

**T.C.  
HİTİT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AISI 430 PASLANMAZ ÇELİKLERİN V BÜKME  
İŞLEMİNDE İLERİ VE GERİ YAYLANMANIN  
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**Sinan ARSLAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
Dr. Öğr. Üyesi M. Emin ERDİN**

**ARALIK 2018  
ÇORUM**

Sinan ARSLAN tarafından hazırlanan "AISI 430 Paslanmaz eliklerin V Bükme İşleminde İleri ve Geri Yaylanmanın Deneysel Olarak İncelenmesi" adlı tez çalışması 24/12/2018 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf KANCA

Dr. Öğr. Üyesi M. Emin ERDİN

Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZGEDİK



Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 23.10.2019 tarih ve 2019/13. sayılı kararı ile Sinan ARSLAN'ın Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.



Doç. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## TEZ BEYANI

Tez içindeki tüm bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

  
Sinan ARSLAN



# AISI 430 PASLANMAZ ÇELİKLERİN V BÜKME İŞLEMİNDE İLERİ VE GERİ YAYLANMANIN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Sinan ARSLAN

HİTİT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2018

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, kolay şekillendirilebilmeleri, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir olmaları, iyi derecede korozyon dayanımları, estetik görünümleri ve yüzey kalitelerinden dolayı Dünya'da ve ülkemizde kullanımı her geçen gün artan AISI 430 ferritik paslanmaz çeliklerin, sac şekillendirme yöntemlerinden biri olan V bükmedeki ileri ve geri yaylanma davranışları incelenmiştir. Bu bağlamda lazer kesim yöntemi ile 0°, 45° ve 90° hadde doğrultularında 180 adet 40x120x1 mm boyutlarında numune hazırlanmıştır. Blok çelikten CNC freze tezgâhında 60°, 90° ve 120° açılarında kalıp ve zimbalar hazırlanmıştır. Kalıp yuvarlatma yarıçapı 5 mm, zımba yuvarlatma yarıçapı ise 4 mm seçilmiştir. Deney numuneleri 3 gruba ayrılarak ilk grup numunelere herhangi bir ısıl işlem uygulanmamıştır. İkinci grup numunelere normalizasyon ısıl işlemi, üçüncü grup numunelere ise normalizasyon ve ardından menevişleme ısıl işlemi uygulanmıştır. Her grup numuneye üç farklı kalıp açısında, üç farklı hadde doğrultusunda ve ayrıca zımbanın sac üzerinde 30 saniye bekletilip bekletilmemesine göre bükme işlemi yapılmış ve her işlem üçer kez tekrar edilmiştir. Bükme işlemi sonrası numunelerin açı ölçümleri önce açıölçer ile ardından CMM (Koordinat Ölçüm Makinesi) ile yapıp kaydedilmiştir. Ardından her grup numune için sertlik ölçümleri ve bakalit alınarak metalografik incelemeleri yapılmıştır. Deney çalışmaları ve yapılan analizler ışığında, AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin ileri ve geri yaylanma davranışı yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Ferritik paslanmaz çelik, ileri/geri yaylanma, V bükme, ısıl işlem

# EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SPRING-GO AND SPRING-BACK IN V DIE BENDING PROCESS OF AISI 430 STAINLESS STEEL

Sinan ARSLAN

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL APPLIED SCIENCES

DECEMBER 2018

## ABSTRACT

In this study, the spring-go and spring-back behaviour of AISI 430 ferritic stainless steel was investigated in the V-bending process, which is one of the methods of sheet metal forming. The usage of this type of stainless steel is increasing in the world market due to its formability, being usable in extreme temperatures, excellent corrosion resistance, aesthetic appearance, and surface quality. In this context, 180 sheet metal specimens with dimensions of 40x120x1 mm were prepared by laser cutting method at 0°, 45°, 90° rolling directions. Punch and die were prepared at 60°, 90° and 120° with CNC milling machine from block steel. Punch and die radii were selected as 5 and 4 mm respectively. The specimens were divided into three groups. Heat treatment was not applied to the first group. The second group was subjected to normalizing heat treatment, while the third group was normalized and then tempering heat treatment was applied. Each group was bent in three different die angles and rolling directions according to holding the punch on the metal sheet for 30 seconds on the first half, but not at all on the second half. All bending processes were repeated three times. After the bending process, the angle measurements of the specimens were made with angle meter followed by CMM (Coordinate Measuring Machine) and recorded. Afterward, hardness measurements and metallographic analysis were carried out for each group. In the light of the physical experiments and the analysis made, the spring-go and spring-back behavior of AISI 430 ferritic stainless steel was interpreted.

**Keywords:** Ferritic stainless steel, spring go/back, V bending, heat treatment

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca çok değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları aşmam konusunda desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Emin ERDİN'e,

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarının imkânlarından faydalanmamı sağlayan Prof. Dr. İbrahim SÖNMEZ'e ve Dr. Öğr. Üyesi Kubilay KARACİF'e,

Deney numunelerinin metalografik incelemesi ve analizi aşamasında desteklerini ve tecrübelerini esirgemeyen Arş. Gör. Bülent ALKAN'a,

Isıl işlem ve spektral analiz çalışmalarında bana yardımcı olan Duduoğlu Çelik Döküm San. Tic. A.Ş. çalışanı Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisi Hakan YILDIRIM'a,

NETFORM Mühendislik Makine Metal San. Tic. Ltd. Şti. yetkilisi Mert AYGEN'e, İmkânlarından faydalandığım Yağmaksan Yağlılar Mak. ve San. Tic. Ltd. Şti.'ne ve çalışanı Makine Mühendisi Mehmet Emin ÖZDEMİR'e sonsuz teşekkürü bir borç bilir, saygılarımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	2
2.1. Bükme İşlemi .....	2
2.2. Bükme Çeşitleri .....	3
2.2.1. V bükme.....	4
2.2.2. U bükme.....	4
2.2.3. Kenar bükme.....	5
2.2.4. Serbest bükme.....	6
2.4. Bükmede İleri ve Geri Yaylanma.....	6
2.4.1. İleri ve geri yaylanma miktarına etki eden faktörler.....	8
2.4.2. İleri ve geri yaylanmanın telafisi .....	15
2.5. Paslanmaz Çelikler .....	16
2.5.1. Paslanmaz çeliklerin alaşım elementleri ve metalurjik etkileri .....	18
2.5.2. Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması .....	23
2.6. Çeliklere Uygulanan Isıl İşlemler.....	35

2.6.1. Tavlama .....	38
2.6.2. Sertleştirme .....	42
2.6.3. Menevişleme .....	43
2.7. Kaynak Araştırması .....	46
3. MATERYAL VE METOT .....	50
3.1. Deney Malzemesi .....	50
3.2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Bükme Kalıbı ve Zımbalar .....	53
3.3. Deney Numunelerine Uygulanan Isıl İşlemler .....	54
3.4. V-Bükme İşlemleri .....	56
3.5. Metalografik İnceleme.....	60
3.6. Sertlik Ölçümleri .....	62
3.7. Açık Ölçümleri .....	63
4. DENEY SONUÇLARI .....	64
4.1. Isıl İşlem Uygulanmayan Numuneler.....	64
4.1.1. V-Bükme sonuçları .....	65
4.1.2. Sertlik ölçümü.....	68
4.1.3. Mikro yapı.....	69
4.2. Normalizasyon Isıl İşlemi Uygulanan Numuneler .....	70
4.2.1. V-Bükme sonuçları .....	70
4.2.2. Sertlik ölçümü.....	73
4.2.3. Mikro yapı.....	74
4.3. Normalizasyon Isıl İşlemi Uygulanan Numuneler .....	77
4.3.1. V-Bükme sonuçları .....	78
4.3.2. Sertlik ölçümü.....	81
4.3.3. Mikro yapı.....	82



