 16Mo3 malzeme ferrit fazı (koyu renk) ve perlit (beyaz renk) yapıdan meydana geldiği görülmektedir. Perlit yapısının deformasyon bantlarını oluşturduğu görülmektedir. II malzemenin deformasyon bölgesinden alınan parçanın mikro yapısal durumu incelendiğinde, 1 ve 3. noktalar perlit yapısının, 2 ve 4. noktalar ferrit fazlarının EDS analizleri hakkında bilgi vermektedir. NI uygulanan 16Mo3 sac malzemenin, 90° bükülmesi neticesinde orta deformasyon bölgesinden alınan parçanın

elektron mikroskop kullanılarak elde edilen mikro yapısı Resim 8.17' de mikro yapı görüntüsü üzerine uygulanan EDS bölgesel analizleri Resim 8.18' de gösterilmektedir.



Resim 8.17. NI malzemenin 90° bükülmesi neticesinde elde edilen SEM görüntüsü



Resim 8.18. NI malzemeden elde edilen EDS analizi sonuçları; a) 1. nokta, b) 2. nokta,



Resim 8.18. (devam) NI malzemeden elde edilen EDS analizi sonuçları; c) 3. nokta, d) 4. nokta, e) 5. nokta, f) EDS genel analizi

Resim 8.17' de NI uygulanmış 16Mo3 sac malzemenin elektron mikroskopta elde edilmiş mikro yapı resmi görülmektedir. Resim 8.17 incelendiğinde, 90° deformasyon uygulanmış mikro yapıda ferrit fazlarının yumuşak olması nedeniyle şekillendirilebilirliği kolaydır. Bu nedenle, ferrite nazaran sert perlit yapısı uygulanan deformasyona bağlı olarak sıkıştırılarak bantlaşma şeklinde yönelmeye sebep olmaktadır. Perlit yapısına uygulanan kuvvete bağlı olarak deformasyon bantlarını meydana getirmektedir.

Uygulanan normalizasyon işlemi neticesinde, orta deformasyon bölgesinden alınan parçanın elektron mikroskop kullanılarak elde edilen EDS analiz sonuçları Resim 8.18' de gösterilmektedir. 1, 2, 3, 4 ve 5. nokta malzeme üzerindeki perlit yapısının kimyasal bileşimini, Resim 8.18f' de mikro yapı görüntüsü elde edilen malzemenin genel EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. Yapılan EDS analizleri sonucunda 5 farklı nokta analizinde elde edilen sonuçların farklılıklar gösterdiği dikkat çekmektedir. Kimyasal bileşimin farklılık göstermesi alaşım elementlerinin deformasyon bölgesinde farklı olarak dağılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. EDS analizleri incelendiğinde bu farklılıklar dikkat çekmektedir (Resim 8.18).

Uygulanan normalize işlemine bağlı olarak, malzeme yapısında karbür yapıcı elementler olan C, Mo, V ve Cr elementlerinin varlığı dikkat çekmektedir. Bu elementler, östenitleştirme işleminde, tek faz östenitin oluşmasını ve çökeltilerin çözündürülmesini hedeflemektedir. Soğuma koşullarına da bağlı olarak karbon dağıtımının yeterli olmaması halinde ferrit içi karbon çözünürlüğü yerine Fe, Cr, Mo, V, vb. alaşım elementleri ile karbon reaksiyonu sonrası güçlü karbürler meydana gelmektedir. Alaşım elementlerinin kendi aralarında veya ferrit ile reaksiyona girerek M₂C ve M₆C karbürlerini oluşturmaktadır. Oluşan karbürler malzemenin sertliğinin artmasına paralel olarak, ileri esneme değerlerinin artmasına sebep olmaktadır.

Farklı kalınlıklardaki II, NI ve MI uygulanmış sac malzemenin 90° bükülmesi neticesinde elde edilen polinom eğri denklemleri Şekil 8.8' de gösterilmektedir.



Şekil 8.8. Geri ve ileri esneme miktarları ve elde edilen polinom eğri denklemi a) II, b) II-30 s, c) NI, d) NI-30 s, e) MI, f) MI-30 s

Şekil 8.8 incelendiğinde II, NI ve MI uygulanmış numunelerin direk (D) ve zımbanın sac malzeme bükme bölgesinde 30 s bekletilmesi sonucu elde edilen geri ve ileri esneme değerlerinin aritmetik ortalaması sonucu elde edilen polinom eğri denklemi gösterilmektedir. Şekil (8.8.a, 8.c)' de farklı kalınlıklardaki (3, 4, 5 ve 6 mm) II bükme işlemi, NI bükmeye göre ileri esneme değerleri kıyaslandığında, sırasıyla sac malzeme kalınlıkları göre, %2,90; %4,97; %26,1 ve %35,29 ileri esneme değerlerinde azalma meydana gelmiştir. II-30 s bekleyerek bükme işlemi, NI-30 s bekleyerek şekillendirme ile karşılaştırıldığında, 3 mm sac malzeme kalınlığına göre, %4,8; 4 mm kalınlıkta %4,25; 5 mm ve 6 mm kalınlıklara göre sırasıyla, %34,95; %49,18 ileri esneme davranışlarında azalma tespit edilmiştir (Şekil 8.8.b, 8.d). 3 mm, 4 mm, 5 mm ve 6 mm MI uygulanmış malzemelerin zımbanın 30 s bekletilmesi sonucu elde edilen geri esneme değerleri, MI direk bükme işlemleri ile sac malzeme kalınlıklarına göre kıyaslandığında, %19,82; %2,05; %21,17; %47,17 geriye esneme değerlerinde azalma meydana gelmiştir (Şekil 8.8.e, 8.f).

8.1.4. Farklı zımba uç radyüsü ile 90°' lik bükme deneyleri

Farklı ısıl işlemlerin uygulandığı (ısıl işlemsiz (II), normalize (NI) ve menevişleme (MI) 16Mo3 sac malzemenin farklı zımba uç radyüsleri (R2, R3, R4, R5 ve R6 mm) ile 90° bükülmesi sonrasında elde edilen geri ve ileri esneme değerleri EK-9' da tablo olarak verilmektedir. Elde edilen deney sonuçlarının aritmetik ortalaması ve zımbanın bekletildiği (30 s) uygulamaların direk bükme işlemlerine göre yüzde (%) azalma miktarı Şekil 8.9' da gösterilmektedir.



Şekil 8.9. II, NI ve MI uygulanmış sac malzemelerin farklı zımba uç radyüsleriyle 90° bükülmesi neticesinde elde edilen ileri ve geri esneme değerleri

Şekil 8.9 incelendiğinde, MI uygulanmış numunelerde geri esneme, II ve NI numunelerde ise, ileri esneme meydana geldiği belirlenmiştir. Geri esneme sonrasında, bükme bölgesi radyüs değeri artmaktadır. Bükme radyüsünün (R) geri esneme üzerine etkisi R/S oranı ile bağlantılıdır. R/S oranı arttıkça sac malzeme üzerinde geri esneme değeride artmaktadır

[30, 44, 152]. Bükme radyüs değeri arttıkça kalıba gelen kuvvetler azalmaktadır. Bükme radyüsü azaldıkça sac malzemeye gelen kuvvetler büyümektedir. Bu nedenle, MI uygulanmış numunelerde de literatüre paralel olarak, zımba uç radyüs değeri arttıkça geri esneme değerlerinde de azalma meydana gelmiştir. Şekil 8.9 incelendiğinde, bükme parametreleri ve malzeme özelliklerine bağlı olarak II numunelerde, ileri esneme davranışı meydana gelmektedir. Uygulanan NI işlemi neticesinde, sac malzemelerin de ileri esneme değeri artmaktadır. 16Mo3 sac malzeme üzerine uygulanan NI neticesinde sac malzemenin tane boyutunun küçülmesinden dolayı sertlik değeri de artmaktadır. MI malzemelerde ise, martenzitik bir yapı oluşmasından dolayı sertlik değerleri II ve NI numunelere göre daha yüksektir (Bkz. Çizelge 8.2).

4 mm kalınlığındaki II, NI ve MI uygulanmış malzemelerin deformasyon bölgesinin mikro yapısal karakterizasyonu Resim 8.19' da gösterilmektedir. Resim 8.19.a incelendiğinde, II malzemelerin mikro yapısı ferrit ve perlitten oluşmaktadır. Sac malzeme özelliklerine bağlı olarak II malzemelerde ileri esneme meydana gelmiştir. Uygulanan NI sonrasında, sac malzemenin yapısında perlit miktarlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Malzeme içyapısı ferrit ve ince perlit yapıya dönüşmektedir. Bu nedenle, sac malzemenin tane boyutu küçülmekte, sertlik değeride artmaktadır (Resim 8.19.b). Bu özelliklere bağlı olarak, sac malzemenin bükme işlemi sonrasında ileri esneme değerlerinde artma meydana gelmiştir. Uygulanan MI sonrasında, sac malzemede gelişi güzel ve iğnemsi martenzit yapı oluştuğu belirlenmiştir (Resim 8.19.c).



Resim 8.19. II, NI ve MI malzemelerin mikro yapı görüntüleri; a) II, b) NI, c) MI

Resim 8.19.c incelendiğinde, martenzit yapı sert bir faz olması nedeni ile sac malzemenin sertliğini arttırmıştır (Bkz. Çizelge 8.2). MI malzemelerde, gerilmenin uygulanması sonrasında, elastik şekil değişimi bir süre devam eder ve yük kaldırıldıktan sonra elastik şekil değişiminin tamamen geri dönmesi için belirli bir sürenin geçmesi gerekir. Bu şekilde zamana bağlı olarak meydana gelen elastik davranış anelastiklik olarak bilinir [153]. MI malzemelerin, sertliği fazla olması nedeniyle anelastik enerjisi büyük olduğu için geri yaylanma davranışı meydana gelmektedir.

Isıl işlem öncesi ve sonrası numunelerin mikro yapısındaki alaşım elementlerinin dağılım şekilleri EDS analiz tekniği olan fast maps ile belirlenmiştir (Resim 8.20).



Resim 8.20. Isıl işlem uygulanarak bükülen malzemelerin element dağılım haritaları a) Isıl işlemsiz (II), b) Normalize (NI), c) Menevişleme (MI)

Farklı sıcaklıklarda II, NI ve MI uygulanmış numunelere SEM' de X500 büyütme yapılarak element dağılım görüntüleri elde edilmiştir. II numune üzerine uygulanan NI ve MI sonrasında, sac malzemelerin element oranlarında değişmeler olduğu gösterilmektedir (Resim 8.20.a-20.c). Alaşım elementlerinde değişmelerinin asıl sebebi ısıl işlem neticesinde alaşım elementleri birleşerek karbür oluşturmalarıdır. Alaşım elementlerinin içerisinde bulunan molibden birincil karbür olarak ötektik tipi karbür oluşturur. Matriksteki

kompozisyonuyla direkt orantılı bir şekilde M₂C ve M₆C tipi çökeltilerde bulunur. Molibden, birincil karbür oluşumuyla malzemenin aşınma direncini artırır. Matrikste çözünen molibden ise M₂C tipi ikincil sertlik karbürlerin oluşumunu sağlar ve böylece matriksin ikincil sertlik kazanmasında en önemli rolü oynar. Bu nedenle, MI neticesinde sac malzemenin sertliğini arttırmıştır. Mo ve W genel olarak aynı tür karbürler oluşturmalarına ve birbirlerinin yerine kullanılabilmelerine karşın ikincil sertliğe olan katkıları bakımından farklılık gösterirler. Molibden, ikincil sertlik çökeltileri oluşturmada çok daha etkindir. Bununla birlikte yüksek hareketliliğe sahip olan molibden aynı zamanda aşırı menevişleme sırasında M₂C karbürlerinin büyüme hızını etkiler. Bu da molibden

Düşük bir karbür oluşturucu özelliği olan krom kendi birincil karbür tiplerini oluşturmaz ve oluşan karbür tiplerine göre bir miktar birincil karbürlerin kafesine (özellikle M₂C kafesine) girer. Karbürlere krom katılımı, karbür fazlarının kafes sabitlerini düşürür ve bu da daha düşük bir gerinme enerjisine ve böylece daha düşük bir çekirdeklenme aktivasyon enerjisine neden olur. Bu durumda dislokasyon ve ikiz sınırlarında çökelme kolaylaşır ve yüksek bir sertlik artışı elde edilebilir. Krom aynı zamanda yumuşak tavlamada ikincil $M_{23}C_6$ karbürlerinin oluşumuna yol açar. $M_{23}C_6$ karbürü temelde krom-karbürdür ve östenitleme sırasında kolayca çözünerek östenitin oluşmasına büyük katkıda bulunur. Sertleştirme sonucu istenilen martenzitin oluşumuna da etkide bulunur. İkincil sertlik oluşumunda kromun rolü çok büyüktür ve her iki tip ikincil sertlik karbürlerinin (MC ve M_2 C) enerji açısından oluşumunu kolaylaştırır ve böylece miktarlarını arttırır [145-154].

16Mo3 sac malzemenin karbür yapıcı alaşım elementlerinden biriside vanadyumdur. Vanadyum birincil karbür yapıcı elementlerdendir. Oluşturduğu MC tipi karbürler yüksek hız çeliklerindeki en sert karbürlerdir. Böylece sertlik ve aşınma direncini artırır. Molibden temperleme sırasında maksimum sertliği elde etmek bakımından ne kadar önemli bir element ise, vanadyum da işleme sıcaklıklarında sertliği korumak için önemlidir [145-147]. Östenitleştirmede matriks içinde çözünen vanadyum temperlemede MC tipi ikincil karbürleri oluşturur ve böylece matriksin yüksek sıcaklık sertliğini sağlar. Ancak oluşturduğu sert birincil karbürler nedeniyle, çeliğin taşlanabilirlik özelliğini azaltır. Uygulanan NI ve MI sonrasında, sac malzemelerin mikro yapısında alaşım elementlerinin birleşmesinden dolayı karbürler meydana gelmektedir. Karbürlerin sert ve gevrek olması nedeniyle 16Mo3 sac malzemenin menevişlenme işlemi neticesinde, özellikle bükme deformasyon bölgesinde sertliğin artması ile birlikte geri esneme davranışına etkili olduğu düşünülmektedir.

Farklı zımba uç radyüsleri ile gerçekleştirilen bükme işleminde elde edilen deney sonuçlarının polinom eğri denklemleri Şekil 8.10' da gösterilmektedir.



Şekil 8.10. Zımba uç radyüsleri ile elde edilen geri-ileri esneme miktarlarının polinom eğri denklemleri, a) II, b) II-30 s, c) NI, d) NI-30 s, e) MI, f) MI-30 s

Bükme işlemleri neticesinde elde edilen deney sonuçlarının polinom eğri denkleminde R² değerleri 1' e yakın olması deney sonuçlarının hassasiyetini göstermektedir. II ve NI

malzemelerde zımba uç radyüs değeri arttıkça ileri esneme değerinin azaldığı Şekil 8.10.a-10.d' deki grafiklerde gösterilmektedir. Zımba bekleme süreleri de ileri esneme değerlerini düşürmektedir (Şekil 8.10.b, 10.d). Zımba uç yarıçaplarında en büyük ileri esneme NI bükme işlemlerinde zımba uç radyüs değeri R2 mm ile 2,56° elde edilirken, En düşük ileri esneme değeri ise, II-30 s bükme işleminde zımba uç yarıçapı R6 mm ile 1,31° olarak elde edilmiştir. II-30 s bekleyerek bükme işlemi, NI bükme yöntemine göre ileri esneme değerini %48,82 azaltmıştır. MI uygulayarak yapılan bükme islemlerinde zımba uç radyüs değeri arttıkça geri esneme değerleri artmaktadır (Şekil 8.10.e, 10.f). Zımba sac malzeme deformasyon alanında bekleme süresi geri esneme değerini azaltmaktadır. MI yönteminde en küçük geri esneme değeri MI-30 s bekletilerek bükme işleminde zımba uç radyüs değeri R2 mm ile 1,17° elde edilirken, en büyük geri esneme değeri ise, zımba yarıçapı R6 mm ile 2,18° MI bükme işlemlerinde elde edilmiştir. MI-30 s bekletilerek bükme işlemi MI bükmeye göre geri esneme değerini %46,33 azaltmıştır. Sekil 8.10 incelendiğinde, zımbanın sac malzeme üzerinde 30 s bekletilmesi ileri ve geri esneme değerlerini azaltmaktadır. Bükme işlemleri esnasında plastik deformasyon sonucunda kalıcı şekil değişikliği meydana gelmektedir. Deformasyon neticesinde, sac malzeme büküm bölgesinde elastik deformasyon için gerekli enerji birikir (rezilyans). Zımbanın bekleme süresi malzeme büküm bölgesinde meydana gelen çekme ve basma gerilmelerini değerlerini azaltmaktadır. Zımba kaldırıldığında elastik deformasyon için harcanacak gerilme değerlerinde azalma meydana gelmesinden dolayı daha küçük bir ileri ve geri esneme davranışı meydana gelmektedir.

8.2. Deneysel Verilerin Varyans Analiz Sonuçları

Bükmede geri esneme üzerinde etkili faktörlerin uygun düzeylerinin belirlenmesi için yapılan ortalama analizleri sonucunda düzeyleri arasında en çok farkın görüldüğü faktör, en yüksek etki derecesine sahip olan I faktörüdür. I faktörü sac malzeme üzerine uygulanan ısıl işlemsiz, normalizasyon ve menevişlenmiş malzemeleri sembolize etmektedir. Malzeme üzerine uygulanan ısıl işlemlerin bükmede geri ve ileri esneme değerleri üzerinde en etkili faktör olduğu belirlenmiştir. Bükme parametrelerinden 2. derece etkili olan faktör D etkileşimidir. D faktörü sac malzemelerin 30°, 60° ve 90° açılara sahip zımbalar ile bükülmesi neticesinde geri ve ileri esneme değerleri esnemetrelerin. Uygulanan ısıl işlemler ve sac malzeme kalınlığı etkileşimi 3. derece, sac malzeme

kalınlığı (K) ise, 4. derece etkileşimli faktör olarak dikkat çekmektedir. Regresyon denkleminin bir bütün olarak anlamlılığını test etmek için varyans analizinden yararlanılmıştır. Varyans analizi neticesinde elde edilen hesaplamalar, geri ve ileri esneme miktarları üzerinde etkili olan faktör ve etkileşim bileşenleri Çizelge 8.3' de verilmiştir.

| Faktörler | SD | KT | Adj SS | Adj SS | F Değeri | Р | |
|---|--|----------|----------|----------|----------|-------|--|
| D | 2 | 12,1531 | 12,1531 | 6,0765 | 101,21 | 0,000 | |
| Ι | 2 | 229,1141 | 229,1141 | 114,5571 | 1908,10 | 0,000 | |
| В | 1 | 0,2569 | 0,2569 | 0,2569 | 4,28 | 0,061 | |
| K | 3 | 9,9934 | 9,9934 | 3,3311 | 55,48 | 0,000 | |
| DI | 4 | 10,6924 | 10,6924 | 2,6731 | 44,52 | 0,000 | |
| DB | 2 | 0,0082 | 0,0082 | 0,0041 | 0,07 | 0,934 | |
| DK | 6 | 2,8939 | 2,8939 | 0,4823 | 8,03 | 0,001 | |
| IB | 2 | 3,9472 | 3,9472 | 1,9736 | 32,87 | 0,000 | |
| IK | 6 | 23,2245 | 23,2245 | 3,8707 | 64,47 | 0,000 | |
| BK | 3 | 0,1818 | 0,1818 | 0,0606 | 1,01 | 0,422 | |
| DIB | 4 | 0,0984 | 0,0984 | 0,0246 | 0,41 | 0,798 | |
| DIK | 12 | 7,3277 | 7,3277 | 0,6106 | 10,17 | 0,000 | |
| DBK | 6 | 0,3614 | 0,3614 | 0,0602 | 1,00 | 0,467 | |
| IBK | 6 | 0,5699 | 0,5699 | 0,0950 | 1,58 | 0,235 | |
| Hata | 12 | 0,7204 | 0,7204 | 0,0600 | | | |
| Toplam | Toplam 71 301,5434 | | | | | | |
| SD: Serbestlik | SD: Serbestlik derecesi; KT: Kareler toplamı; P: Anlamlılık<0,05; R ² =%98,59 | | | | | | |
| D : Bükme açısı; I : Malzeme özellikleri; B : Bekleme süresi; K : Sac malzeme kalınlığı | | | | | | | |

Çizelge 8.3. Geri ve ileri esneme değerleri için varyans analiz sonuçları

Deneysel parametrelerin ve verilerin test edilmesi için yapılan ve Çizelge 8.3' de verilmekte olan varyans analiz tablosuna göre; D, I, K faktörü ve DI, DK, IB, IK ve DIK etkileşimlerinin p değeri<0,05 olduğundan modele katkıları anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Zımbanın sac malzeme deformasyon alanında bekleme süresinin (B) geri ve ileri esneme değerlerine p anlamlılık değerinin 0,05 değerinden büyük olması (p=0,061) nedeniyle etkili olmadığı belirlenmiştir. Modelde her bir faktör tek tek incelendiğinde B dışındakilerin faktörer düzeyleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı fark olduğu

görülmektedir. İkili etkileşimlerden D ile B; B ile K etkileşimleri %5 anlamlılık seviyesinde istatistiksel olarak anlamsız bulunmuştur (P=%5 üzerinde olduğu için). Üçlü etkileşimlerden sadece D, I ve K etkileşimi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Diğerlerinin p anlamlılık değeri 0,05 değerinden büyük olması nedeniyle anlamsız olduğu tespit edilmiştir.

Seçilen faktörlerin ana etkilerinin ve etkileşimlerinin bükme parametreleri için anlamlı olup olmadığının belirlenmesi için hipotezler kurulmuş ve varyans analizi yapılmıştır. Bu hipotezlerin test edilmesinde p=0,05 anlamlılık düzeyi dikkate alınmış F değerlerinin belirlenmesi sonucu p değerinin 0,05 değerinden küçük olduğu durumlar için ana etki ya da etkileşimin anlamlı olduğuna ilişkin karar alınmış ve faktör düzeylerinin ortalamaları arasında fark olmadığına dair kurulan hipotez red edilmiştir.

Sonuç olarak; yapılan Varyans analizi sonucunda elde edilen ANOVA tablosu değerlerine göre modeldeki yüksek R² (%99,76) ve düzeltilmiş R² değerleri (%98,59) değişkenliğin iyi açıklandığını göstermektedir. Ayrıca regresyon denkleminin standart hatası S=0,245 ve belirlilik katsayısı ise düzeltilmiş R²=98,59 olarak bulunmuştur. Modelin anlamlığı için hesaplanan F testi anlamlı bulunmuş olup bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında doğrusal ilişki olduğuna karar verilmiştir. Belirleme katsayısına göre esneme katsayısındaki değişkenliğin %98,59' u çok faktörlü model aracılığıyla D, I, B ve K değişkenleri bakımından açıklanmaktadır. Modelin uygunluğunun bir göstergesi artıkların normal dağılım göstermesidir. Artıkların grafiksel olarak incelemesi Şekil 8.11' de Q-Q grafiğiyle verilmiştir. Grafik, artıkların normal dağılıma uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 8.11. Varyans analizi artıklar için elde edilen grafikler

Deneysel çalışma sonucunda uygulanan varyans analizinde; modelde istatistiksel olarak anlamsız bulunan etkileşimler çıkarılarak model yeniden uygulanmıştır. Elde edilen bulgular Çizelge 8.4' de verilmiştir.

| Faktörler | SD | KT | Adj SS | Adj SS | F Değeri | Р | |
|---|----|----------|----------|----------|----------|-------|--|
| D | 2 | 12,1531 | 12,1531 | 6,0765 | 103,36 | 0,000 | |
| Ι | 2 | 229,1141 | 229,1141 | 114,5571 | 1948,10 | 0,000 | |
| В | 1 | 0,2569 | 0,2569 | 0,2569 | 4,37 | 0,044 | |
| K | 3 | 9,9934 | 9,9934 | 3,3311 | 56,66 | 0,000 | |
| DI | 4 | 10,6924 | 10,6924 | 2,6731 | 45,47 | 0,000 | |
| DK | 6 | 2,8939 | 2,8939 | 0,4823 | 8,20 | 0,001 | |
| IB | 2 | 3,9472 | 3,9472 | 1,9736 | 33,57 | 0,000 | |
| IK | 6 | 23,2245 | 23,2245 | 3,8707 | 65,84 | 0,000 | |
| DIK | 12 | 7,3277 | 7,3277 | 0,6106 | 10,39 | 0,000 | |
| Hata | 33 | 1,9401 | 1,9401 | 0,0588 | | | |
| Toplam 71 301,5434 | | | | | | | |
| SD : Serbestlik derecesi; KT : Kareler toplamı; P : Anlamlılık<0,05; düzeltilmiş R ² : % 98,62 | | | | | | | |
| D : Bükme açısı; I : Malzeme özellikleri; B : Bekleme süresi; K : Sac malzeme kalınlığı | | | | | | | |

Çizelge 8.4. Yeniden oluşturulan modelin varyans analiz sonuçları

Yeniden oluşturulan model için Çizelge 8.3 ile Çizelge 8.4 incelendiğinde; aşağıda verilen yorumlar yapılır;

- Önceki modelden farklı olarak yeni modelde B istatistiksel olarak anlamlı bulunmaktadır.
- Modelin belirleme katsayısında (R²) çok az da olsa artış olduğu görülmektedir.
- Modelde hesaplanan F değerlerine bakıldığında, farklılıkta en büyük etkinin malzeme özellikleri (I) parametresi, en az etkinin ise bekleme süresi (B) parametresi tarafından oluşturulduğu görülmektedir.
- F değerlerine bakılarak ikili etkileşimli parametreler incelendiğinde, en fazla etkin parametrenin malzeme özellikleri (I) ve sac malzeme kalınlığının (K) etkileşimle oluşturdukları IK, en az etkileşimli parametrenin bükme açısı (D) ve sac malzeme kalınlığının oluşturdukları etkileşimli DK faktörünün olduğu tespit edilmiştir.

- Üç farklı parametrenin etkileşimli olduğu bükme açısı, malzeme özellikleri ve sac malzeme kalınlığı parametrelerinin oluşturdukları DIK etkileşimli parametrelerin etkili olduğu belirlenmiştir.
- Yeniden oluşturulan model %5 anlamsallık değerleri (p) açısından incelendiğinde, bütün faktörlerin modele katkıları anlamlı olduğu tespit edilmiştir.

Deney sonuçları değerlendirildiğinde Varyans analizi çalışması sonucu elde edilen tahmin modeli ''Eş. 8.1'' verilmektedir.

$$Y_{ijklm} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \eta_l + \alpha \beta_{ij} + \alpha \eta_{il} + \beta \gamma_{jk} + \beta \eta_{jl} + \alpha \beta \eta_{ijl} + \varepsilon_{ijklm}$$
(8.1)
i=30, 60, 90
j=1, 2, 3
k=1, 2
l=3, 4, 5, 6

Yukarıdaki notasyonlar aşağıdaki gibi ifade edilir.

- i : D faktörünün düzeyleri
- j : I faktörünün düzeyleri
- k : B faktörünün düzeyleri
- 1 : K faktörünün düzeyleri

Artıkların grafiksel olarak incelemesi Şekil 8.12' da Q-Q grafiğiyle verilmiştir. Grafik, artıkların normal dağılıma uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 8.12.Yeniden oluşturulan modelde Varyans analizi artıklar için elde edilen grafikler

İncelenen dört faktöründe düzeyleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunduğundan farklılığın kaynağını belirlemek için Tukey testi yapılmıştır. İstatistiksel olarak anlamlı olmayan etkileşimler çıkartılıp Tukey testi kullanılarak analiz tekrarlandığında Çizelge 8.5' de elde edilen model gösterilmektedir.

| Faktör | Düzey | Deney sayısı | Ortalama | | Grup | | |
|---|---|--------------|----------|----|------|----|--|
| | 60 | 24 | 0,7 | A1 | | | |
| D | 30 | 24 | 0,1 | | B1 | | |
| | 90 | 24 | -0,3 | | | C1 | |
| | 2 | 24 | 1,6 | A2 | | | |
| Ι | 1 | 24 | 1,2 | | B2 | | |
| | 3 | 24 | -2,4 | | | C2 | |
| B | 2 | 36 | 0,2 | A3 | | | |
| D | 1 | 36 | 0,1 | | B3 | | |
| | 6 | 18 | 0,6 | A4 | | | |
| к | 5 | 18 | 0,4 | A4 | | | |
| K | 4 | 18 | 0,0 | | B4 | | |
| | 3 | 18 | -0,4 | | | C3 | |
| D : Bükme Açısı; 1. düzey 30°, 2. düzey 60°, 3. düzey 90° | | | | | | | |
| I : Malzeme özellikleri; 1. düzey ısıl işlemsiz; 2. düzey normalizasyon; 3. düzey menevişleme | | | | | | | |
| B : Bekleme süresi; 1. düzey direk, 2. düzey 30 s bekleme | | | | | | | |
| K : Sac malzen | K : Sac malzeme kalınlığı, 1. düzey 3 mm, 2. düzey 4 mm, 3. düzey 5 mm, 4. düzey 6 mm | | | | | | |

Çizelge 8.5. Farklığın kaynağını belirlemek için yapılan Tukey testi sonuçları

Çizelge 8.5' de verilen bulgulara göre;

- D (bükme açısı) faktörünün her bir düzeyi istatistiksel olarak bir birinden farklı olduğu görülmektedir. En düşük ortalama 90°, en yüksek ortalama 60° bükme açılarında ortaya çıkmaktadır. Buna göre düşük esneme için bükme açısı 90° olarak alınabilir.
- K (sac malzeme kalınlığı) faktöründe; 5 ve 6 için esneme ortalamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olmadığı görülmektedir. Yani bu iki düzey birbirine "yakın" esneme değerleri ortaya çıkarmaktadır. 3 ve 4 ise hem kendi aralarında hem de 5 ile 6 faktör düzeyine göre farklı ortalamaya neden olmaktadır. En düşük ortalama C düzeyinde, yüksek ortalama ise 5 ile 6 düzeyinde ortaya çıkmaktadır.