4.4. Parametrelere Göre İleri ve Geri Yaylanma Sonuçları.....	84
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	88
KAYNAKLAR .....	96
ÖZGEÇMİŞ .....	102



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Alaşım elementlerinin çelik özelliklerine etkisi (Özdemir, 2015).....	22
Çizelge 2.2. I. grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler (Krysiak ve ark., 1993).....	30
Çizelge 2.3. II. grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler (Krysiak ve ark., 1993).....	30
Çizelge 2.4. III. grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler (Krysiak ve ark., 1993).....	31
Çizelge 2.5. AISI 430 paslanmaz çelik malzemenin ağırlıkça % kimyasal bileşimi ile fiziksel, mekanik, yüksek sıcaklık ve imalat özellikleri (Çelik, 2006; Aran ve Temel, 2004).....	32
Çizelge 3.1. AISI 430 paslanmaz çelik malzemeye ait ağırlıkça yüzde kimyasal bileşim analizi.....	51
Çizelge 3.2. AISI 430 paslanmaz çelik malzemenin literatürden alınan ağırlıkça yüzde kimyasal bileşimi (Çelik, 2006).....	52
Çizelge 3.3. Bükme parametreleri.....	57
Çizelge 3.4. Kalıp açıları için strok boyları .....	58
Çizelge 4.1. Isıl işlem uygulanmamış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası kalıp açılarına göre elde edilen açı değerleri .....	65
Çizelge 4.2. Isıl işlem uygulanmamış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açılarına göre elde edilen açı değerleri .....	66
Çizelge 4.3. Isıl işlem uygulanmamış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açılarına göre elde edilen ortalama açı değerleri [°] .....	66
Çizelge 4.4. Isıl işlem uygulanmamış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açılarına göre elde edilen ileri ve geri yaylanmaların yüzde değerleri [%].....	67
Çizelge 4.5. Isıl işlem uygulanmamış sac numune yüzeyinden alınan sertlik ölçümü değerleri .....	68

Çizelge 4.6. Normalizasyon ısıtıl işlem uygulanmamış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası kalıp açılarına göre elde edilen açı değerleri .....	70
Çizelge 4.7. Normalizasyon ısıtıl işlemi uygulanmamış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açılarına göre elde edilen açı değerleri .....	71
Çizelge 4.8. Normalizasyon ısıtıl işlemi uygulanmış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açılarına göre elde edilen ortalama açı değerleri [°].....	71
Çizelge 4.9. Normalizasyon ısıtıl işlemi uygulanmış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açılarına göre elde edilen ileri ve geri yaylanmaların yüzde değerleri [%].....	72
Çizelge 4.10. Normalizasyon ısıtıl işlemi uygulanmış sac numune yüzeyinden alınan sertlik ölçüm değerleri .....	73
Çizelge 4.11. Normalizasyon ve menevişleme ısıtıl işlemi uygulanmış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası kalıp açılarına göre elde edilen açı değerleri.....	78
Çizelge 4.12. Normalizasyon ve menevişleme ısıtıl işlemi uygulanmamış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açılarına göre elde edilen açı değerleri .....	79
Çizelge 4.13. Sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açılarına göre elde edilen ortalama açı değerleri [°] .....	70
Çizelge 4.14. Sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açılarına göre elde edilen ileri ve geri yaylanmaların yüzde değerleri [%].....	80
Çizelge 4.15. Normalizasyon ve menevişleme ısıtıl işlemi uygulanmış sac numunenin yüzeyinden alınan sertlik ölçüm değerleri.....	81

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Sac metalde bükme esnasında oluşan gerilmeler (Groover, 2007).....	2
Şekil 2.2. Bükme operasyonları. a) Serbest bükme b) Kenar bükme, c) Çift etkili bükme, d) Ezerek bükme, e) Döndürerek bükme (Tekiner, 2004).....	3
Şekil 2.3. V bükme aşamaları (Suchy, 2006).....	4
Şekil 2.4. U kalıpta bükme işlemi adımları (Lange, 1985).....	5
Şekil 2.5. Kenar bükme işlemi 1) Öncesi 2) Sonrası (Şahin, 2013).....	5
Şekil 2.6. Serbest bükme (Dongye, 2006).....	6
Şekil 2.7. $\sigma$ , gerilme; $\epsilon$ , birim şekil değişimi; $\Delta\epsilon$ , toplam birim şekil değişimi olmak üzere, sünek bir metaldeki geri yaylanmanın gerilme-gerinim diyagramı üzerinde gösterilişi (Özdemir, 2010).....	7
Şekil 2.8. Bükme sonrası a) geri yaylanma, b) ileri yaylanma (Özdemir, 2015).....	7
Şekil 2.9. Gerilme-gerinim diyagramı (Özdemir, 2015).....	9
Şekil 2.10. Bükme işleminin sebep olduğu atom hareketleri (Özdemir, 2015).....	9
Şekil 2.11. Sac metal levhanın hadde doğrultuları (Özdemir, 2015).....	11
Şekil 2.12. Bükme işleminde hadde doğrultusunun gösterilmesi a) Hadde doğrultusunda paralel bükme, b) Hadde doğrultusuna dik bükme (Çapan, 1999).....	11
Şekil 2.13. Kalıntı gerilmeler a) Haddedeleme üniform olmayan plastik deformasyon b) Oluşan kalıntı gerilmelerin şematik dağılımı (Özçatalbaş, 2008).....	14
Şekil 2.14. Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması (Aran, 2003).....	23
Şekil 2.15. Shaeffler diyagramı (Folkhard ve Verlag, 1987).....	25
Şekil 2.16. %17 kromlu ferritik paslanmaz çelik faz diyagramı (Castro ve Tricot, 1964).....	28
Şekil 2.17. Demir-karbon (Fe-C) denge diyagramı (Anonim, 2013).....	36

Şekil 2.18. Perlit fazının oluşum mekanizması (Callister, 2003).....	37
Şekil 2.19. Fe-C denge diyagramında tavlama yöntemleri ve uygulama sıcaklıkları (Erişir, 2013) .....	39
Şekil 2.20. Haddelenmiş çeliğin normalizasyon tavlaması sonrası Mikro yapısında oluşan homojen taneler (Anonim, 2013) .....	40
Şekil 2.21. Normalizasyon sonrasında küçük tanelerin oluşması (Özdemir, 2015) .....	40
Şekil 2.22. Su verme sonrasında uygulanan temperleme işlemi (Erişir, 2013) .....	44
Şekil 2.23. Menevişleme sonrası mekanik özelliklerin değişimi (Güral, 2010).....	45
Şekil 3.1. Sac metal numuneler üzerinde hadde doğrultuları.....	50
Şekil 3.2. Zımba ve kalıp yuvarlatma yarıçapları .....	54
Şekil 3.3. Deney numunelerine uygulanan ısı işlemler.....	56
Şekil 3.4. Dip bükme tekniği (Anonim, 2009).....	59
Şekil 4.1. Bükme açısı ve kalıp açısı birbirinin tümleyenidir .....	64
Şekil 4.2. Isıl işlem uygulanmamış sac numunelere ait; hadde doğrultusu, kalıp açısı, zımbanın bekleme süresine göre ileri ve geri yaylanma değerleri [%] .....	67
Şekil 4.3. Normalizasyon ısı işlemi uygulanmış sac numunelere ait; hadde doğrultusu, kalıp açısı ve zımbanın bekleme süresine göre ileri ve geri yaylanma değerleri [%] .....	73
Şekil 4.4. Soğuk işlem oranının ve soğuk işlem sonrası tavlama sıcaklığının mekanik özellik ve mikro yapıya etkisi a) Soğuk işlem görmüş b) Toparlanma sonrası c) Yeniden kristalleşme sonrası ve d) Tane büyümesi sonrası (Osmanoğlu, 2012) .....	75
Şekil 4.5. Normalizasyon ve menevişleme ısı işlemi uygulanmış sac numunelere ait; hadde doğrultusu, kalıp açısı ve zımbanın bekleme süresine göre ileri ve geri yaylanma değerleri [%].....	81
Şekil 4.6. Sac numunelerin uygulanan ısı işlem durumlarına göre bükme açısı, hadde doğrultusu ve zımba bekleme süresi üzerinden ortalama ileri ve geri yaylanma değerleri .....	84

- Şekil 4.7. Sac numunelerin bükme açlarına göre ısı işlem, hadde doğrultusu ve zımba bekleme süresi üzerinden ortalama ileri ve geri yaylanma değerleri..... 85
- Şekil 4.8. Bükme açlarına göre elde edilen ileri yaylanma değerleri ..... 85
- Şekil 4.9. Sac numunelerin hadde doğrultularına göre ısı işlem, bükme açısı ve zımba bekleme süresi üzerinden ortalama ileri ve geri yaylanma değerleri ..... 86
- Şekil 4.10. Sac numunelerin zımba bekleme süresine göre ısı işlem, bükme açısı ve hadde doğrultusu üzerinden ortalama ileri ve geri yaylanma değerleri ..... 87



## RESİMLER DİZİNİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. Paslanmaz çelik türlerine ait mikro yapı görüntüleri (Aran, 2003) .....	24
Resim 2.2. Ferritik paslanmaz çeliğin mikro yapısı (Aran, 2003) .....	27
Resim 3.1. Deneylede kullanılan sac metal malzeme .....	50
Resim 3.2. Lazer kesim makinesi .....	51
Resim 3.3. Spektral analiz cihazı .....	51
Resim 3.4. V bükme kalıbı ve zımbalar .....	53
Resim 3.5. Isıl işlem fırını .....	55
Resim 3.6. Bükme işlemi için tezgaha bağlanan kalıp, zımba ve sac numune .....	57
Resim 3.7. Hidrolik bükme tezgahı .....	58
Resim 3.8. 60°, 90° ve 120° kalıp açılarında bükülen sac metal numunelerden ısıl işlem görmüş (üstte) ısıl işlem görmemiş (altta) .....	59
Resim 3.9. Abrasif kesici cihaz .....	60
Resim 3.10. Bakalit cihazı .....	60
Resim 3.11. Zımparalama ve parlatma cihazı .....	61
Resim 3.12. Zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerinden geçmiş numuneler a) Normalizasyon ısıl işlemi görmüş b) Isıl işlem görmemiş c) Normalizasyon ve menevişleme ısıl işlemi görmüş .....	61
Resim 3.13. Düz optik metal mikroskobu .....	62
Resim 3.14. Sertlik ölçüm cihazı .....	62
Resim 3.15. Açılölçer .....	63
Resim 3.16. Koordinat ölçme cihazı (CMM) .....	63
Resim 4.1. Isıl işlem görmemiş numune yüzeyinde yapılan sertlik ölçümünde elmas başlığın oluşturduğu deformasyon izi .....	68
Resim 4.2. Isıl işlem görmemiş deney malzemesi mikro yapısı .....	69

Resim 4.3. Normalizasyon ısııl işleme görmüş numune yüzeyinde yapılan sertlik ölçümünde elmas başlığın oluşturduğu deformasyon izi .....	74
Resim 4.4. Normalizasyon ısııl işlemine tabi tutulmuş deney malzemesi mikro yapısı.....	74
Resim 4.5. AISI 430 paslanmaz çeliğinin a) Soğuk deformasyon öncesi, b) Soğuk deformasyon sonrası mikro yapıları (Osmanoğlu, 2012) .....	76
Resim 4.6. Normalizasyon ve menevişleme ısııl işleme görmüş numune yüzeyinde yapılan sertlik ölçümünde elmas başlığın oluşturduğu deformasyon izi.....	82
Resim 4.7. Normalizasyon ve menevişleme ısııl işlemine tabi tutulmuş deney malzemesi mikro yapısı.....	82



## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

### Açıklama

R	Bükme yarıçapı
$R_p, R_e$	Zımba yuvarlatma yarıçapı
$R_d$	Kalıp dip yuvarlatma yarıçapı
$R_k$	Kalıp köşe yuvarlatma yarıçapı
t, s	Sac kalınlığı
w	Sac genişliği
$\alpha$	Bükme açısı
$\alpha'$	Hesap açısı
$\varepsilon$	Birim şekil değişimi
$\Delta\varepsilon$	Toplam birim şekil değişimi
$\Theta$	Bükme açısı
$\Theta'$	Bükme öncesi zımba açısı
$\Sigma$	Gerilme

### Kısaltmalar

### Açıklama

Ark.	Arkadaşları
AISI	American Iron and Steel Institute
CMM	Koordinat ölçüm cihazı
CNC	Bilgisayar nümerik kontrol
DIN	Deutsches Institut für Normung
HMK	Hacim merkezli kübik yapı
YMK	Yüzey merkezli kübik yapı

## 1. GİRİŞ

Şekillendirilmiş sac metaller günümüz endüstrisinde oldukça yaygın kullanım alanlarına sahiptir. Günümüzde teknolojinin üst seviyede olduğu havacılık, otomotiv ve tıbbi cihaz sektöründen, günlük hayatta kullanılan mutfak eşyalarına ve beyaz eşyalara kadar farklı alanlarda birçok parçanın sac metal şekillendirme ile elde edildiğini görülmektedir.

Şekillendirme yöntemlerinden biri olan bükme; sac malzemenin, birbirini tamamlayan erkek kalıp ve dişi kalıp olarak adlandırılan formlu dökme demir veya çelik malzemedен imal edilmiş ekipmanlar arasına yerleştirilip, orta kısımda bir çekme kuvveti ve kenarlarda yüksek bir basma kuvveti uygulanması ile ısı veya ısı etkisi olmadan, talaş kaldırma işlemi yapmadan bir eksen etrafında şekillendirilmesidir. En çok kullanılan bükme yöntemleri; V bükme, U bükme, kenar bükme ve serbest bükme çeşitleridir. Uygulanan bükme yöntemi ile sac metal malzemeye istenilen form verilirken, parçada bir takım deformasyonlar oluşmaktadır. Bu deformasyonlardan biri de ileri ve geri yaylanmadır. Yaylanmanın önceden tahmin edilmesi başarılı bir imalat yapılabilmesi açısından önemlidir. İleri ve geri yaylanma telafisi için birçok yöntem söz konusudur. Ancak her önlem için yaylanma miktarının önceden bilinmesi gereklidir. Yaylanmanın önceden tahmini hem zaman hem de maliyet açısından büyük kazanç sağlar.

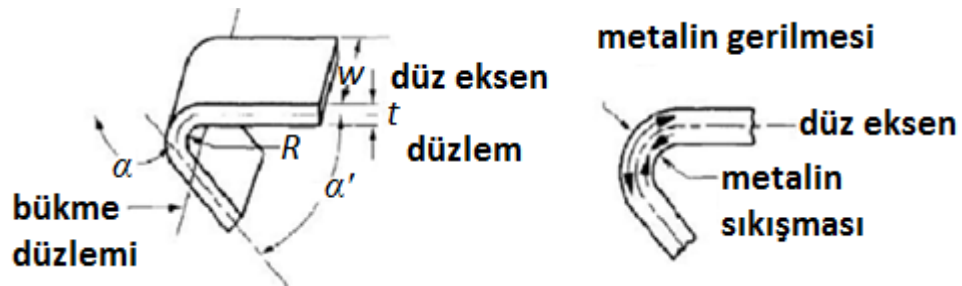
Bu tez çalışmasında, kolay şekillendirilebilmeleri, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir olmaları, iyi derecede korozyon dayanımları, estetik görünümleri ve yüzey kalitelerinden dolayı Dünya'da ve ülkemizde kullanımı her geçen gün artan AISI 430 ferritik paslanmaz çeliklerin V bükmedeki ileri ve geri yaylanma davranışları incelenmiştir. Bu bağlamda sac malzemelerin şekillendirilmesine etki eden malzemenin cinsi, uygulanan ısıl işlemler, sacın hadde doğrultusu, bükme açısı ve zımbanın sac üzerinde bekleme süresi gibi parametreler incelenerek sonuçlara etkilerinin tablo ve grafikler halinde görülmesi amaçlanmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Bükme İşlemi

Bükme, temel olarak doğrusal bir eksen etrafında, düz bir levhaya kalıcı bir eğrilik verilmesi için gerçekleştirilen en basit sac malzeme şekillendirme yöntemi olarak tanımlanmaktadır (Marciniak ve ark., 2002).