- I (malzeme özellikleri) faktörünün üç düzeylerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. 2. düzeydeki normalizasyonlu malzemelerin esneme değerleri; 1. düzeydeki ısıl işlemsiz malzemelere göre fazla olduğu belirlenmiştir. 3. düzeydeki menevişlenmiş malzemelerin esneme değerlerinin 1. düzey ve 2. düzey malzemelere göre, daha fazla olduğu belirlenmiştir.
- B (bekleme süresi) faktöründe, zımbanın sac malzeme bükme bölgesinde bekleme süresinin esneme değerleri üzerinde farklı etkilerinin olduğu belirlenmiştir.

Bükme parametrelerinden farklı zımba uç yarıçaplarının malzeme özellikleri ve geri ve ileri esneme davranışına olan etkisini incelemek amacıyla minitab analiz programında üç faktörlü düzen kullanılarak varyans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bağımsız değişken olarak kullanılan malzeme özellikleri, zımba bekleme süresi ve zımba uç yarıçapları parametrelerinin "girdi" parametreleri olarak değerlendirildiği deneysel çalışmalar neticesinde, "çıktı" parametreleri olarak; bağımlı değişken olan geri ve ileri esneme değerleri ortaya konulmuştur.

Bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişki Varyans analizleri neticesinde belirlenmiştir. Analizler neticesinde, bükme işleminde etkili olan parametreler belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarının anlamlılığını test etmek için varyans analizinden yararlanılmıştır. Varyans analizi için gerekli hesaplamalar Çizelge 8.6' da verilmiştir.

| Faktörler | SD | KT | Adj SS | Adj SS | F Değeri | Р | |
|--|----|---------|---------|---------|----------|-------|--|
| Ι | 2 | 91,3472 | 91,3472 | 45,6736 | 7643,05 | 0,000 | |
| В | 1 | 0,0006 | 0,0006 | 0,0006 | 0,09 | 0,767 | |
| R | 4 | 2,5082 | 2,5082 | 0,6271 | 104,93 | 0,000 | |
| IB | 2 | 0,5165 | 0,5165 | 0,2583 | 43,22 | 0,000 | |
| IR | 8 | 0,1533 | 0,1533 | 0,0192 | 3,21 | 0,060 | |
| BR | 4 | 0,0241 | 0,0241 | 0,0060 | 1,01 | 0,458 | |
| Hata | 8 | 0,0478 | 0,0478 | 0,0060 | | | |
| Toplam | 29 | 94,5977 | | | | | |
| SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, P:Anlamlılık<0,05 | | | | | | | |
| I : Malzeme özellikleri; B : Bekleme süresi; R : Zımba uç yarıçapı | | | | | | | |

Çizelge 8.6. Varyans analizi neticesinde elde edilen faktör ve düzey etkileri

Çizelge 8.6 incelendiğinde bükme parametreleri arasında en etkili parametrenin malzeme özellikleri (I) olduğu elde edilen F değerinin büyüklüğü neticesinde tespit edilmiştir. İkinci etkili parametre ise, zımba uç radyüsü (R) olduğu ve zımba bekleme süresinin (B) ise, bükme işlemlerinde geri ve ileri esneme değerine tek başına etkisinin istatistiksel olarak anlamlı bulunmadığı, fakat I (malzeme özellikleri) faktörü ile oluşturdukları IB etkileşiminde anlamlı bulunduğu yapılan varyans analizleri neticesinde belirlenmiştir.

Deneysel parametrelerin ve verilerin test edilmesi için yapılan ve Çizelge 8.6' da verilmekte olan varyans analiz tablosuna göre; I ve R faktörü ve IB etkileşiminin p anlamsallık değerinin %5' ten küçük olduğundan dolayı modele katkılarının anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Zımbanın sac malzeme deformasyon alanında bekleme süresi (B) faktörü ve IR ve BR etkileşimlerinin geri ve ileri esneme değerlerine p anlamsallık değerinin %5 değerinden büyük olması nedeniyle etkili olmadığı tespit edilmiştir.

Varyans analizinin standart hatası S=0,0773 ve belirlilik katsayısı ise düzeltilmiş R²=99,82 olarak bulunmuştur. Bu model için yapılan F testi anlamlı bulunmuş olup bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında doğrusal ilişki olduğuna karar verilmiştir.

Deney sonuçları değerlendirildiğinde Varyans analizi çalışması sonucu elde edilen tahmin modeli ''Eş. 8.2'' verilmektedir.

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \alpha \beta_{ij} + \alpha \gamma_{ik} + \beta \gamma_{jk} + \varepsilon_{ijkl}$$

$$i=1, 2, 3$$

$$j=1, 2$$

$$k=1, 2, 3, 4, 5$$
(8.2)

Yukarıdaki notasyonlar aşağıdaki gibi ifade edilir.

i : I faktörünün düzeyleri

j : B faktörünün düzeyleri

k : R faktörünün düzeyleri

Oluşturulan modelde artıkların grafiksel olarak incelemesi Şekil 8.13' de Q-Q grafiğiyle verilmiştir. Grafik, artıkların normal dağılıma uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 8.13. 90° bükme işleminde Varyans analizi artıklar için elde edilen grafikler

Modelde istatistiksel olarak anlamsız olan BR ve IR etkileşimleri çıkartılarak model yeniden uygulanmıştır. Elde edilen yeni model Çizelge 8.7' de verilmiştir. Elde edilen yeni modelin varyans analizinin standart hatası S=0,1061; belirleme katsayısı olan düzeltilmiş R²=99,65 olarak bulunmuştur. P anlamsallık değeri I, R faktörü ve IB etkileşimi için anlamlı bulunurken, B faktörü için anlamlı bulunmamıştır.

| Faktörler | SD | KT | Adj SS | Adj SS | F Değeri | Р |
|--|----|--------|--------|--------|----------|-------|
| Ι | 2 | 91,347 | 91,347 | 45,673 | 4056,71 | 0,000 |
| В | 1 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,05 | 0,825 |
| R | 4 | 2,508 | 2,508 | 0,627 | 55,69 | 0,000 |
| IB | 2 | 0,517 | 0,517 | 0,258 | 22,94 | 0,000 |
| Hata | 20 | 0,225 | 0,225 | 0,011 | | |
| Toplam | 29 | 94,598 | | | | |
| SD : Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, P:Anlamlılık<0,05 | | | | | | |
| I : Malzeme özellikleri; B : Bekleme süresi; R : Zımba uç yarıçapı | | | | | | |

Çizelge 8.7. Farklı zımba yarıçapları için yeniden oluşturulan varyans analiz modeli

Yeniden oluşturulan model için Çizelge 8.6 ile Çizelge 8.7 incelendiğinde; aşağıda verilen yorumlar yapılır;

- Modelin belirleme katsayısında düzeltilmiş (R²) çok az da olsa azalma olduğu görülmektedir.
- Yeniden oluşturulan modelde etkili olmayan etkileşimler çıkartıldığında B (bekleme süresi) anlamsallık değeri p=0,825 olması nedeniyle anlamlı bulunmamıştır.
- Oluşturulan yeni modelde ilk modelde olduğu gibi I (malzeme özellikleri) ve B faktörlerinin oluşturdukları IB etkileşimi %5 anlamsallık düzeyinde anlamlı bulunmuştur.

Oluşturulan modelde artıkların grafiksel olarak incelemesi Şekil 8.14' de Q-Q grafiğiyle verilmiştir. Grafik, artıkların normal dağılıma uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 8.14. Farklı zımba yarıçapları ile Varyans analizi artıklar için elde edilen grafikler

İncelenen üç faktörlü düzeyleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunduğundan farklılığın kaynağını belirlemek için Tukey testi yapılmıştır. Modelden istatistiksel olarak anlamlı olmayan IR ve BR etkileşimleri çıkartılıp Tukey testi kullanılarak analiz tekrarlandığında Çizelge 8.8' de elde edilen model ortaya çıkarılmıştır.

| Faktör | Düzey | Deney sayısı | Ortalama | | Gr | up | | |
|---|---|--------------|----------|----|----|----|----|--|
| | 2 | 10 | 2,081 | A1 | | | | |
| Ι | 1 | 10 | 1,856 | | B1 | | | |
| | 3 | 10 | -1,728 | | | C1 | | |
| | 2 | 6 | 1,212 | A2 | | | | |
| | 3 | 6 | 0,890 | | B2 | | | |
| R | 4 | 6 | 0,657 | | | C2 | | |
| | 5 | 6 | 0,537 | | | C2 | D1 | |
| | 6 | 6 | 0,387 | | | | D1 | |
| I : Malzeme özellikleri; 1. düzey ısıl işlemsiz; 2. düzey normalizasyon; 3. düzey menevişleme | | | | | | | | |
| R : Zımba rady | R : Zımba radyüsü; 1.düzey R2 mm, 2.düzey R3 mm, 3.düzey R4 mm, 4.düzey R5 mm,5.düzey R6 mm | | | | | | | |

| Cizelge 8.8. 90 | ^o bükmede farklı | ğın kaynağını | belirlemek için yapılar | n Tukey testi sonuçları |
|-----------------|-----------------------------|---------------|---------------------------------------|-------------------------|
| , | | 0 | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | |

Çizelge 8.8' de elde edilen bulgulara göre;

- I (malzeme özellikleri) faktörünün her bir düzeyi istatistiksel olarak bir birinden farklı olduğu belirlenmiştir. 2. düzey normalizasyonlu malzemelerde elde edilen esneme değeri 1. düzey ısıl işlemsiz malzemelere göre fazla olduğu görülmektedir. 3. düzey menevişlenmiş malzemelerde ise, meydana gelen esneme (-) değerinin 1. düzey ve 2. düzeyde meydana gelen ileri esneme göre ters yönde geri esneme davranışı gösterdiği görülmektedir.
- R (zımba uç radyüsü) faktöründe; zımba uç yarıçapı 4 ve 5; 5 ve 6 mm için esneme ortalama değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olmadığı tespit edilmiştir. Yani 4 ve 5; 5 ve 6 mm deney parametreleri "yakın" esneme değerleri ortaya çıkarmaktadır. 2 ve 3 ise hem kendi aralarında hem de 4, 5 ve 6 faktör düzeyine göre farklı ortalamaya neden olmaktadır. En düşük ortalama değeri D düzeyinden, yüksek ortalama ise A düzeyinde ortaya çıkmaktadır. Zımba uç yarıçapları arttıkça esneme değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

9. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Deneysel çalışmada, Cr-Mo alaşımlı 16Mo3 çelik sac malzeme kullanılmıştır. Sac malzemelere uygulanan ısıl işlemlerin bükme parametrelerine olan etkilerini incelemek amacıyla sac malzemelere normalizasyon (NI) ve menevişleme işlemi (MI) uygulanmıştır. Bükme deneylerinde 3, 4, 5 ve 6 mm sac malzeme kalınlıkları kullanılmıştır. Sac malzemeler; ısıl işlemsiz (II) (herhangi bir işleme tabi tutulmadan), NI ve MI olarak bükme deneylerinde kullanılmıştır. Sac malzeme kalınlığının ileri ve geri esneme miktarlarına olan etkilerini incelemek amacıyla, zımba uç yarıçapı 4,5 mm olan 30°, 60° ve 90° bükme zımbaları kullanılarak bükme yöntemleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bükme işlemlerinde zımba uç radyüsünün ileri ve geri esneme değerlerine ve bükme parametrelerine olan etkilerini araştırmak amacıyla farklı zımba uç yarıçapına sahip (2, 3, 4, 5 ve 6 mm) zımbalar kullanılarak 90° bükme deneyleri gerçekleştirilmiştir

Bükme işlemleri, zımba sac malzeme bükme bölgesinde bekletilmeden direk ve 30 s bekletildikten sonra kaldırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonrasında, elde edilen geri ve ileri esneme değerlerinden polinom eğri denklemleri türetilerek literatüre katkıda bulunulmuştur. Deneysel çalışmada kullanılan bükme parametreleri (malzeme özellikleri, bükme açısı, sac malzeme kalınlığı, zımba uç radyüsü ve bekleme süresi) aralarındaki ilişki minitab analiz programı kullanılarak tespit edilerek, her bir parametrenin geri ve ileri esneme davranışına etkisi incelenmiştir. Ayrıca, bükülmüş malzemelerin orta deformasyon bölgelerinden parçacıklar çıkartılarak sac malzemelerin mikro yapısal karakterizasyonu, geri ve ileri esneme oluşum mekanizmaları incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular aşağıda sırasıyla belirtilmiştir;

- Gerçekleştirilen bükme işlemlerinde (30°, 60° ve 90°) II ve NI malzemelerde ısıl işleme bağlı olarak ileri esneme meydana geldiği tespit edilirken, MI uygulanış malzemelerde ise, geri esneme davranışı belirlenmiştir.
- II ve NI malzemenin 30° ve 60° bükme işlemleri sonucunda, bütün açı değerlerinde ileri esneme davranışı tespit edilmiştir. II malzemenin 90° bükülmesi neticesinde yapılan 180 deneyden %94,44' ünde ileri; %5,56' sında ise geri esneme değeri belirlenmiştir. NI malzemelerin homojen bir mikro yapıya sahip olmasından dolayı bükme işlemlerinde
sapmalar meydana gelmemiştir. Bütün açı değerlerinde ileri esneme gözlemlenmiştir. MI malzemelerde ise, martenzit oluşumundan dolayı ve karbür oluşumları neticesinde sertliğin artması nedeniyle, bütün açı değerlerinde geri esneme davranışının meydana geldiği tespit edilmiştir.

- Farklı kalınlıktaki (3, 4, 5 ve 6 mm) II, NI ve MI malzemelerin 30°, 60° ve 90° bükme işlemlerinde, zımba sac malzeme bükme deformasyon bölgesinde 30 s bekletilmesi geri ve ileri esneme davranışlarını azalttığı tespit edilmiştir. Zımbanın sac malzeme deformasyon bölgesinde bekleme süresi, malzemede alternatif kayma düzlemlerini harekete geçirmekte ve bükme işleminin gerçekleştiği iç deformasyon bölgesinde meydana gelen basma gerilmeleri, dış deformasyon bölgesindeki çekme gerilmeleri arasındaki farkı azaltmasından dolayı geri ve ileri esneme davranışlarında azalma meydana geldiği düşünülmektedir.
- II ve NI uygulanmış malzemelerin, 30° bükme işlemlerinde, sac malzeme kalınlığı arttıkça ileri esneme miktarı artarken, 60° ve 90° bükme uygulamalarında sac malzeme kalınlığı arttıkça ileri esneme değerinin azaldığı belirlenmiştir. MI uygulanmış sac malzemelerin 30°, 60° ve 90° bükülmesi sonrasında ise, sac kalınlıkları arttıkça geri esneme değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.
- Farklı zımba uç yarıçapları (R2, R3, R4, R5 ve R6 mm) kullanılarak II, NI ve MI malzemelerin 90° bükülmesi neticesinde, zımba uç radyüs değeri arttıkça ileri esneme davranışları azalırken, geri esneme miktarlarının ise arttığı belirlenmiştir. Zımba bekleme süreleri de ileri ve geri esneme davranışların azaltmıştır. II bükme işlemlerinde R6 mm zımba uç radyüs değeri R2 mm' ye göre %42,57; II-30 s bükme yönteminde R6 mm radyüs değeri R2 mm bükmeye göre %44,49 ileri esneme değerini azaltmıştır. Uygulanan NI neticesinde, R6 mm zımba radyüs değeri, R2 mm zımba radyüs değeri, R2 mm radyüs değeri R2 mm' ye göre %29,46 ileri esneme değerlerini azaltmıştır. MI uygulanmış malzemelerin, zımba uç yarıçapı R2 mm bükülmesi R6 mm' ye göre %36,70; MI-30 s bükme yönteminde ise, R2 mm, R6 mm' ye göre %34,64 geri esneme değerlerini azalttığı tespit edilmiştir.