V bükme işlemlerinde şekillendirme sırasında sacın belirli bir bölgesi deformasyona uğramaktadır. Şekillendirme operasyonu ile sac parça üzerinde plastik deformasyon ve elastik şekil değişimi meydana gelmektedir. Bükme sırasında, sac malzemenin iç ve dış yüzeyinde meydana gelen birim şekil değişimleri, tarafsız eksenle uzaklıkla orantılı olarak değişmektedir. Bükme işleminde tarafsız eksen iç yüzeye doğru kaymakta, dış yüzeyde meydana gelen birim şekil değişimleri ise iç yüzeydeki liflerde meydana gelen birim şekil değişimlerinden daha fazla olmaktadır. Bükülen kısımda sac kalınlığının değişmediği kabul edilirse tarafsız eksen sacın ağırlık noktasından geçer. Bu eksen çekmeye ve basmaya zorlanan kısımları ayırır. Sacın iç kısmı tarafsız eksene göre sıkışır, dış kısmı ise tarafsız eksene göre gerilir. Şekil 2.1’de sac metal bükülmesi ile oluşan gerilmeler gösterilmiştir (Ötü, 2012).



Şekil 2.1. Sac metalde bükme esnasında oluşan gerilmeler (Groover, 2007)

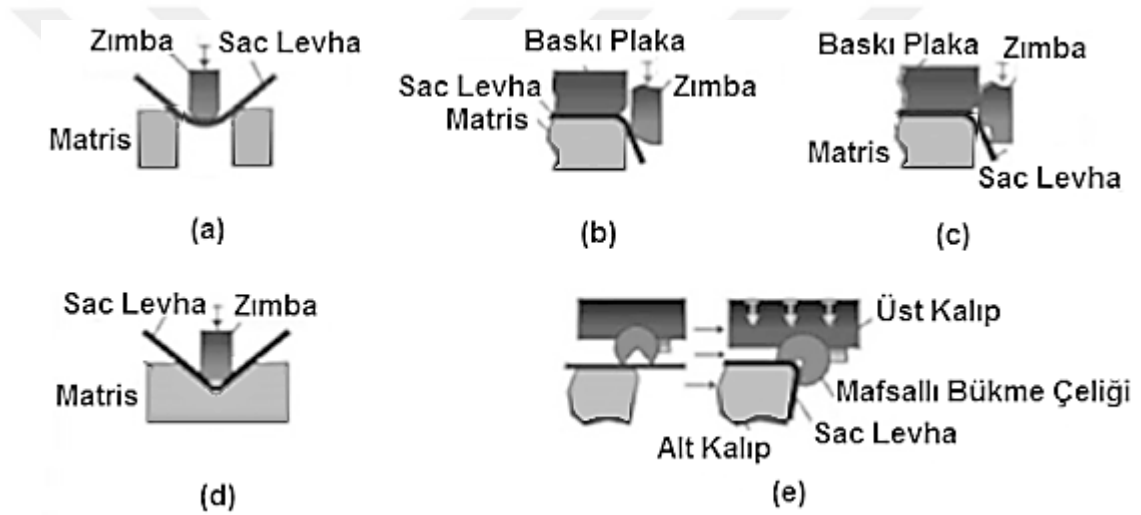
Burada;  $\alpha$ , bükme açısı;  $w$ , sac genişliği;  $R$ , bükme yarıçapı;  $t$ , sac kalınlığı;  $\alpha'$ , hesap açısıdır.

Bükülen malzeme kesitinde meydana gelen değişimler genel olarak malzeme çeşidine, malzeme kalınlığına, bükme açısına, bükme yarıçapına, bükme kuvvetine,

zımba ve kalıp arasında bırakılan mesafeye, zımbanın numune üzerinde bekleme süresine bağlıdır (Ötü, 2012).

## 2.2. Bükme Çeşitleri

Sac parçaların şekillendirilmesinde V ve U bükme işlemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bükme işlemlerinin yanı sıra kenar bükme ve serbest bükme de yine sık kullanılan yöntemlerdendir. İstenen ürünün şekline göre değişen çeşitli bükme işlemleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

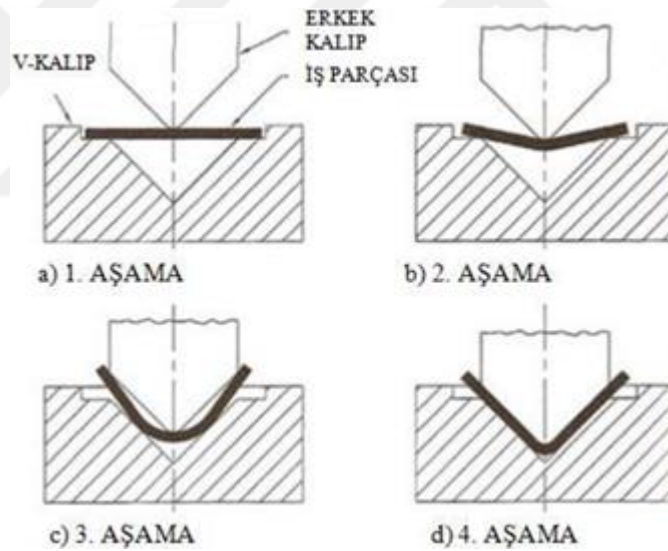


**Şekil 2.2.** Bükme operasyonları a) Serbest bükme b) Kenar bükme c) Çift etkili bükme d) Ezerek bükme e) Döndürerek bükme (Tekiner, 2004)

Bükme işleminde kalıplar genellikle zımba ve matrizen (alt kalıp) oluşmaktadır. Bükmede parçanın şeklini zımba, matris ve zımbanın matrise yaklaşma mesafesi, numune kalınlığı, numunenin hadde doğrultusu, zımbanın bükme sırasında numune üzerinde bekletilme süresi ve zımba yuvarlatma yarıçapı belirlemektedir. Matris hareketsiz sabit dururken, zımba ise hareketlidir. Bükme işlemleri genel olarak mekanik veya hidrolik presler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Presler hesaplanan kuvvete ayarlanmaktadır. Hesaplanan kuvvetin kullanılmaması durumunda kuvvet yetersiz geldiğinde bükme işlemi gerçekleşmeyecektir (Ötü, 2012).

### 2.2.1. V bükme

Sac bükme operasyonları içerisinde en yaygın kullanım alanına sahip bükme işleminden biri V kalıpta bükme işlemidir. V bükme işleminde zımba aşağı doğru inerken ilk olarak desteksiz sac ile temas eder (Şekil 2.3a). Zımba, iş parçasını orta noktasından malzeme kalınlığı kadar aşağı bastırır (Şekil 2.3b). Bu durumda bükme kollarının uçları yukarı esneyerek kalıp yuvarlatma yarıçapları etrafında bir miktar hareket ederek reaksiyon gösterir. Bükme olayı ilerledikçe sürüklenme meydana gelmekte ve dolayısı ile malzemenin reaksiyonu daha da artmaktadır (Şekil 2.3c). Bu durumda kollar bir öncekine göre daha da yukarıya kalkmış bulunmaktadır. Son safhada (Şekil 2.3d) ise zımbanın sadece uç kısmı değil, yan yüzeyleri de temas halinde ve zımba parçayı kalıp içine yatırmış durumdadır.