- II, NI ve MI malzemelerin mikro yapı incelemeleri sonucunda, II malzemenin mikro yapısı ferrit fazı ve perlit yapısı, NI malzemelerin; ince perlit ve ferrit fazı; MI uygulanmış malzemelerde ise; gelişi güzel ve iğnemsi martenzit yapısı tespit edilmiştir. NI malzemelerin sertliği, II malzemelere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, NI neticesinde, tane boyutunun küçülmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. MI sonrasında ise, martenzit yapı oluşmasından dolayı sertliği, II ve NI uygulanmış malzemelere göre, arttığı tespit edilmiştir. II, NI ve MI malzemeler uygulanan deformasyon neticesinde, meydana gelen deformasyon pekleşmesine bağlı olarak, deformasyon bölgelerin sertliği, deformasyon olmayan bölgelere göre artış gösterdiği tespit edilmiştir.
- Uygulanan ısıl işlemler açısından deformasyon olmayan bölgelerin sertlik değerleri birbirleri ile kıyaslandığında; menevişleme uygulanmış malzemelerin sertlik değerleri, ısıl işlemsiz ve normalizasyonlu malzemelere göre yaklaşık olarak; %44 ve %41 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. Menevişlenmiş malzemelerin deformasyon bölgelerindeki sertlik değerleri, ısıl işlemsize %49,5 ve normalizasyonlu malzemelere göre ise; %36,5 artma meydana geldiği belirlenmiştir.
- Bükme işlemleri neticesinde; II, NI ve MI malzemelerin mikro yapıları incelendiğinde, uygulanan deformasyon miktarına göre oluşan bantlaşmanın azlığı ve özellikle MI numunelerde herhangi bir tane yönlenmesinin meydana gelmediği belirlenmiştir.
- EDS analizleri sonucunda, yapının hem kimyasal kompozisyonu hemde tane yapısı açısından oldukça homojen olduğu belirlenmiştir.
- Uygulanan çekme testleri sonrasında, MI uygulanmış malzemelerin çekme dayanımında, II ve NI malzemelere göre artma meydana gelirken % uzama değerlerinde azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Uygulanan NI sonrasında ise, sac malzemenin çekme dayanımı, II malzemelere göre artmakta, fakat % uzama değeri azalmaktadır.
- Çekme testi neticesinde kırık yüzeyler incelendiğinde, II ve NI numunelerinde ferrit yumuşak matrisinden dolayı çukurcuk tipi kırılmalar gözlenmiştir. II ve NI uygulanmış numunelerin kırık yüzeylerinde kısmen düzgün yüzey ayrılma tipi kopma ile birlikte

sünek çukurcuklar tespit edilmiştir. Martenzit sert ve gevrek bir faz olması nedeniyle, MI uygulanarak sac malzemenin sertlik artışı ve sünekliğinde bir miktar azalma meydana gelmesinden dolayı gevrek bir kırılma meydana geldiği belirlenmiştir. Kırık yüzeyler üzerinde derin çukurlar ve inklüzyonlar oluştuğu tespit edilmiştir. MI uygulanan malzemelerde, yarılma tipi kırıkların arttığı ve çukurcuk tipi kırıkların azaldığı tespit edilmiştir. Buna sebep olarak, martenzit sert yapısının artması ve ferrit sünek fazının azalması gösterilmektedir. Çünkü martenzit yapısı üzerinde yarılma tipi kırıklar, ferrit fazı üzerinde çukurcuk tipi kırılma meydana getirdiği tespit edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sayısal verilerin analiz edilmesinde elde edilen bulgular aşağıda sırasıyla belirtilmiştir;

- Uygulanan sayısal analiz neticesinde, geri ve ileri davranışlarını etkileyen en önemli faktörün malzeme özellikleri (ısıl işlemsiz, normalizasyon ve menevişleme işlemi) (I) olduğu yapılan varyans analizleri neticesinde tespit edilmiştir.
- Modelden istatistiksel olarak anlamlı olmayan etkileşimler çıkartılarak yeniden oluşturulan modelde anlamlı olmayan B (bekleme süresi) etkili olmuştur. Malzeme özellikleri, bükme açısı, sac malzeme kalınlığı ve bekleme süresi faktörleri için yeniden oluşturulan matematiksel modelin standart hatası S=0,2424 ve belirlilik katsayısı ise düzeltilmiş R²=98,62 olarak bulunmuştur. Bu model için yapılan F testi anlamlı bulunmuş olup bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında doğrusal ilişki olduğu tespit edilmiştir.
- Yeniden oluşturulan Varyans analizleri neticesinde, F değerlerine göre; esneme davranışlarına en etkili parametrenin malzeme özellikleri (I) olduğu belirlenirken, ikinci olarak, sac malzeme bükme açısı (D), son olarak ise, sac malzeme kalınlığının (K) etkili olduğu belirlenmiştir. Bu üç faktörün kendi aralarında oluşturdukları (DIK) etkileşimin %5 anlamsallık değerine göre anlamlı olduğu tespit edilmiştir.
- Farklılığın kaynağını belirlemek amacıyla yapılan Tukey testi neticesinde, 3 mm ve 4 mm sac malzeme kalınlıkları kendi aralarında ve 5 mm ile 6 mm sac malzeme kalınlıklarına göre anlamlı oldukları belirlenmiştir. 5 mm ve 6 mm sac malzeme

kalınlıkları benzer davranış sergiledikleri belirlenmiştir. Yani bükme parametrelerinde 5 mm ve 6 mm sac malzemeden yalnızca tek bir kalınlık değerinin kullanılması gerektiği istatistiksel olarak tespit edilmiştir.

- Her bir parametrenin düzeyleri arasındaki ilişki Tukey testi kullanılarak analiz edilmiştir. Düzeyler arasındaki etki incelendiğinde, zımba bekleme sürelerinin farklı etkilere sahip olduğu yapılan analiz sonucunda tespit edilmiştir. Yani, zımbanın sac malzeme üzerinde 30 s bekletilmesi veya direk kaldırılması arasında yakın ilişki olmadığı belirlenmiştir.
- Farklı zımba uç yarıçapları ile 90° bükme işlemlerinde en etkili parametrenin malzeme özellikleri (I) ve zımba uç radyüs değeri (R) olduğu belirlenirken yapılan analizde bekleme süresinin etkili bir faktör olmadığı tespit edilmiştir. Etkili olmayan parametreler çıkarıldığında model tekrarlandığında düzeltilmiş R² değerinde çok az bir değişme tespit edilmiştir. Oluşturulan modelin standart hatası S=0,1061 ve belirlilik katsayısı ise düzeltilmiş R²=99,65 olarak bulunmuştur. Bu model için yapılan F testinin anlamlı olduğu, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında doğrusal ilişki olduğu belirlenmiştir.
- R (farklı zımba yarıçapları), B (bekleme süresi) ve malzeme özellikleri (I) faktörleri kullanılarak geri ve ileri esneme değerleri üzerine oluşturulan modelde ve etkili olmayan etkileşimlerin çıkartılarak (IR ve BR) yeniden oluşturulan modelde B (bekleme süresi) faktörü tek başına etkili olmazken, IB etkileşimi ile anlamlı bulunmuştur.

9.1. Öneriler

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen bulgulara ve ilerideki yapılacak çalışmalara ışık tutması anlamında aşağıdaki belirtilen çalışmalar yapılabilir;

• Farklı ısıl işlemler uygulanmış sac malzemelerin bükme işlemleri sonrasında, deformasyon bölgelerinde meydana gelen kalıntı gerilme miktarları ölçülerek geri ve ileri esneme davranışına olan etkisi araştırılabilir.

- Sac malzemeler üzerine 30° ve 60° bükme işlemlerine ek olarak 45° ile 75° bükme işlemleri uygulanarak bükme dönüşüm açısı ve zımbanın sac malzeme üzerinde farklı bekleme süreleri uygulanarak geri ve ileri esneme değerleri incelenebilir.
- Sac malzeme üzerine farklı su verme sıcaklıklarında menevişleme işlemi uygulanarak farklı martenzit oranlarının geri ve ileri esneme davranışına olan etkisi araştırılabilir.
- Farklı özellikteki sac malzemeler üzerine farklı bükme açıları kullanılarak, bükülmesi sonrasında meydana gelen geri ve ileri esneme davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenebilir.
- Yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahip sac malzemeler (pirinç, bakır, vb.) ile hacim merkezli kübik (HMK) yapıya sahip sac malzemeler (çelik sac malzemeler) üzerine bükme işlemleri uygulanarak geri ve ileri esneme davranışı ve deformasyon etkisi incelenebilir.
- Endüstride bükme işlemleri neticesinde çatlama ve kırılma meydana gelen X10 ve Hardox serisi sac malzemelerin farklı zımba uç radyüs değerlerinde bükülmesi sonucunda deformasyon alanları incelenerek, meydana gelebilecek çatlak oluşumuna karşı farklı sıcaklıklarda normalizasyon ve gerilim giderme tavlamaları uygulanarak çatlak oluşum ve geri ve ileri esneme oluşum mekanizması incelenebilir.

KAYNAKLAR

- 1. İriç, D., İriç, S. ve Kozan, R. (2013). Sac Şekillendirme Prosesinde Kullanılan Süzdürme Çubuğu Frenleme Kuvvetinin Modellenmesi. *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17(2), 201-205.
- 2. Anket, O., Koruvatan, T. ve Ay, İ. (2011). Sac Malzemelerin Şekillendirilmesinde Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Kullanımı. *Politeknik Dergisi*, 14(1), 39-47.
- 3. Tekaslan, Ö., Gerger, N. ve Şeker, U. (2008). V Bükme Kalıplarında Bakır Sac Malzemelerin Geri Esneme Miktarlarının Tespiti. *Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi,* 23, 201-238.
- 4. Tekaslan, Ö., Seker, U. and Özdemir, A. (2006). Determining Springback Amount of Steel Sheet Metal has 0,5 mm Thickness in Bending Dies. *Materials and Design*, 27, 251-258.
- 5. Tekaslan, Ö., Gerger N. and Şeker, U. (2008). Determination of Spring-Back of Stainles Stel Shet Metal in V Bending Dies. *Materials and Desing*, 29, 1043-1050.
- 6. Tekiner, Z. (2004). An Experimental Study on The Examination of Springback of Sheet Metals with Several Thicknesses and Properties in Bending Dies. *Journal of Materials Processing Technology*, 145, 109-117.
- 7. Özdemir, A. (2010). Sac Metal Ürünlerde Geri Esneme Miktarının Deneysel ve Sonlu Elemanlarla Tespiti, Yapay Sinir Ağlarıyla Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 150-198.
- 8. Işıktaş, A. (2011). Farklı Kalınlıklardaki DKP ve Paslanmaz Sacların Farklı Açılarda Yapılan V-Bükme İşlemindeki Geri Yaylanmalarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 50-57.
- 9. Ötü, R. ve Demirci, H. İ. (2012). 60°'lik V bükme kalıbında AA 5754 ve AL 1050 Sac Malzemelerin Farklı Bükme Metotları Kullanılarak Geri Esneme MiktarlarınınTespiti. International Iron and Steel Symposium, Karabük, 1006-1013.
- 10. Ötü R. ve Demirci H. İ. (2013). Farklı Bükme Yöntemleri Uygulanarak V Bükme Kalıplarında AA 5754-O Sac Malzeme ile Elde Edilen Numunelerin Geri Esneme Miktarının Tespiti. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10, 27-42.
- 11. Toros, S., Kılıç, S. ve Öztürk, F. (2011). The Effects of Material Thickness and Deformation Speed on Springback Behavior of DP600 Steel. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 264, 636-645.
- 12. Öztürk, F., Toros, S. ve Kılıç, S. (2009). Tensile and Spring-Back Behavior of DP600 Advanced High Strength Steel at Warm Temperatures. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 16, 41-46.

- 13. Arslan, B. (2004). Geri Esnemenin Sac Parçaların Biçim Tamlığı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi Uygulamaları ile Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 3-12.
- 14. Yenice, M. (2006). Bükme ile Şekillendirilen Saclarda Geri Yaylanma Davranışının İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 26-31.
- 15. Erhuy, C.G. (2001). Soğuk Haddelenmiş Düşük Karbonlu Çelik Sacların Şekillendirilebilirlik Özelliği ve Mekanik Karakteristikleri, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 210-233.
- 16. Kurumahmut, O. (2009). 22MnB5 Çelik Sacların Elektrikli Isıtma ile Sıcak Şekillendirilmesinin Deneysel Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 100-109.
- 17. Bahloul, R., Ben, E.S. ve Potiron, A. (2006). Optimisation of Springback Predicted by Experimental and Numerical Approach by Using Response Surface Methodology. *Journal of Materials Processing Technology*, 173, 101–110.
- 18. Kahraman, M. (2008). Levha Malzemelerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Geri Esnemesinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 65-72.
- 19. Zang, S.L., Liang, J. and Guo, C. (2007). 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 and Manufacture*, 47, 1791-1797.
- 20. Panthi, S.K., Ramakrishnan, N., Ahmed, M., Singh, S.S. and Goel, M.D. (2010). Finite Element Analysis of Sheet Metal Bending Process to Predict The Springback. *Materials and Design*, 31, 657-662.
- 21. Zhu, Y.X., Liu, Y.L., Yang, H. and Li, H.P. (2012). Development and Application of The Material Constitutive Model in Springback Prediction of Cold-Bending. *Materials and Design*, 42, 245–258.
- 22. Esat, V., Darendeliler, H. and Gökler, M.I. (2002). Finite Element Analysis of Springback in Bending of Aluminium Sheets, *Materials and Design*, 23, 223-229.
- 23. Huang, Y.M. (2007). Finite Element Analysis on The V-Die Coining Bend Process of Steel Metal. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34, 287-294.
- 24. Parsa, M.H., Ahkami, S.N. and Ettehad, M. (2010). Experimental and Finite Element Study on The Spring Back of Double Curved Aluminum/Polypropylene/Aluminum Sandwich Sheet. *Materials and Design*, 31, 4174-4183.
- 25. Huang, S., Zhao, Y.X. and He, C.F. (2014). Shear Fracture of Advanced High Strength Steels. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 21, 938-944.

- 26. Ouakdi, E.H., Louahdi, R., Khirani, D. and Tabourot, L. (2012). Evaluation of Springback Under The Effect of Holding Force and Die Radius in A Stretch Bending test. *Materials and Design*, 35, 106–112.
- 27. Davoodi, B. and Zareh, D.B. (2014). Assessment of Forming Parameters Influencing Spring-Back in Multi-Point Forming Process: A Comprehensive Experimental and Numerical Study. *Materials and Design*, 59, 103-114.
- 28. Moon, Y.H., Kang, S.S., Cho, J. R. and Kim, T.G. (2003). Effect of Tool Temperature on The Reduction of The Springback of Aluminum Sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 132, 365-368.
- 29. Mkaddem, A. and Saidane, D. (2007). Experimental Approach and RSM Procedure on The Examination of Springback in Wiping-Die Bending Processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 189, 325-333.
- 30. Nasrollahi, V. and Arezoo, B. (2012). Prediction of Springback in Sheet Metal Components with Holes on The Bending Area, using Experiments, Finite Element and Neural Networks. *Materials and Design*, 36, 331-336.
- 31. Baseri, H., Bakhshi, J.M. and Rahmani, B. (2011). Modeling of Spring-back in V-Die Bending Process by using Fuzzy Learning Back-Propagation Algorithm. *Expert Systems with Applications*, 38, 8894-8900.
- 32. Kumar, K.D., Appukuttan, K.K., Neelakantha, V.L. and Naik, P.S. (2014). Experimental Determination of Spring back and Thinning Effect of Aluminum Sheet Metal during L-Bending Operation. *Materials and Design*, 56, 613-619.
- 33. Chan, W.W., Chew, H.I, Lee, H.P. and Cheok, B.T. (2004). Finite element analysis of spring-back of V-bending sheet metal forming processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 148, 15-24.
- 34. Liu, G., Lin, Z., Xu, W. and Bao, Y. (2008). Variable Blankholder Force in U-Shaped Part Forming for Eliminating Springback Error. *Journal of Materials Processing Technology*, 120, 259-264.
- 35. Ling, Y.E., Lee, H.P. and Cheok, B.T. (2005). Finite Element Analysis of Springback in L bending of Sheet Metal. *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 296-302.
- 36. Wang, J., Verma, S., Alexander, R. and Gau, J.T. (2008). Springback Control of Sheet Metal Air Bending Process. *Journal of Manufacturing Processes*, 10, 21-27.
- 37. Asgari, S.A., Pereira, M., Rolfe, B.F., Dingle, M. and Hodgson, P.D. (2008). Statistical Analysis of Finite Elemnt Modeling in Sheet Metal Forming and Springback Analysis. *Journal of Meterials Processing Technology*, 203,129-136.
- 38. Fei, D. and Hodgson, P. (2006). Experimental and Numerical Studies of Springback in Air V-Bending Process for Cold Rolled TRIP Steels. *Nuclear Engineering and Design*, 236, 1847-1851.

- 39. Grizelj, B., Cumin, J., Grizelj, D. (2010). Effect of Spring-Back and Spring-Forward in V-die Bending of St1403 Sheet Metal Plates. *Strojarstvo*, 52(2), 181-186.
- 40. Kumar, D.K., Appukuttan, K.K., Neelakantha, V.L. and Padmayya, S.N. (2014). Experimental Determination of Spring back and Thinning Effect of Aluminum Sheet Metal during L-Bending Operation. *Materials and Design*, 56, 613-619.
- 41. Aslan, Y. ve Karaağaç, İ. (2014). V Bükmede Geri Esneme Davranışları. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part: C, Tasarım ve Teknoloji, 2(3), 255-263.
- 42. Thipprakmas, S. and Rojananan, S. (2008). Investigation of spring-go phenomenon using finite element method. *Materials and Design*, 29, 1526-1532.
- 43. Thipprakmas, S. and Phanitwong, W. (2011). Process Parameter Design of Springback and Spring-go in V-Bending Process using Taguchi Technique. *Materials and Design*, 32, 4430-4436.
- 44. Thipprakmas, S. (2010). Finite Element Analysis of Punch Height Effect on V-Bending Angle. *Materials and Design*, 31, 1593-1598.
- 45. Thipprakmas, S. (2011). Finite Element Analysis on The Coined-Bead Mechanism During The V Bending Process. *Materials and Design*, 32, 4909-4917.
- 46. Phanitwong, W. and Thipprakmas, S. (2014). Determination of Coined-Bead Geometry in the V-Bending Process. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 1-10.
- 47. Dilipak, H., Ozdemir, M. and Sarıkaya, M. (2013). Effects of Material Properties and Punch Tip Radius on Spring-Forward in 90° V Bending Processes. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 20, 64-69.
- 48. Ozdemir, M. ve Dilipak, H. (2012). S235JR (1.0038) Sac Malzemeye Uygulanan Isıl İşlemlerin İleri Esneme Miktarına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Ankara, 345-353.
- 49. Bakhshi, J., Rahmani, B., Daeezade, V. and Gorji, A. (2009). The Study of Springback of CK67 Steel Sheet in V-Die and U-Die Bending Processes. *Materials and Design*, 30, 410-2419.
- 50. Shukla, R. and Gautam, V. (2014). Experimental and Numerical Analysis of Negative Spring back in Interstitial Free (IF) Steel. *International Journal of Advance Research and Innovation*, 2, 232-236.
- 51. Özdin, K., Büyük, E., Abdalov, F., Bayram, H. and Çini, A. (2013). Investigation of Spring-back and Spring-go of AISI 400S Sheet Metal in V Bending Dies Depending on Bending Angle and Punch Radius. *Applied Mechanics and Materials*, 532, 549-553.

- 52. Özdemir, M., Dilipak, H., Gökmeşe, H. ve Yılmaz, V. (2014). Farklı Isıl İşlemlerin 16Mo3 (1.5415) Sac Malzemenin İleri-Geri Esneme Miktarına Etkisinin Deneysel ve Mikroyapısal Olarak İncelenmesi. Uluslararasi Mühendislik ve Bilim Alanında Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, 148-155.
- 53. Marciniak, Z., Duncan, J.L. and Hu, S.J. (2002). *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Butterworth-Heinemann: Great Britain, 80-132.
- 54. Zhang, L. and Shi, M.F. (1999). Issues Concerning Material Constitutive Laws and Parameters in Springback Simulations, *Society of Automotive Engineers*, U.S.
- 55. Ling, Y.E., Lee, H.P. and Cheok, B.T. (2005). Finite Element Analysis of Springback in L Bending of Sheet Metal. *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 296-302.
- 56. Esener, E., Fırat, M. ve Yenice, M. (2014). Sac Metal Şekillendirme Proseslerinde Geri Esneme Telafisi. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa, 1-5.
- 57. Uzun, İ. ve Erişkin, Y. (1997). Sac Metal Kalıpçılığı. Milli Eğitim Yayınları: Ankara, 253-286.
- 58. Gomes, C., Onipede, O., and Lovell, M. (2005). Investigation of Springback in High Strength Anisotropic Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 159, 91-98.
- 59. Tiryakioğlu, M.F. (2013). AA 2024 ve AL 5754 Sac Metal Malzemelerde Bükme Esnasında Oluşan Geri Esneme Miktarının Deneysel Verilerle Matematiksel Olarak Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 15-35.
- 60. Livatyalı, H. and Altan, T. (2001). Prediction and Elimination of Springback in Straight Flanging using Computer Aided Design Methods. *Journal of Materials Processing Technology*, 117, 262-268.
- 61. Çapan, L. (1999). Metallere Plastik Şekil Verme. Çağlayan Kitabevi: İstanbul, 13-90.
- 62. Erişkin, Y. (1986). *Uygulamalı Sac Metal Kalıp Konstrüksiyonu*. Gazi Üniversitesi Eğitim Fakültesi Yayınları: Ankara, 73-126.
- 63. Ozdemir, M. (2011). *The Experimental Investigation of Spring-back of S235JR Sheet Metals within Bending Die*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi University Institute of Science and Technology, Ankara, 60-75.
- 64. Gan, W. and Wagoner, R.H. (2004). Die Design Method for Sheet Springback. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46, 1097-1113.
- 65. Ataşimşek, S. (2006). *Plastik ve Metal Kalıpçılık Teknikleri*. Birsen Yayınevi: İstanbul, 196-205.
- 66. Hosford, W.F. (2010). *Mechanical Behavior of Materials* (Second Edition). Cambridge University Press: New York, 302-307.

- 67. İnternet:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fmuhendishane.org% 2Fkutuphane%2Fmalzemelerin-mekanik-davranisi%2Fbauschinger-etkisi%2F&date= 2015-01-10. Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.
- 68. Gau, J.T., Principe, C. and Yu, M. (2007). Springback Behavior of Brass in Micro Sheet Forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 191, 7-10.
- 69. Özçatalbaş, Y. (2008). *Mekanik Metalurji-II Ders Notları*. Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi: Ankara, 31-35.
- 70. Gülmez, T., MAK351 İmal Usulleri.http://web.itu.edu.tr/ gulmezt /IMAL %20 USULLERI/ch04-PSV%20Esaslari.pdf.2015-01-10.<u>http://www.webcitation.org/query</u> ?url=http%3A%2F%2Fweb.itu.edu.tr%2Fgulmezt%2FIMAL%2520USULLERI%2Fc h04-PSV%252 0 Esaslari.pdf&date= 2015 -01-10. Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.
- 71. Schuler. (1998). *Metal Forming Handbook*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 10-40.
- 72. Uzun, İ. ve Erişkin, Y. (1997). Sac Metal Kalıpçılığı. Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları: Ankara, 253-286.
- 73. Onaran, K. (2006). Malzeme Bilimi. Bilim Teknik Yayınevi: Eskişehir, 184-255.
- 74. Özaltın, Ö.E. (2006). *Malzeme biliminde Animasyon Uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 75-95.
- 75. Ergun, C., Malzeme bilimi Ders Notlari, İstanbul Teknik Üniversitesi: İstanbul, 40-59
- 76. Varol, H. (2008). *Av ve Spor Tüfeklerin için kritik Parçaların Hasar Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 43-45.
- 77. Erdoğan, M. (1998). *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri*. Nobel yayıncılık: Ankara, 95-110.
- 78. Callister, W.D. ve Rethwisch, D.G. (2013). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği* (Çev. Genel, K.). Ankara: Nobel Yayıncılık. (Eserin orijinali 2010'da yayımlandı), 150-170.
- 79. Erhuy, C.G., Yürci, M.E. ve Altan, T. (2009). Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımlı Bir Çelik Sacda Tek Eksenli Çekme Sonrası Yük Boşalmada Ölçülen Efektif Modülün Geri Esneme Tahminlerine Yönelik Kullanılması. 11. Otomotiv Sempozyumu 'Kalıpçılık ve Tasarım', Bursa, 1-10.
- 80. İnternet: http://akgunalsaran.com/doc/7-deformasyon-3808.pdf. 2015-01-10. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fakgunalsaran.com%2Fdoc% 2F7-deformasyon-3808.pdf&date=2015-01-10. Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.

- 81. Yıldız, F. Plastik Şekil Verme. http://cms2501.ismodu.com/ Content/Yuklemeler/ Personel /Fatih_YILDIZ/ Plastik_Sekil_Verme-5124.pdf. 2015-01-10. URL: http:// www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fcms2501.ismodu.com%2FContent %2FYuklemeler%2FPersonel%2FFatih_YILDIZ%2FPlastik_Sekil_Verme-5124.pdf &date = 2015 -01-10. Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.
- 82. Güral, A. (2010). *Malzeme Bilgisi Ders Notları*. Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi: Ankara, 45-65.
- 83. Yeşil, H. (2003). Düsük Karbonlu Çelik Malzemelerde Haddeleme Yön ve Miktarının İşlenebilirlik Üzerine Etkileri, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-80.
- 84. Nix, W.D., Gibeling, J.C. and Hughes, D.A. (1985). Time-Dependent Deformation of Metals, *Metallurgical Transactions A*, 16, 2215-2226.
- Internet:http://eng.harran.edu.tr/moodle/moodledata/152/Ders_Notlari/6.ders/6._DER S.pptx.2015-01-10.URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2F85. %09 http %3A%2F%2Feng.harran.edu.tr%2Fmoodle %2Fmoodledata %2F152 % 2F DersNotlari%2F6.ders%2F6._DERS.pptx&date=2015-01-10.Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.
- 86. Davis, J.R. (1998). *Metals Handbook Desk Edition* (2. Edition). Taylor and Francis: ASM International, 197-199.
- 87. Anık S. (1993). Malzeme Bilgisi ve Muayenesi (4. Baskı). Birsen Yayınevi: İstanbul, 339-340.
- 88. İnternet: http://perweb.firat.edu.tr/personel/yayinlar/fua_380/380_74054.pptx.2015-01
 -10.URL:<u>http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fperweb.firat.edu.tr</u>
 <u>%2Fpersonel%2Fyayinlar%2Ffua_380%2F380_74054.pptx&date=2015-01-10</u>. Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.
- 89. İnternet: http://www2.cbu.edu.tr/salim.sahin/makine/malzeme_secimi/dersnotlari/4_ ders.pdf. 2015-01-10. URL: <u>http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2</u> <u>Fwww2.cbu.edu.tr%2Fsalim.sahin%2Fmakine%2Fmalzeme_secimi%2Fdersnotlari</u> <u>%2F4_ders.pdf&date=2015-01-10</u>. Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.
- 90. Eryürek, B. (1993). Hasar Analizi. Birsen Yayınevi: İstanbul, 150-171.
- 91. Şahin, Y. (2003). İmal Usulleri. Gazi Kitapevi: Ankara, 81-100.
- 92. Zamanzadeh, M., Larkin, E. and Gibbon, D. (2004). A Re-Examination of Failure Analysis and Root Cause Determination. Matco Associates: Pittsburgh. 10-30.
- 93. Anık, S. (1999). *Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri*. Birsen Yayınevi: İstanbul, 80-120.
- 94. Demir, A. (2013). Malzeme Bilimi Ders Notları. Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi: İstanbul, 5-30.