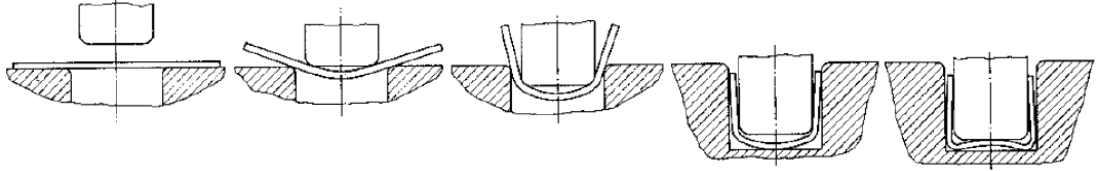


Şekil 2.3. V bükme aşamaları (Suchy, 2006)

### 2.2.2. U bükme

Tek bir kalıpta U seklini almış sac parçalar üretmek amacıyla U kalıpta bükme işlemi uygulanır. Şekil 2.4'de U bükme işlem aşamaları görülmektedir. V kalıpta, bükme kolları olarak adlandırılan kısımlar, U kalıpta bükme işleminde şekillendirilmiş parçanın yan duvarlarını oluşturmaktadır.

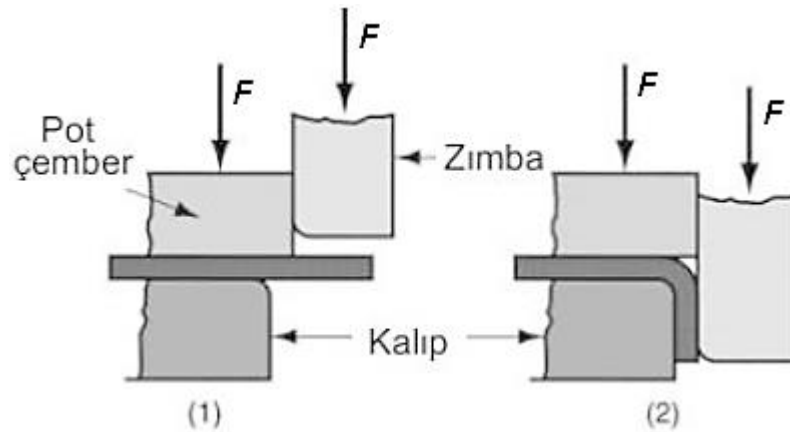
U kalıpta bükme işlemi; uygulanan kuvvetin, bükme yarıçapının, kalıp açıklığının, kalıp derinliğinin ve kalıp yarıçapının fonksiyonu olarak tanımlanabilir (Lange, 1985).



Şekil 2.4. U kalıpta bükme işlemi adımları (Lange, 1985)

### 2.2.3. Kenar bükme

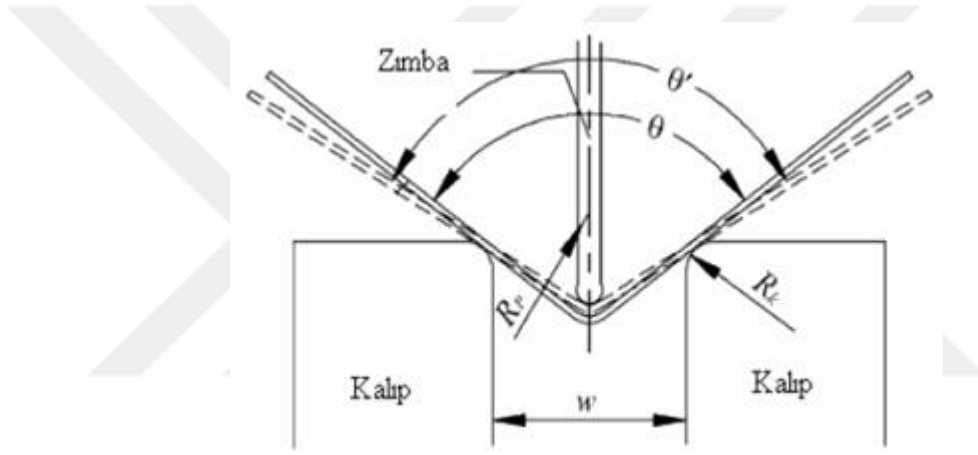
Bu yöntemde, diğer bükme yöntemlerden farklı olarak, şekillendirme sırasında malzemenin yer değiştirmesini ya da hareket etmesini engelleyen baskı plakaları ya da pot çemberleri kullanılmaktadır. Kenar bükme işleminde, bükme bölgesi sac malzemenin geneline nazaran daha dar bir bölgede yer almaktadır. Farklı kenar bükme işlemleri ile karşılaşmak mümkündür. Ancak bu yöntemler içerisinde üzerinde en çok durulmuş olanı, Şekil 2.5'te görülen düz kenar bükme işlemidir (Kazan ve ark., 2009).



Şekil 2.5. Kenar bükme işlemi 1) Öncesi 2) Sonrası (Şahin, 2013)

### 2.2.4. Serbest bükme

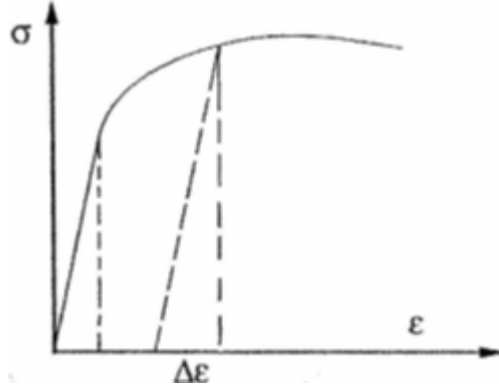
Serbest bükmede, sac parça alta yer alan kalıbın kenarları tarafından desteklenirken zımbanın aşağı doğru inmesi ile gerekli bükme açısı oluşur. Şekil 2.6'da görüldüğü üzere  $R_p$  zımba yuvarlatma yarıçapı,  $R_k$  kalıp köşe yuvarlatma yarıçapı,  $\theta$  açısı bükme açısı  $\theta'$  ise bükme öncesi zımba açısıdır.  $\theta' - \theta$  ise geri yaylanma açısıdır. Sac parçanın aldığı şekil itibari ile V bükmeye benzemesine rağmen sac parçanın kenarları bükme işleminin başlangıcında ve bitiminde serbest haldedir (Arslan, 2007).



Şekil 2.6. Serbest bükme (Dongye, 2006)

### 2.4. Bükmede İleri ve Geri Yaylanma

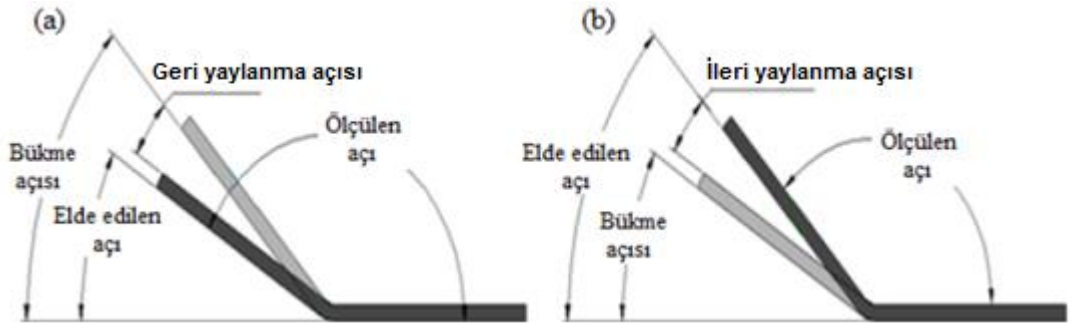
Sac malzeme yüksek çekme, germe ve bükme kuvvetleri altında almış olduğu formu bu kuvvetler üzerinden kalktıktan sonra, malzemenin elastik özelliklerinden dolayı parça geometrisinde meydana gelen büyük oranda elastik ender olarak da elastik-plastik olarak tanımlanan geometrik değişime ileri veya geri yaylanma denir (Özdemir, 2010).