- 95. İnternet:<u>http://www.haddemetal.com/tr/Download/Alasim%20Elementlerinin%20</u> Celigin%20Yapisina%20Etkisi.pdf.2015-01-10.URL: <u>http://www_webcitation_org/</u> <u>query?url =http%3A_%2F%2Fwww.haddemetal.com_%2Ftr%2FDownload_%2_F</u> <u>Alasim%2520Elementlerinin%2520Celigin%2520Yapisina%2520Etkisi.pdf&date=20</u> <u>15-01-10</u>. Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.
- 96. İnternet: http://www.mert-celik.com/pdf/celikte_alasim_elementleri.pdf. 2015-01-10. URL:<u>http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.mert-celik.com</u> <u>%2Fpdf%2Fcelikte_alasim_elementleri.pdf&date=2015-01-10</u>. Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.
- 97. Şahin, N. (2003). Malzeme Bilgisi. Kozan Ofset: Ankara, 105-108.
- 98. İnternet: http://www.atacelik.com/etkileri.html. 2015-01-10. URL: <u>http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.atacelik.com%2Fetkileri.html&dat</u> <u>e=2015-01-10</u>. Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.
- 99. İnternet: http://www.netdemircelik.com.tr/ozellik.html. 2015-01-10. URL: <u>http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.netdemircelik.com.tr%2Foze</u><u>llik.html&date=2015-01-10</u>. Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.
- 100. Köse, S. ve Sakin, R. (2010). AISI-1040 ve AISI -P20 Çeliklerde Alaşım Oranları ve Mikro Yapının Sertleşme Kabiliyetine Etkisi. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir, 170-182.
- 101. Gürü, M. ve Yalçın, H. (2012). *Malzeme Bilgisi* (3. Baskı). Palme Yayıncılık: Ankara, 175-1 90.
- 102. Can, A.Ç. (2010). *Tasarımcı Mühendisler İçin Malzeme Bilgisi*. Birsen Yayınevi: İstanbul, 8-231.
- 103. İnternet: <u>http://www.turkercelik.com/en/default.asp?turker=aece&pg2=Ala%FE%</u>F Dm-Elementlerinin-%C7eli%F0e-Etkisi&pg=Technical-Information. 2015-01-10. URL:<u>http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.turkercelik.com %2Fen%2Fdefault.asp%3Fturker%3Daece%26pg2%3DAla%25FE%25FDm-Elementlerinin-%25C7eli%25F0e-Etkisi%26pg%3DTechnical-Information &dat e= 2015-01-10. Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.
 </u>
- 104. Tayanç, M., Zeytin, G. (2000). Yüksek Hız Çeliklerinin İç Yapı ve Isıl İşlem Özellikleri, *Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2,* 103-122.
- 105. Kuş, R. (2007). Düşük Karbonlu Çelik Tel Takviyeli Kır Dökmedemir Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 30-40.
- 106. İnternet:http://www.endertav.com.tr/doc/CELIKLER-VE-CELIKLERIN-ISIL-ISLEMI.docx. 2015-01-10. URL: <u>http://www.webcitation.org /query? url= http %3</u> <u>A%2F% 2Fwww. Ender tav.com.tr%2Fdoc%2FCELIKLER-VE-CELIKLERIN-ISIL</u> <u>-ISLEMI .docx& date=2015-01-10</u>. Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.

- 107. İnternet: http://www.nilisil.com.tr/TknkIsilIslem.htm. 2015-01-10. URL: <u>http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.nilisil.com.tr %2F Tknk Isil Islem.htm&date=2015-01-10</u>. Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.
- 108. Topbaş, M.A. (1998). Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı. Prestij Yayıncılık: İstanbul, 28-80.
- 109. Novikov, İ.İ. (2012). *Metallerin Isıl İşlem Teorisi* (çev. Galip Said). Ankara, Nobel Yayıncılık. (Eserin orijinali 1986'da yayımlandı). 20-264.
- 110. Erişir, E. (2013). *Fiziksel Metalurji Ders Notları*. Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi: Kocaeli, 1-49.
- 111. İnternet: <u>http://muhendislik.istanbul.edu.tr/metalurji/wp-content/</u> uploads/ 2013/09 /cii.pdf. 2015-01-10. URL: <u>http://www.webcitation.org/query? url=http %3A %2F %</u> <u>2Fmuhendislik.istanbul.edu.tr%2Fmetalurji%2Fwp-content %2Fuploads %2F2013</u> <u>%2F09%2Fcii.pdf&date=2015-01-10</u>. Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.
- 112. İnternet: http://rahmiunal.net/dersler/heattreat/heatt.pdf. 2015-01-10. URL: <u>http</u> ://www. web citation. org/query?url=http%3A%2F%2Frahmiunal.net%2 F ders ler %2Fheattreat % 2 Fheatt.pdf&date=2015-01-10. Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.
- 113. Güral, A. (2010). *Isıl İşlem Ders Notları*, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi: Ankara, 3-30.
- 114. Harman, F.M. (2003). *Çeliğin Isıl İşleminin Teorik ve Pratik Esasları*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 40-45.
- 115. İnternet: www.kalipteknolojisi.com. 2015-01-10. URL: <u>http://www.webcitation. Org</u> /query?url=http%3A%2F%2Fwww.kalipteknolojisi.com&date=2015-01-10. Son Erişim Tarihi: 10.01.2015.
- 116. Savaşkan, T. (1999). Malzeme Bilgisi ve Muayenesi. Derya Kitabevi: Trabzon, 213-271.
- 117. Güleç, Ş. ve Aran, A. (1987). *Malzeme Bilgisi* (Cilt 2). TUBİTAK Yayını: Gebze, 40-120.
- 118. Türk, A., Şahin, S. ve Durmuş, H. (2013). *Malzeme Laboratuvarı Ders Notları*. Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi: Manisa, 2-5.
- 119. Rajan, T.V., Sharma, C.P. and Sharma, A. (2012). *Heat treatment Principles and Techniques* (Second Edition). PHI Learning Private Limited: Sonepat, 49-80.
- 120. Topbaş, M.A. (1992). Çeliğin Isıl İşlemi. Damla Matbaacılık: İstanbul, 101-200.
- 121. Topbaş, M.A. (1998). Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı. Ekim Ofset Yayınları: İstanbul, 50-95.

- 122. Özdamar K. (1999). Paket Programları ile İstatistiksel Veri Analizi (2. Baskı). Kaan Kitabevi: Eskişehir, 200-265.
- 123. Yavuz, S. (2009). Hataları Ardışık Bağımlı (Otokorelasyonlu) Olan Regresyon Modellerinin Tahmin Edilmesi, *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 23, 123-130.
- 124. Montgomery, D.C. (1999). Experimental Design for Product and Process Design and Development, *The Statistician*, 49, 159-177.
- 125. Orhunbilge, N. (2000). Örnekleme Yöntemleri ve Hipotez Testleri. Avcıol Basım Yayın: İstanbul, 100-300.
- 126. Hayran M. ve Özdemir O. (1996). *Bilgisayar İstatistik ve Tıp* (2. Baskı). Hekimler Yayın Birliği: Ankara, 309-314.
- 127. Erbaş, S.O., Olmuş, H. (2000). *Deney Düzenleri ve İstatistik Analizleri*. Gazi Kitabevi: Ankara, 40-100.
- 128. Atkins, B.S, Fim, B.M. (1980). Atlas of Continuous Cooling Transformation Diagrams for Engineering Steels. British Steel Corporation: Sheffield, 55-60.
- 129. Tiryaki, A., Şahin, Ş., Kazan, R. ve Fırat, M. (2006). Sac Metalleri Bükme İşleminde Geri Esneme Açısının Yapay Sinir Ağları İle Kestirimi. 11 th. Conference for Computer-Aided Engineering and System Modeling, Metal Forming, 8-16.
- 130. Özdemir, M., Gökmeşe, H., Dilipak, H. ve Yılmaz, V. (In Press). Characterization of Microstructure and Bending Response of Sheet Material: Influence of Thickness. *Journal of Advanced Materials and Processing*, 1-10.
- 131. Movahed, P., Kolahgar, S., Marashi, S.P.H., Pouranvari, M. and Parvin, N. (2009). The Effect of Intercritical Heat Treatment Temperature on The Tensile Properties and Work Hardening Behavior of Ferrite–Martensite Dual Phase Steel Sheets, *Materials Science and Engineering: A*, 518, 1-6.
- 132. Hosford, W. and Caddell, R.M. (2007). *Metal Forming* (Third Edition), Cambridge University Press: United States of America, 17-40.
- 133. Barret, C.S. (1952). *Metallurgy and Metallurgical Engineering Series* (Second Edition). Mcgraw-Hill Book Company: London, 442-460.
- 134. Krauss, G. (1997). Steel; *Heat Treatment and Processing Princeples*. Materials Park: Ohio, 80-300.
- 135. Yi, H.K., Kim, D.W., Van Tyne, C.J. and Moon, Y.H. (2008). Analytical prediction of springback based on residual differential strain during sheet metal bending. *Journal of Mechanical Engineering Sciences*, 222, 117-129.

- 136. Livatyalı, H. and Altan, T. (2001). Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer aided design methods Part 1: Experimental investigations. *Journal of Materials Processing Technology*, 117, 262-268.
- 137. Hu, W., Yao, L.G. and Hua, Z.Z. (2008). Optimization of Sheet Metal Forming Processes by Adaptive Response Surface Based on Intelligent Sampling Method. *Journal of Materials Processing Technology*, 197, 77-88.
- 138. Kim, H.S. and Koç, M. (2008). Numerical Investigations on Springback Characteristics of Aluminum Sheet Metal Alloys in Warm Forming Conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 204, 370-383.
- 139. Yıldırım, M.M., Doğantan, Z.S., Pakdil, M. ve Cakan, A. (2001). Mühendislik Malzemeleri-I, Mustafa Kemal Üniversitesi Yayınları: İskenderun, 110-116.
- 140. Gül, F. (2012). Uygulanan Yükün 1.3343 Yüksek Hız Çeliği Malzemelerin Abrasif Aşınma Direncine Etkisi. International Iron and Steel Symposium, 603-610.
- 141. Kesti, E. (2009). *Ç-4140 Çeliğinin, Mikro Yapı Ve Mekanik Özelliklerine Su Verme Ortamının Etkilerinin Araştırılması,* Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 20-50.
- 142. Kalpakjian, S. (2000). *Manufacturing Engineering and Technolog*. Prentice Hall: A.B.D., 120-148.
- 143. Totten, G.E. and Howes, M.A.H.H. (1997). Steel Heat Treatment Handbook, Marcel, Dekker: New York, 93-180.
- 144. Kayalı, E.S. ve Ensari, C. (2000). *Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları*. İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları: İstanbul, 10-60.
- 145. Dieter G.E. (2003). Workability Testing Tecniques. ASM International: Ohio, 10-50.
- 146. Sudhakar, K.V. (2000). Fatigue of A High Density Powder Metallurgy Steel. *International Journal of Fatigue*. 22, 729-734.
- 147. Türkan, M. (2010). Difüzyon Bağlı Demir Esaslı Tozlarından Üretilen T/M Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Farklı Ara Kritik Tavlama Isıl İşlemlerin Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 88-95.
- 148. Salamcı, E. ve Kabakçı, F. (2011). Çift Fazlı Çeliğin Çekme Özelliklerine Mikro yapının Etkisi. *Gazi Üniversitesi. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26, 263-272.
- 149. Steinbrunner, D.L., Matlock, D.K. and Krauss, G. (1988). Void Formation During Tensile Testing of Dual Phase Steels. *Metallurgical Transaction A*, 19, 579-589.

- 150. Sarwar, M., Ahmad, E., Qureshi, K.A. and Manzoor, T. (2007). Influence of Epitaxial Ferrite on The Tensile Properties of Dual Phase Steel. *Materials and Design*, 28, 335-340.
- 151. Erdoğan, M. (2002). The Effect of New Ferrite Content on The Tensile Fracture Behaviour of Dual Phase Steels. *Journal of Materials Science*, 37, 3623-3630.
- 152. Carden, W.D., Geng, L.M., Matlock, D.K. and Wagoner, R.H. (2002). Measurement of Springback. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44, 79-101.
- 153. Yağmur, L. ve Gülmez, T. (2007). Malzeme Özelliklerinin Anelastik Davranışa Etkileri, *İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi*, 6, 99-109.
- 154. Totten, G.E. (2006). *Steel Heat Treatment-Metallurgy and Technologies*. CRC Press: Boca Raton, 172-174.
- 155. Branko, G., Josip, C. and Dejan, G. (2010). Effect of spring-back and spring-forward in V-die bending of St1403 sheet metal plates. *Journal for Theory and Application in Mechanical Engineering*, 52, 181-186.
- 156. Choi, S.H. and Chin, K.G. (2006). Prediction of Spring-back Behavior in High Strength Low Carbon Steel Sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 171, 385-392.
- 157. Imai, K., Koyama, J. and Jin, Y. (2008). High-Accuracy V-Bending System by Real Time Identifying Material Property. *Journal of Materials Processing Technology*, 201, 193-197.
- 158. Leu, D.K. and Hsieh, C.M. (2008). The Influence of Coining Force on Spring-back Reduction in V-Die Bending Process. *Journal Materials Processing Technology*, 196, 230-235.
- 159. Öztürk, F., Toros, S., Esener, E. ve Uysal, E. (2009). Otomotiv Endüstrisinde Yüksek Mukavemetli Çeliklerinin Kullanımının İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 50, 44-49.
- 160. Turan, S.E. (2009). Düz kenar bükme ve döner kalıpla kenar bükme işlemlerinin geri yaylanma üzerine etkilerinin deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 3-12.
- 161. Sarıkaya, O. (2008). Analysis of Heat Treatment Effect on Springback in V-Bending. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 50-58
- 162. Gan, W. and Wagoner, R.H. (2004). Die Design Method for Sheet Springback. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46, 1097-1113.
- 163. Xu, W.L., Ma, C.H., Li, C.H. and Feng, W.J. (2004). Sensitive Factors in Springback Simulation for Sheet Metal Forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 151, 217-222.

EKLER



Resim 1.1. 3 ve 5 mm kalınlığındaki sac malzemenin sertifikası



Resim 1.2. 4 ve 6 mm kalınlığındaki sac malzemenin sertifikası

EK-1. (devam) Sac malzeme sertifikaları



Resim 1.3. Sac malzemelerin test sonuçları-1

EK-1(b). Test sonuçları-1



Resim 1.4. Sac malzemelerin test sonuçları-1



Resim 1.5. Sac malzemelerin kimyasal analizleri-1



Resim 1.5. Sac malzemelerin kimyasal analizleri-2

| NI | S | Fe | С | Si | Mn | Р | S | Mg | Cr |
|----|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 41228 | 0,138 | 0,253 | 0,776 | 0,012 | 0,007 | 0,003 | 0,059 |
| | 4 | 40775 | 0,136 | 0,254 | 0,774 | 0,012 | 0,006 | 0,003 | 0,059 |
| | 5 | 41974 | 0,107 | 0,233 | 0,669 | 0,010 | 0,007 | 0,001 | 0,013 |
| | 6 | 43522 | 0,126 | 0,237 | 0,669 | 0,010 | 0,008 | 0,002 | 0,013 |
| | S | Ni | Mo | Cu | Ti | V | Nb | W | Co |
| | 3 | 0,063 | 0,297 | 0,048 | 0,004 | 0,019 | 0,001 | 0,012 | 0,016 |
| | 4 | 0,062 | 0,296 | 0,049 | 0,004 | 0,020 | 0,001 | 0,010 | 0,015 |
| | 5 | 0,014 | 0,313 | 0,028 | 0,002 | 0,010 | 0,001 | 0,013 | 0,002 |
| | 6 | 0,015 | 0,315 | 0,015 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,010 | 0,003 |
| MI | S | Fe | С | Si | Mn | Р | S | Mg | Cr |
| | 3 | 41640 | 0,079 | 0,246 | 0,754 | 0,007 | 0,008 | 0,003 | 0,070 |
| | 4 | 42922 | 0,053 | 0,246 | 0,757 | 0,007 | 0,008 | 0,003 | 0,070 |
| | 5 | 42521 | 0,034 | 0,230 | 0,611 | 0,009 | 0,004 | 0,004 | 0,035 |
| | 6 | 43659 | 0,036 | 0,228 | 0,615 | 0,008 | 0,005 | 0,004 | 0,036 |
| | S | Ni | Mo | Cu | Ti | V | Nb | W | Co |
| | 3 | 0,057 | 0,279 | 0,029 | 0,003 | 0,014 | 0,001 | 0,011 | 0,014 |
| | 4 | 0,057 | 0,277 | 0,017 | 0,003 | 0,008 | 0,001 | 0,008 | 0,015 |
| | 5 | 0,044 | 0,255 | 0,047 | 0,003 | 0,008 | 0,001 | 0,012 | 0,007 |
| | 6 | 0,046 | 0,254 | 0,037 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,013 | 0,007 |

Çizelge 2.1. Isıl işlem sonrası spektral analiz





EK-3. (devam) Bükme kalıbı ve elemanları















EK-3. (devam) Bükme kalıbı ve elemanları



EK-4. 30° bükülmüş II, NI ve MI malzemelerin mikro yapı resimleri

Resim 4.1. 4 mm kalınlığındaki sac malzemelerin mikro yapı resimleri; a) II, b) NI, c) MI



EK-4. (devam) 30° bükülmüş II, NI ve MI malzemelerin mikro yapı resimleri

Resim 4.2. 5 mm kalınlığındaki sac malzemelerin mikro yapı resimleri; a) II, b) NI, c) MI



EK-4. (devam) 30° bükülmüş II, NI ve MI malzemelerin mikro yapı resimleri

Resim 4.3. 6 mm kalınlığındaki sac malzemelerin mikro yapı resimleri; a) II, b) NI, c) MI



EK-5. 60° bükülmüş II, NI ve MI malzemelerin mikro yapı resimleri

Resim 5.1. 3 mm kalınlığındaki sac malzemelerin mikro yapı resimleri; a) II, b) NI, c) MI


EK-5. (devam) 60° bükülmüş II, NI ve MI malzemelerin mikro yapı resimleri

Resim 5.2. 4 mm kalınlığındaki sac malzemelerin mikro yapı resimleri; a) II, b) NI, c) MI



EK-5. (devam) 60° bükülmüş II, NI ve MI malzemelerin mikro yapı resimleri

Resim 5.3. 5 mm kalınlığındaki sac malzemelerin mikro yapı resimleri; a) II, b) NI, c) MI



EK-6. 90° bükülmüş II, NI ve MI malzemelerin mikro yapı resimleri

Resim 6.1. 3 mm kalınlığındaki sac malzemelerin mikro yapı resimleri; a) II, b) NI, c) MI



EK-6. (devam) 90° bükülmüş II, NI ve MI malzemelerin mikro yapı resimleri

Resim 6.2. 4 mm kalınlığındaki sac malzemelerin mikro yapı resimleri; a) II, b) NI, c) MI



EK-6. (devam) 90° bükülmüş II, NI ve MI malzemelerin mikro yapı resimleri

Resim 6.3. 6 mm kalınlığındaki sac malzemelerin mikro yapı resimleri; a) II, b) NI, c) MI



EK-7. II, NI ve MI malzemelerin çekme deney sonuçları

Resim 7.1. Sac malzemelerin çekme deney sonuçları; a) II, b) NI, c) MI



EK-7. (devam) II, NI ve MI malzemelerin çekme deney sonuçları

Resim 7.2. Sac malzemelerin çekme deney sonuçları; a) II, b) NI, c) MI

| 30° Isil | işlemsiz | z bükme | işlemind | e zımba | bekletiln | neden ya | pılan der | neyler | | | |
|----------|----------|---------|----------|---------|-----------|----------|-----------|--------|-------|-------|------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort |
| 3 | 30,3 | 30,1 | 30,35 | 30,37 | 30,55 | 30,08 | 30,3 | 30,58 | 31,19 | 30,42 | 0,42 |
| 4 | 30,69 | 30,5 | 30,5 | 30,46 | 31,1 | 30,55 | 30,15 | 30,18 | 31,02 | 31,2 | 0,63 |
| 5 | 31,4 | 31,2 | 30,5 | 31,1 | 31,2 | 31,25 | 31,22 | 31,22 | 31,46 | 31,02 | 1,16 |
| 6 | 31,14 | 31,45 | 31,2 | 31,46 | 31,2 | 31,25 | 31,45 | 31,02 | 31,2 | 31,15 | 1,25 |

| EK-8. Deney sonuçları ve esneme değerlerinin aritm | etik ortalamaları |
|--|-------------------|
|--|-------------------|

| 30° Isil | işlemsiz | z bükme | işlemind | e zımba | 30 sn bel | kleyerek | | | | | |
|----------|----------|---------|----------|---------|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort |
| 3 | 30,02 | 30,37 | 30,17 | 30,28 | 30,54 | 30,22 | 30,25 | 30,25 | 29,06 | 30,35 | 0,15 |
| 4 | 30,06 | 30,45 | 30,20 | 30,13 | 30,11 | 30,37 | 30,30 | 30,25 | 30,06 | 30,5 | 0,24 |
| 5 | 31,08 | 31,48 | 30,32 | 31,05 | 31,25 | 31,16 | 31,26 | 31,29 | 31,3 | 31,15 | 1,13 |
| 6 | 31,18 | 31,15 | 31,14 | 31,05 | 31,15 | 31,1 | 31,55 | 31,08 | 31,35 | 31,1 | 1,19 |

| 30° Nor | malizas | yon işler | ninde zu | nba bekl | etilmede | n yapılaı | n deneyle | er | | | |
|---------|---------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-------|-------|-------|------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort |
| 3 | 31,1 | 31,08 | 30,15 | 31,08 | 31,3 | 31,01 | 31,02 | 30,58 | 31,3 | 31,15 | 0,98 |
| 4 | 31,2 | 31,05 | 31,3 | 31,15 | 31,2 | 31,1 | 30,28 | 31,15 | 31,34 | 31,2 | 1,1 |
| 5 | 30,3 | 31,58 | 31,49 | 31,15 | 32,21 | 31,4 | 32,36 | 31,12 | 33,1 | 31,51 | 1,62 |
| 6 | 31,09 | 32,15 | 32,16 | 31,4 | 32,12 | 31,45 | 32,1 | 32,02 | 32,01 | 32,12 | 1,86 |

| 30° No | rmaliza | syon işle | minde zi | mba 30 s | sn bekley | verek | | | | | |
|--------|---------|-----------|----------|----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort |
| 3 | 30,2 | 30,4 | 31,22 | 31,1 | 31,1 | 31,2 | 30,25 | 30,32 | 31,2 | 31,05 | 0,8 |
| 4 | 30,45 | 31,25 | 31,13 | 31,25 | 31,22 | 31,18 | 30,52 | 30,35 | 30,45 | 30,62 | 0,84 |
| 5 | 31,26 | 31,36 | 30,64 | 32,25 | 31,3 | 31,51 | 31,52 | 30,52 | 30,37 | 31,42 | 1,21 |
| 6 | 31,05 | 31,22 | 31,37 | 31,4 | 31,24 | 31,1 | 31,4 | 32,05 | 31,44 | 31,49 | 1,38 |

| 30° Mer | nevişler | ne işlemi | inde zıml | ba beklet | ilmeden | yapılan o | leneyler | | | | |
|---------|----------|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort |
| 3 | 27,48 | 26,1 | 26,48 | 24,02 | 27,08 | 25,45 | 26,3 | 27,2 | 27,59 | 26,51 | -3,58 |
| 4 | 27,02 | 27,02 | 26,02 | 26,43 | 26,24 | 27,21 | 26,4 | 26,05 | 26,3 | 27,02 | -3,43 |
| 5 | 28,9 | 28,8 | 28,88 | 28,71 | 28,65 | 28,87 | 28,98 | 28,95 | 28,6 | 28,85 | -1,18 |
| 6 | 28,77 | 29,75 | 28,75 | 29,71 | 28,95 | 28,86 | 28,83 | 29,83 | 28,65 | 29,01 | -0,88 |

| 30° Me | nevişler | ne işlemi | inde zıml | ba 30 sn | bekleyer | ek | | | | | |
|--------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort |
| 3 | 29,05 | 27,2 | 28,4 | 27,15 | 28,22 | 28,15 | 28,42 | 28,42 | 28,08 | 28,05 | -1,89 |
| 4 | 29,53 | 27,45 | 27,43 | 28,1 | 28,05 | 27,39 | 28,02 | 28,35 | 28,47 | 29,06 | -1,81 |
| 5 | 29,98 | 28,68 | 28,7 | 28,96 | 28,75 | 28,69 | 28,81 | 29,99 | 28,95 | 29,24 | -0,94 |
| 6 | 28,8 | 28,65 | 29,76 | 28,9 | 29,15 | 29,53 | 29,75 | 28,8 | 29,78 | 29,28 | -0,74 |

| 60° Isıl | işlemsiz | z bükme | işlemind | le zımba | bekletiln | neden ya | pılan der | neyler | | | |
|----------|----------|---------|----------|----------|-----------|----------|-----------|--------|-------|-------|------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort |
| 3 | 62,36 | 62,4 | 61,28 | 62,1 | 62,2 | 62,33 | 61,4 | 61,48 | 62,5 | 62,15 | 2,02 |
| 4 | 61,48 | 62,05 | 61,24 | 62,4 | 62,1 | 62,24 | 62,12 | 62,5 | 62,08 | 61,39 | 1,96 |
| 5 | 62,45 | 61,35 | 62,45 | 61,45 | 62,28 | 62,08 | 62,1 | 61,19 | 61,54 | 61,5 | 1,84 |
| 6 | 61,34 | 61,56 | 61,44 | 61,02 | 61,25 | 60,4 | 61,25 | 62,02 | 61,03 | 60,49 | 1,18 |

EK-8. (devam) Deney sonuçları ve esneme değerlerinin aritmetik ortalamaları

| 60° Isıl | işlemsiz | z bükme | işlemind | le zımba | 30 sn bel | kleyerek | yapılan | deneyler | | | |
|----------|----------|---------|----------|----------|-----------|----------|---------|----------|-------|-------|------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort |
| 3 | 62,08 | 62,15 | 61,58 | 61,16 | 61,48 | 61,5 | 62,35 | 62,3 | 62,12 | 62,1 | 1,88 |
| 4 | 61,35 | 62,2 | 62,06 | 62,08 | 61,32 | 61,5 | 61,34 | 62,4 | 62,32 | 61,38 | 1,8 |
| 5 | 61,2 | 61,3 | 61,45 | 62,5 | 62,18 | 62,1 | 61,52 | 61,14 | 61,48 | 62,25 | 1,71 |
| 6 | 61,28 | 61,4 | 61,36 | 60,2 | 60,54 | 61,44 | 61,1 | 60,46 | 60,5 | 60,55 | 0,88 |

| 60° Nor | malizas | yon işler | ninde zu | nba bekl | etilmede | n yapılaı | n deneyle | r | | | |
|---------|---------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-------|-------|-------|------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort |
| 3 | 63,55 | 62,28 | 62,42 | 62,2 | 63,5 | 63,1 | 62,38 | 61,5 | 62,35 | 63,15 | 2,64 |
| 4 | 64,08 | 60,3 | 62,25 | 62,33 | 61,3 | 63,15 | 61,26 | 63,2 | 61,24 | 62,58 | 2,17 |
| 5 | 62,2 | 62,05 | 61,52 | 61,56 | 63,15 | 61,5 | 62,16 | 62,26 | 62,5 | 62,42 | 2,13 |
| 6 | 62,1 | 62,4 | 61,35 | 62,08 | 62,2 | 62,15 | 62,1 | 62,3 | 62,02 | 62,35 | 2,11 |

| 60° Nor | malizas | yon işler | ninde zu | nba 30 s | n bekley | erek yap | ılan dene | yler | | | |
|---------|---------|-----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-------|-------|-------|------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort |
| 3 | 62,53 | 63,15 | 63,25 | 62,34 | 61,45 | 61,55 | 61,37 | 62,18 | 62,39 | 61,45 | 2,17 |
| 4 | 62,18 | 62,22 | 62,51 | 62,2 | 62,04 | 62,41 | 61,35 | 62,18 | 62,42 | 62,08 | 2,16 |
| 5 | 62,5 | 62,05 | 61,46 | 62,26 | 62,34 | 62,14 | 62,32 | 62,32 | 62,38 | 61,43 | 2,12 |
| 6 | 61,3 | 62,5 | 61,56 | 62,34 | 62,3 | 61,85 | 62,48 | 61,48 | 62,5 | 62,52 | 2,08 |

| 60° Me | nevişlem | ne işlemi | nde zımt | a beklet | ilmeden | yapılan o | leneyler | | | | |
|--------|----------|-----------|----------|----------|---------|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort |
| 3 | 56,05 | 56,36 | 57,42 | 56,33 | 57,08 | 56,02 | 55,27 | 56,32 | 55,57 | 55,35 | -3,82 |
| 4 | 57,28 | 58,32 | 56,4 | 58,56 | 58,38 | 58,15 | 58,47 | 58,22 | 57,3 | 58,35 | -2,06 |
| 5 | 57,79 | 58,65 | 58,54 | 58,23 | 57,8 | 58,55 | 57,67 | 58,85 | 57,9 | 58,55 | -1,74 |
| 6 | 58,6 | 58,46 | 58,77 | 59,34 | 58,98 | 59,94 | 58,75 | 59,46 | 58,91 | 59,5 | -0,93 |

| 60° Me | enevişlem | ne işlemi | nde zımt | a 30 sn l | bekleyer | ek yapıla | n deney | ler | | | |
|--------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|---------|-------|-------|-------|-------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort |
| 3 | 57,13 | 57,5 | 56,09 | 59,56 | 57,2 | 55,3 | 56,32 | 57,36 | 57,21 | 56,4 | -2,99 |
| 4 | 58,45 | 59,4 | 59,56 | 58,25 | 59,5 | 58,3 | 58,56 | 59,48 | 59,45 | 58,27 | -1,08 |
| 5 | 58,5 | 59,15 | 59,56 | 58,6 | 59,7 | 59,9 | 58,53 | 58,43 | 59,5 | 59,48 | -0,87 |
| 6 | 59,98 | 59,5 | 57,75 | 58,9 | 58,56 | 58,45 | 59,76 | 59,95 | 59,9 | 59,88 | -0,74 |

| 90° Isil | işlemsiz | z bükme i | işleminde | e zimba t | oekletilm | eden yap | olan den | eyler | | | |
|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-------|-------|-------|------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort. |
| 3 | 91,84 | 91,58 | 91,6 | 91,47 | 91,55 | 91,89 | 91,85 | 91,64 | 91,64 | 91,6 | 1,67 |
| 4 | 91,69 | 91,65 | 91,29 | 91,45 | 91,94 | 91,68 | 90,76 | 91,53 | 91,48 | 91,82 | 1,53 |
| 5 | 90,46 | 90,58 | 91,67 | 91,12 | 91,3 | 91,15 | 91,56 | 90,5 | 89,05 | 91,11 | 1,05 |
| 6 | 91,34 | 89,16 | 90,45 | 91,5 | 90,4 | 89,21 | 90,5 | 91,05 | 90,42 | 91,4 | 0,88 |