**Şekil 2.7.**  $\sigma$ , gerilme;  $\epsilon$ , birim şekil değişimi;  $\Delta\epsilon$ , toplam birim şekil değişimi olmak üzere, sünek bir metaldeki geri yaylanmanın gerilme-gerinim diyagramı üzerinde gösterilişi (Özdemir, 2010)

Geri yaylanma daha farklı bir ifadeyle, form almış sacın gerilme indüklenmiş halden serbest hale geçişi sırasında ters kuvvetler nedeniyle fazladan oluşan geometri değişimi olarak tarif edilebilir (Şekil 2.7) (Özdemir, 2010).

Bükme işlemi sonucunda sac malzemenin iç deformasyon bölgesinde basma, dış deformasyon bölgesinde ise çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Malzeme üzerine uygulanan yük kaldırıldığı zaman iç ve dış kısımlardaki bu gerilmelerden dolayı bükülen malzeme bir miktar ileri veya geri yaylanmaktadır (Özdemir, 2010).



**Şekil 2.8.** Bükme sonrası a) geri yaylanma b) ileri yaylanma (Özdemir, 2015)

Şekil 2.8'de görüldüğü üzere sac metal malzemenin bükme işlemi sonrası bükme açısının azalmasına geri yaylanma, bükme açısının artmasına ise ileri yaylanma denilmektedir (Özdemir, 2010).



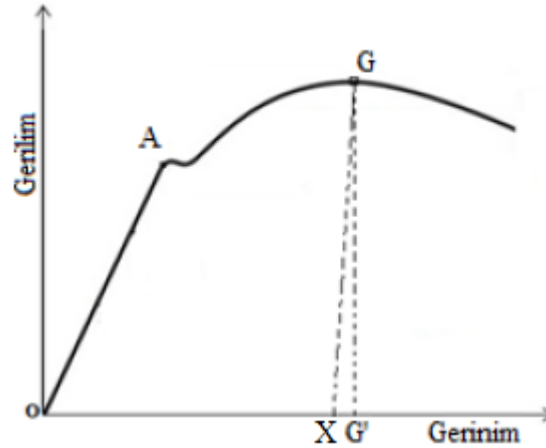
### 2.4.1. İleri ve geri yaylanma miktarına etki eden faktörler

Bükme işlemi neticesinde meydana gelen ileri ve geri yaylanma birçok faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu etkenlerin bazıları aşağıda verilmiştir (Uzun ve Erişkin, 1997).

- Malzemenin kimyasal bileşimi
- Malzeme kalınlığı
- Zımbanın sac malzeme üzerinde bekleme süresi
- Sac levhanın hadde doğrultusu
- Uygulanan kuvvet
- Bükme yarıçapı
- Bükme açısı
- Tane boyutu
- Kalıntı gerilmeler
- İşlem parametreleri

#### 2.4.1.1. Malzeme özelliklerinin ileri ve geri yaylanma miktarına etkisi

İleri ve geri yaylanma 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. İleri ve geri yaylanmanın sebeplerinden birisi olan malzeme özellikleri, malzemenin gerilme-gerinim ilişkisiyle açıklanabilir. Şekil 2.9'da gerilme-gerinim eğrisi gösterilmektedir (Özdemir, 2015).



**Şekil 2.9.** Gerilme-gerinim diyagramı (Özdemir, 2015)

Şekil 2.9'da gerilme-gerinim eğrisinde  $G$  noktası, sac metal levhanın şekillendirilmesi esnasında uygulanan kuvvete ait gerilmeyi göstermektedir.  $O-A$  doğrusu ise gerilme-gerinim ilişkisinin orantılı olarak değiştiği elastik bölgedir. Form verme işlemi tamamlanıp, parça üzerinden kuvvet kaldırıldığında gerinim  $X$  değerini alır. Bu, malzemenin plastik bölgedeki elastikiyetini belirtir.  $X-G'$ , parçanın eski haline dönmeye çalışan miktarını belirtir,  $O-X$  ise kalıcı deformasyon değerini belirtir. Şekillendirme sırasında akma bölgesini aşan gerilmenin olduğu durumda ileri ve geri yaylanma etkisi gözlenmektedir (Yenice, 2006).

Malzeme özellikleri açısından, ileri ve geri yaylanmaya bir başka sebep ise, malzemenin bükülen bölgelerindeki atomların hareketleridir. Şekil 2.10'da malzemelerin atom hareketleri gösterilmektedir (Özdemir, 2015).



**Şekil 2.10.** Bükme işleminin sebep olduğu atom hareketleri (Özdemir, 2015)

Şekil 2.10 incelendiğinde, parçanın iç kısımlarında basma, dış kısımlarında ise çekmenin meydana geldiği görülmektedir. Genelde malzemede, bası yönündeki gerinim, çeki yönündeki gerinimden daha büyüktür. Bu nedenle, atom hareketlerinin iç kısımda yoğunlaştığı görülmektedir (Özdemir, 2015).

#### **2.4.1.2. Malzeme kalınlığının ileri ve geri yaylanma miktarına etkisi**

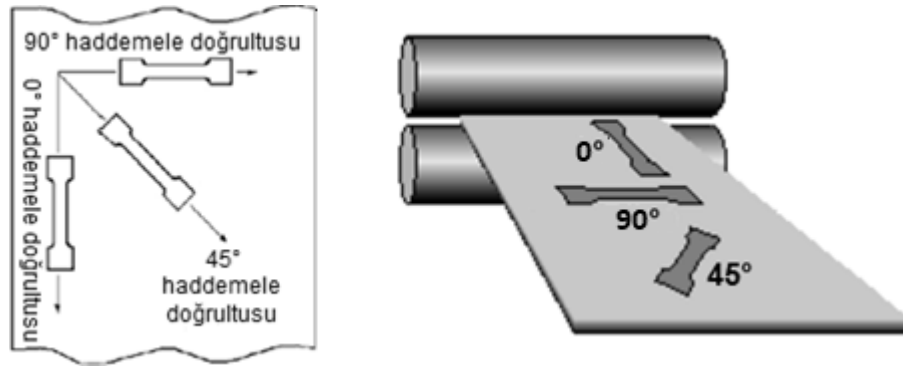
Malzeme kalınlığı ileri ve geri yaylanmayı etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Bükme yarıçapı ( $R$ ) ile sac kalınlığının ( $S$ ) ileri ve geri yaylanmaya etkisi  $R/S$  bükme oranına göre açıklanır. Sac kalınlığı azaldıkça  $R/S$  oranı artacağından dolayı ileri ve geri yaylanma miktarı da artar. Sac kalınlığı arttıkça  $R/S$  oranı azalacağından dolayı ileri ve geri yaylanma miktarı da azalır (Livatyalı ve Altan, 2001).

#### **2.4.1.3. Zımbanın sac malzeme üzerinde bekleme süresinin ileri ve geri yaylanma miktarına etkisi**

Zımbanın sac malzeme üzerinde bekleme süresi ileri ve geri yaylanma miktarlarını azaltmaktadır. Bu duruma, artan deformasyona bağlı olarak artan dislokasyonların yoğunluğunun sebep olduğu düşünülmektedir. Zımbanın malzeme üzerinde bekletilmesi ileri ve geri yaylanmayı azaltmasına rağmen, bükme zamanını arttırdığından, maliyetin de artması söz konusudur. Bu nedenle uygulaması yapılırken tüm koşullar dikkate alınmalıdır (Thipprakmas, 2011).