| EK-8. (devam) | Deney sonuçları | ve esneme değerlerinin | aritmetik ortalamaları |
|---------------|-----------------|------------------------|------------------------|
|---------------|-----------------|------------------------|------------------------|

| 90° Isıl | işlemsiz | 90° Isıl işlemsiz bükme işleminde zımba 30 sn bekleyerek yapılan deneyler | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--|--|--|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort. | | | |
| 3 | 91,61 | 91,9 | 91,42 | 91,75 | 91,49 | 91,54 | 90,54 | 90,52 | 91,51 | 91,58 | 1,39 | | | |
| 4 | 91,45 | 91,68 | 91,5 | 91,73 | 91,5 | 91,2 | 90,9 | 90,74 | 89,36 | 89,53 | 1,35 | | | |
| 5 | 91,58 | 91,28 | 90,5 | 89,32 | 90,45 | 90,54 | 90,28 | 90,52 | 91,51 | 90,55 | 0,80 | | | |
| 6 | 89,16 | 90,85 | 90,81 | 90,49 | 90,48 | 90,56 | 89,83 | 90,69 | 90,55 | 90,54 | 0,62 | | | |

| 90° Nor | rmalizasy | on işlem | inde zım | ba bekle | tilmeden | yapılan | deneyler | | | | |
|---------|-----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|-------|-------|-------|------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort. |
| 3 | 92,14 | 91,8 | 91,28 | 91,15 | 92,19 | 91,48 | 91,48 | 92,31 | 91,49 | 91,87 | 1,72 |
| 4 | 91,70 | 91,24 | 92,56 | 92,42 | 91,25 | 91,2 | 91,54 | 91,3 | 91,44 | 91,5 | 1,61 |
| 5 | 91,55 | 90,58 | 91,46 | 91,2 | 92,4 | 91,02 | 92,1 | 91,45 | 91,08 | 91,4 | 1,42 |
| 6 | 91,38 | 91,54 | 91,3 | 91,5 | 91,48 | 91,36 | 91,12 | 91,25 | 91,44 | 91,18 | 1,36 |

| 90° Nor | rmalizasy | yon işlem | inde zım | lba 30 sn | bekleye | ek yapıla | an deney | ler | | | |
|---------|-----------|-----------|----------|-----------|---------|-----------|----------|-------|-------|-------|------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort. |
| 3 | 91,32 | 91,49 | 91,41 | 91,41 | 91,28 | 91,36 | 91,48 | 91,66 | 92,06 | 91,15 | 1,46 |
| 4 | 91,1 | 91,15 | 91,67 | 91,25 | 92,42 | 91,87 | 91,52 | 91,42 | 90,39 | 91,34 | 1,41 |
| 5 | 91,55 | 91,27 | 91,15 | 91,34 | 90,42 | 91,32 | 91,33 | 91,12 | 91,35 | 91,48 | 1,23 |
| 6 | 91,19 | 91,42 | 91,42 | 91,05 | 91,1 | 91,42 | 91,3 | 91,11 | 91,05 | 91,16 | 1,22 |

| 90° Me | nevişlem | e işlemir | nde zimba | a bekletil | meden y | apılan de | neyler | | | | |
|--------|----------|-----------|-----------|------------|---------|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort. |
| 3 | 82,46 | 84,4 | 83,48 | 85,55 | 81,48 | 81,24 | 82,58 | 84,55 | 84,41 | 82,2 | -6,76 |
| 4 | 86,2 | 86 | 85,1 | 87,4 | 85,4 | 85,54 | 87,14 | 85,1 | 86,17 | 86,2 | -3,97 |
| 5 | 87 | 87,48 | 86,2 | 87,2 | 87,5 | 87,3 | 86,56 | 86,1 | 87,38 | 86,56 | -3,07 |
| 6 | 87,28 | 87,1 | 88,12 | 88,2 | 88,02 | 90,5 | 88,25 | 88,12 | 91,2 | 87,3 | -1,59 |

| 90° Me | nevişlem | e işlemir | nde zimba | a 30 sn b | ekleyerel | k yapılan | deneyle | r | | | |
|--------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|-------|-------|-------|-------|
| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort. |
| 3 | 85,3 | 84,4 | 84,05 | 84,34 | 84,16 | 84,16 | 85,1 | 84,42 | 85,45 | 84,41 | -5,42 |
| 4 | 86,46 | 86,44 | 86,57 | 85,37 | 86,44 | 86,55 | 85,2 | 85,3 | 86,21 | 86,52 | -3,89 |
| 5 | 87,33 | 87,32 | 88,02 | 88,15 | 87,35 | 88,22 | 85,5 | 88,3 | 87,43 | 88,2 | -2,42 |
| 6 | 89,6 | 87,58 | 88,42 | 88,4 | 89,48 | 89,7 | 89,8 | 89,55 | 89,5 | 89,6 | -0,84 |

| Isıl işler | Isıl işlemsiz bükme işleminde zımba bekletilmeden yapılan deneyler | | | | | | | | | | | | |
|------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--|--|
| Rm | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort. | | |
| R2 | 93,05 | 92,45 | 92,15 | 93,1 | 92,3 | 91,5 | 92,13 | 93,07 | 92,02 | 93,15 | 2,49 | | |
| R3 | 92,3 | 91,46 | 91,5 | 92,05 | 92,4 | 92,42 | 92,2 | 93,1 | 92,3 | 92,48 | 2,22 | | |
| R4 | 91,25 | 91,45 | 92,08 | 92,1 | 91,55 | 92,05 | 91,5 | 92,35 | 91,5 | 92,3 | 1,81 | | |
| R5 | 91,25 | 92,1 | 91,32 | 91,23 | 92,3 | 92,21 | 91,24 | 91,29 | 92,16 | 92,11 | 1,72 | | |
| R6 | 91,1 | 91,13 | 91,35 | 92,05 | 92,15 | 91,12 | 91,1 | 91,35 | 91,55 | 88,45 | 1,43 | | |

EK-9. Farklı radyüsler kullanılarak elde edilen deney sonuçlarının aritmetik ortalamaları

| Isıl işler | Isıl işlemsiz bükme işleminde zımba 30 sn bekleyerek yapılan deneyler | | | | | | | | | | | | |
|------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--|--|
| Rm | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort. | | |
| R2 | 91,12 | 92,2 | 93,17 | 93,52 | 93,37 | 91,3 | 92,58 | 92,4 | 92,41 | 91,56 | 2,36 | | |
| R3 | 91,05 | 92,2 | 91,56 | 92,53 | 91,3 | 92,33 | 92,01 | 91,55 | 92,25 | 93,02 | 1,98 | | |
| R4 | 92,01 | 91,56 | 92,4 | 91,35 | 92,2 | 91,5 | 92,06 | 91,38 | 90,5 | 91,49 | 1,65 | | |
| R5 | 91,56 | 91,51 | 91,5 | 92,26 | 91,05 | 91,58 | 91,2 | 91,58 | 91,51 | 92,13 | 1,59 | | |
| R6 | 91,26 | 92,1 | 91,25 | 91,56 | 90,56 | 91,25 | 91,12 | 91,45 | 91,2 | 89,78 | 1,31 | | |

| Normal | Normalizasyon işleminde zımba bekletilmeden yapılan deneyler | | | | | | | | | | | | |
|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--|--|
| Rm | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort. | | |
| R2 | 92,1 | 93,1 | 92,24 | 92,6 | 92,45 | 92,48 | 92,5 | 92,39 | 93,08 | 92,67 | 2,56 | | |
| R3 | 92,1 | 92,22 | 92,32 | 92,25 | 92,12 | 91,38 | 93,32 | 92,67 | 92,15 | 93,2 | 2,37 | | |
| R4 | 92,25 | 92,05 | 92,43 | 92,45 | 92,2 | 92,2 | 92,3 | 93,12 | 92,1 | 92,1 | 2,32 | | |
| R5 | 92,05 | 92,05 | 92,25 | 92,25 | 91,49 | 92,3 | 91,38 | 91,35 | 91,58 | 92,13 | 1,88 | | |
| R6 | 92,05 | 91,2 | 92,08 | 92,23 | 92,4 | 91,45 | 92,48 | 91,08 | 91,49 | 92,07 | 1,85 | | |

| Normal | izasyon i | şleminde | e zimba 3 | 0 sn bek | leyerek y | vapılan d | eneyler | | | | |
|--------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|---------|-------|-------|-------|------|
| Rm | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort. |
| R2 | 92,25 | 92,3 | 92,13 | 92,05 | 93,08 | 92,4 | 92,16 | 92,6 | 92,33 | 92,8 | 2,41 |
| R3 | 92,48 | 92,5 | 92,38 | 92,22 | 92,33 | 92,28 | 92,02 | 92,24 | 91,26 | 91,29 | 2,11 |
| R4 | 91,34 | 91,58 | 92,45 | 92,13 | 93,15 | 92,05 | 90,55 | 90,44 | 92,4 | 92,3 | 1,84 |
| R5 | 92,4 | 91,5 | 92,01 | 92,22 | 92,35 | 91,52 | 92,05 | 91,05 | 91,3 | 91,29 | 1,77 |
| R6 | 92,25 | 92,15 | 91,15 | 91,52 | 91,4 | 91,24 | 91,2 | 92,26 | 91,22 | 92,56 | 1,7 |

| Menevişleme işleminde zımba bekletilmeden yapılan deneyler | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Rm | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort. |
| R2 | 88,7 | 88,04 | 88,65 | 87,93 | 88,97 | 87,85 | 88,82 | 89,03 | 88,91 | 89,32 | -1,38 |
| R3 | 88,26 | 87,36 | 88,17 | 88,07 | 88,05 | 89,14 | 88,09 | 88,24 | 87,26 | 89,15 | -1,82 |
| R4 | 87,45 | 89,11 | 87,55 | 87,71 | 87,58 | 87,42 | 88,28 | 87,48 | 89,05 | 87,76 | -2,06 |
| R5 | 87,2 | 88,42 | 88,15 | 87,2 | 88,32 | 88,12 | 87,56 | 88,2 | 87,81 | 88,06 | -2,1 |
| R6 | 88,08 | 88,21 | 86,34 | 88,13 | 88,32 | 86,56 | 88,15 | 88,12 | 88,15 | 88,16 | -2,18 |

| Menevişleme işleminde zımba 30 sn bekleyerek yapılan deneyler | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Rm | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ort. |
| R2 | 88,55 | 88,98 | 88,98 | 88,96 | 88,67 | 89,58 | 88,75 | 88,54 | 88,49 | 88,79 | -1,17 |
| R3 | 88,1 | 88,45 | 88,4 | 88,45 | 88,5 | 88,47 | 88,24 | 89,25 | 88,68 | 88,28 | -1,52 |
| R4 | 89,15 | 88,58 | 88,1 | 88,15 | 88,22 | 88,15 | 88,3 | 88,13 | 88,48 | 88,56 | -1,62 |
| R5 | 88,42 | 87,33 | 89,42 | 87,58 | 89,05 | 88,41 | 88,56 | 88,47 | 88,25 | 88,14 | -1,64 |
| R6 | 86,2 | 88,32 | 89,21 | 89,1 | 87,18 | 88,45 | 88,27 | 89,05 | 88,14 | 88,21 | -1,79 |

EK-9. (devam) Farklı radyüsler kullanılarak elde edilen deney sonuçları ve esneme değerlerinin aritmetik ortalamaları

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

| Soyadı, adı | : ÖZDEMİR, Mustafa |
|----------------------|------------------------------|
| Uyruğu | : T.C. |
| Doğum tarihi ve yeri | : 01.01.1984, Sivas |
| Medeni hali | : Bekar |
| Telefon | : 0 (536) 2595892 |
| Faks | : 0 (354) 2171781 |
| E-Posta | : mustafaozdemir58@gmail.com |



Eğitim

| Derece | Okul/Program | Mezuniyet tarihi |
|---------------|---------------------------------------|------------------|
| Doktora | Gazi Üniversitesi/Makina Eğitimi | 2015 |
| Yüksek lisans | Gazi Üniversitesi/Makina Eğitimi | 2011 |
| Lisans | Gazi Üniversitesi/Talaşlı Üretim Öğr. | 2007 |
| Lise | Sivas Teknik Lisesi | 2002 |

İş Deneyimi

| Yıl | Çalıştığı Yer | Görev |
|------------|---------------------------------------|-------------------|
| 2007-2010 | Efor Makina San. ve Dış Tic. Ltd. Şti | Fab. Müdür. Yrd. |
| 2010-2014 | Gazi Üniversitesi | Öğretim Görevlisi |
| 2014-devam | Bozok Üniversitesi | Öğretim Görevlisi |

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

<u>Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler:</u>

1. Dilipak, H., Ozdemir, M., Sarıkaya, M. "Effects of Material Properties and Punch Tip Radius on Spring Forward in 90° V Bending Processes". Journal of Iron and Steel Research, International, 2013. 2. Özdemir, M., Gökmeşe, H., Yılmaz, V., Dilipak, H. "Characterization of Microstructure and Bending Response of Sheet Material: Influence of Thickness". Journal of Advanced Materials and Processing, 2015 (In Press).

<u>Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:</u>

- 1. Özdemir, M., Gökmeşe, H., Dilipak, H., Yımaz, V. "Investigation as Experimental and Micro-Structural of The Effect to Spring Back/Forward Amount of 16mo3 (1.5415) Sheet Materials of Different Heat-Treatments". ISITES 2014, p. 148-155.
- Yılmaz, V., Dilipak, H., Özdemir, M., Uzun, G. "Examining The Surface Roughness While Drilling Micro-Size Deep Holes with Electro Discharge Technique on Hadfield Steel". ISITES 2014, p. 156-164.

<u>Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:</u>

- Özdemir, M., Dilipak, H. (2012). S235JR (1.0038) Sac Malzemeye Uygulanan Isıl İşlemlerin İleri Esneme Miktarına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2012), Sayfa 345-353, Ankara, Eylül 2012, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi
- Yılmaz, V., Özdemir, M., Dilipak, H. (2014). Drilling Micro-Size Deep Holes With Electro Discharge Technique on X10CrAlSi7 Sheet Metal, 5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2014), p. 75-81, Bursa, Ekim 2014, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
- Yılmaz, V., Özdemir, M., Dilipak, H. (2014). Examining Efectivly to Hole Profile of Processing Parameters While Drilling Micro-Size Deep Holes With Electro Discharge Technique on X10CrAlSi7 Materials, 5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2014), p. 83-89, Bursa, Ekim 2014, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

<u>Ulusal hakemli dergilerde yayınlanan yayınlar:</u>

- 1. Yılmaz, V., Dilipak, H., Sarıkaya, M., Yılmaz, C., Özdemir, M. "Frezeleme işlemlerinde kesme kuvveti, titreşim ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının modellenmesi", Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2014, vol. 30, no. 4, p. 220-226.
- Özdemir, M., Gökmeşe, H., Dilipak, H., Yılmaz, V. "Aşınmaya Karşı Dirençli Sac Malzemenin Mikro Yapısal Karakterizasyonu ve Şekillendirilebilirliğinin İncelenmesi ", Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 2015 (In Press).

Hobiler

Sinema, Futbol, Kitap okuma, Bilgisayar kullanma



GAZİ GELECEKTİR...