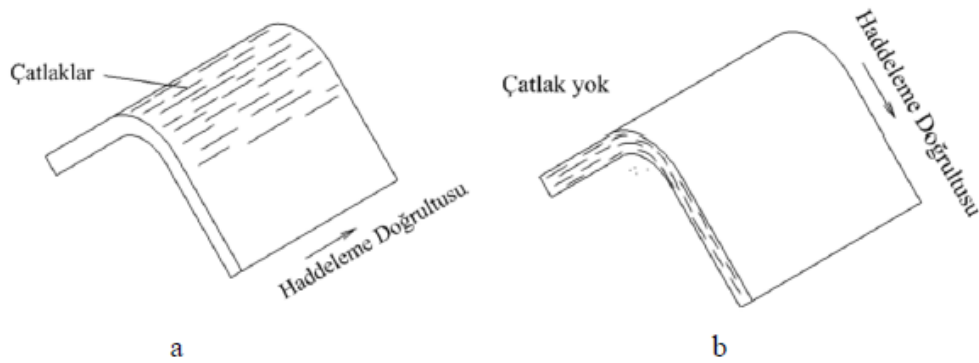
#### **2.4.1.4. Hadde doğrultusunun ileri ve geri yaylanmaya etkisi**

Hadde doğrultusu şekillendirilebilirliği etkileyen en önemli parametrelerden biridir (Şekil 2.11). Metallerde anizotropinin en önemli nedeni, malzeme yapısındaki tanelerin kristalografik düzensizliğidir. Taneler, farklı doğrultularda yönelmektedirler (Özdemir, 2015).



**Şekil 2.11.** Sac metal levhannın hadde doğrultuları (Özdemir, 2015)

Soğuk haddelenmiş saclarda kalıntı boşlukların haddeleme doğrultusunda uzaması ve sıralanmasıyla oluşan bantlı yapı malzemede anizotropi oluşturur (Shukla ve Gautam, 2014). Bantlı mikro yapı, haddeleme doğrultusuna paralel doğrultuda çok sık tekrarlanan süreksizliklerden dolayı anizotropudur ve bu doğrultuda süneklik düşüktür. Dolayısıyla bükmede hadde doğrultusu çok önemlidir. Bükme düzlemi sacın haddeleme doğrultusuna dik olmalıdır aksi takdirde bükme bölgesinde çatlaklar oluşmaya başlar (Şekil 2.12). Bu nedenle bükülecek bir sac levha veya rulodan kesilirken bu nokta kesinlikle unutulmamalıdır (Çapan, 1999).



**Şekil 2.12.** Bükme işleminde hadde doğrultusunun gösterilmesi a) Hadde doğrultusuna paralel bükme b) Hadde doğrultusuna dik bükme (Çapan, 1999)

Levha veya şerit malzemelerin hadde doğrultusundaki bükme işleminde, bükme yarıçapı sınırlıdır. Hatalı bükmeyi önlemek için şerit malzeme, sac levha hadde doğrultusuna göre belli bir eğim açısı altında kesilir. Hadde doğrultusuna göre şerit malzeme eğim açısı büyütülebilir. Genellikle hadde doğrultusuna dik bükme en çok

uygulanandır, ancak bazı malzemelerde yarıçapı küçük bükmelerde mümkün olmayabilir (Çapan, 1999).

Burada haddeme doğrultusu ile hadde doğrultusuna göre gerçekleştirilen bükme kavramları birbirine karıştırılmamalıdır. Hadde doğrultusuna dik bükme, sac plakadan hadde doğrultusuna paralel  $0^\circ$  kesim ile elde edilen sac numuneye uygulanmaktadır. Aynı şekilde hadde doğrultusuna paralel bükme, sac plakadan hadde doğrultusuna dik  $90^\circ$  kesim ile elde edilen sac numuneye uygulanmaktadır.

#### **2.4.1.5. Bükme kuvvetinin ileri ve geri yaylanma miktarına etkisi**

Bütün 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 artırılmasının geri yaylanmayı azalttığını gösterse de, bükme kuvvetinin gereğinden fazla uygulanması hem malzemede istenmeyen şekil değişikliğine yol açacak hem de malzemenin dayanımını ciddi oranda azaltacaktır (Erişkin, 1986).

#### **2.4.1.6. Bükme yarıçapının ileri ve geri yaylanma miktarına etkisi**

Bükme işleminde, bükme yarıçapının ileri ve geri yaylanma üzerindeki etkisi oldukça önemlidir. Bükme yarıçapı küçüldükçe şekil değişimi artar. Özellikle iç kavis sifira yaklaştıkça dış tarafta uzama artar ve çatlamalara neden olur. Bu durum bükmede iç kavisin sifir olamayacağını gösterir. Uygun olmayan bir bükme yarıçapı seçimi ileri ve geri yaylanma miktarı artırır veya azaltır (Uzun ve Erişkin, 1997).

Geri yaylanma, bükme yarıçapıyla doğru orantılı; ileri yaylanma ise ters orantılı olarak değişir.  $R/S$  oranı ileri ve geri yaylanmayı etkilemektedir.  $R/S$  oranı arttıkça geri yaylanma artarken, ileri yaylanma miktarı azalmaktadır (Özdemir, 2015).

#### **2.4.1.7. Bükme açısının ileri ve geri yaylanma miktarına etkisi**

Bükme açısı, ileri ve geri yaylanma miktarını etkileyen en önemli etkenlerden biridir. İstenilen açıdaki bükmenin elde edilebilmesi için, zımbaya verilmesi gereken bükme açısı ileri ve geri yaylanma miktarı kadar azaltılır veya arttırılır. Bükme açısının arttırılması veya azaltılması malzeme cinsine göre değişiklik göstermektedir (Thipprakmas, 2011; Özdemir ve ark., 2014; Uzun ve Erişkin, 1997). Yumuşak çelik, alüminyum, bakır, pirinç için ileri ve geri yaylanma sert malzemelere göre daha azdır. İleri ve geri yaylanma miktarı tam olarak bilindiği zaman, bükme zımbası, geri yaylanma miktarı kadar küçültülerek veya ileri yaylanma değeri kadar büyütülerek istenilen bükme elde edilebilir (Özdemir, 2015).

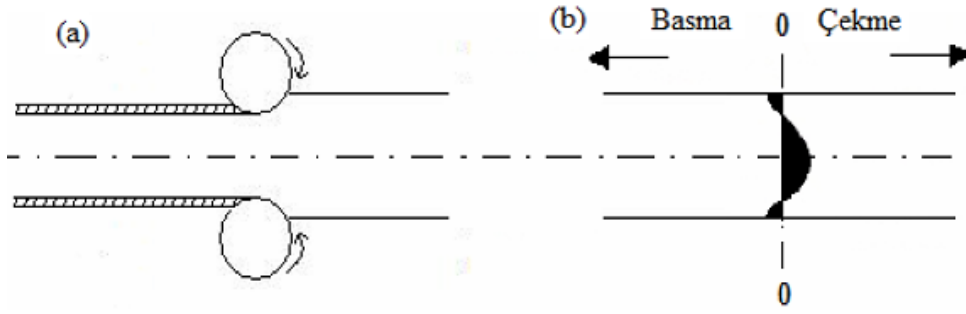
#### **2.4.1.8. Tane boyutunun ileri ve geri yaylanma miktarına etkisi**

Tane boyutu küçük malzemelerde akma dayanımı yüksekken, şekillendirilebilirlik kötü olmaktadır. Tane boyutu büyük olanlarda ise akma dayanımı düşmekte, şekillendirilebilirlik ise 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 yaylanma miktarının daha fazla olması beklenebilir (Işıқтаş, 2011).

#### **2.4.1.9. Kalıntı gerilmelerin ileri ve geri yaylanma miktarına etkisi**

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, ısı 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 (Özdemir, 2015).



**Şekil 2.13.** Kalıntı gerilmeler a) Haddedeleme üniform olmayan plastik deformasyon b) Oluşan kalıntı gerilmelerin şematik dağılımı (Özçatalbaş, 2008)

Plastik deformasyon sadece yüzeye yakın kısımlarda meydana geldiğinden, buradaki taneler deformasyon sonucu uzar, iç kısımdaki taneler ise deformasyondan etkilenmediği için aynı kalır (Şekil 2.13). 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 (Özdemir, 2015).

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 ısı işlem ile azaltılabilir veya yok edilebilir. Kalıntı gerilmelerin bulunduğu bir parça, yeterli bir süre oda sıcaklığında bırakıldığı zamanda bu gerilmeler yok olabilir (Özçatalbaş, 2008).

#### **2.4.1.10. İşlem parametrelerinin ileri ve geri yaylanma miktarına etkisi**

İşlem parametreleri, malzemenin bulunduğu ortamın fiziksel koşulları ile ilgili etkenlerdir. Burada ortamın sıcaklığı, ıslığı, kirliliği, ıslak/kuru gibi parametrelerin malzemenin fiziksel özelliklerini az da olsa etkilediği çeşitli deney ve araştırmalarla saptanmıştır. Bu yüzden bükülecek sac malzeme istenilen çalışma koşullarına uygun olarak bükülmeli, bükme yapılan pres, kalıbın dişi ve erkek kısımları temiz olmalı, ortam sıcaklığı iyi ayarlanmalıdır (Uzun ve Erişkin, 1997).

#### **2.4.2. İleri ve geri yaylanmanın telafisi**

Sac malzemelerin şekillendirilmesinde ileri ve geri yaylanma, şekillendirme sonrası istenilen parça geometrisini etkilemektedir. Bu nedenle ileri ve geri yaylanmanın telafi edilmesi gerekmektedir. Uygun kalıp tasarımları ile bu yaylanmalara müdahale etmek mümkün olmaktadır (Gan ve Wagoner, 2004). Ancak, tamamen ortadan kaldırılması mümkün değildir. İleri ve geri yaylanmayı telafi edebilmek amacıyla çeşitli yöntemlerden faydalanılmaktadır (Tekiner, 2004).

Bükme işlemi sonrası karşılaşılan ileri ve geri yaylanmayı telafi etmede en sık karşılaşılan yöntemlerden biri aşırı bükmedir (Carden ve ark., 2002). Bu yöntemde, yaylanma miktarı önceden tahmin edilmekte ve tahmin edilen bu açı değerine göre sac malzeme daha fazla veya daha az bükülmektedir. Böylece, bükme momentinin kaldırılmasının ardından, parça tahmin edilen açı değeri kadar ileri veya geri yaylanmakta ve istenilen parça geometrisi elde edilmektedir (Tekiner, 2004).

Bükme telafisi amacıyla uygulanabilecek bir diğer yöntem de bükme bölgesinin ezilmesidir. Bu yöntemde, erkek kalıp geometrisi farklılık göstermekte ve erkek kalıp bükülen sac malzemenin yarıçap bölgesini ezerek daha fazla kalıcı deformasyon yaratılmasına imkân tanımaktadır (Schey, 1987).

Gererek bükme işlemi de en sık kullanılan ileri ve geri yaylanma telafi yöntemlerinden biridir.



Bu yöntemde, bükme işlemi sırasında ya da sonrasında sac çekme veya basma gerilmesine maruz bırakılmakta ve böylece yaylanma değeri minimize edilmektedir (Chen ve Koç, 2007).

Açık kalıpta bükme işleminde de ileri ve geri yaylanma telafisi istenmektedir. Bu amaçla, zımba konumu kontrolü gerçekleştirilmektedir. Böylece, ileri ve geri yaylanma açısına bağlı olarak, daha fazla ya da daha az bükme yapılması gerektiğinde erkek kalıp pozisyonu ayarlanmaktadır (Wang ve ark., 2007). Bu bağlamda, açık kalıpta bükme işleminin ileri ve geri yaylanmayı telafi etmek amacıyla, fazladan bükmeye izin verdiği söylenebilir (Wang ve ark., 2007).

## **2.5. Paslanmaz Çelikler**

Paslanmaz çelikler; içerisinde ağırlıkça en az % 10,5 oranında krom (Cr) içeren demir esaslı alaşımlar olarak tanımlanmaktadır (Odabaş, 2004).

Çelikler diğer demir alaşımlarının büyük bir kısmı gibi, atmosferde oksitlenirler ve yüzeylerinde pas olarak adlandırdığımız bir oksit tabakası oluşur. Alüminyum ve kromun yüzeyinde oluşan koruyucu oksit tabakasının tersine çeliğin yüzeyini kaplayan pas, oksitlenmenin iç kısımlara ilerlemesine engel olmaz. Paslanmaz çeliklerde ise korozyon direnci, artan krom miktarına bağlı olarak yükselmektedir. Çeliğin paslanmazlığı konusunda birçok görüş mevcuttur. Bunlardan en kabul göreni; sıkı ve ince bir krom oksit tabakasının paslanmaz çelik üzerinde oluştuğu ve bu tabakanın oksidasyonun yani korozyonun ilerlemesine engel olduğudur (Kaluç ve Tülbentçi, 1995).

Çeliğin içeriğindeki kromun bu koruyucu etkisi, krom ile oksijen arasındaki güçlü kimyasal etkileşimden ileri gelmektedir. Krom içeren çeliklerin yüzeyleri bir kromoksit tabakası ile kaplı olmadıkları süre boyunca korozyona ve özellikle oksidasyona karşı çok hassastırlar. Bu duruma aktif hal denir. Oksit tabakası, oluşma imkânı bulduğunda metali korozif ortamlara karşı korur. Bu durumda çelik pasifleşmiş olur.

Pasivitenin sınırları ve derecesi, ortamın aktivitesi ile paslanmaz çeliğin türüne ve bileşimine bağlıdır. Uygun koşullarda pasivite kalıcıdır ve paslanmaz çeliğin korozyon hızı düşüktür. Bu pasif film yok olduğunda ve tekrar oluşması için gerekli koşulların bulunmaması durumunda, paslanmaz çelik normal karbonlu ve az alaşımlı çelikler gibi korozyona uğrayabilir. İşte bu yüzden paslanmaz çelik korozyon direnci oluşturabilmesi için en az %12 Cr içermeli ve ortamda oksijen bulunmalıdır (Dallas, 2003).

Paslanmaz çeliğin yüzeyinde pasif bir tabakanın oluşabilmesi için bir kimyasal işleme gerek yoktur. Bu film, yüzeyin hava oksijeni ile teması halinde çabuk oluşur. Pasivasyon işlemi yüzeyde bulunan serbest demirin, oksitlerin ve diğer yüzey kirlerinin uzaklaştırılması esasına dayanır. Alaşım elementi olarak çeliğin içinde %12'yi aşan miktarda kromun bulunması, çeliği atmosferin olumsuz etkilerinden koruduğu gibi,  $\text{HNO}_3$  (nitrik asit) gibi oksitleyici asitlere karşı da korur. Buna karşılık yalnız krom içeren çelikler  $\text{HCl}$  (hidroklorik asit) ve  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (sülfürik asit) gibi asitlere karşı dayanıklı değildir. Bu asitler yüzeyi koruyan krom oksit tabakasını ortadan kaldırır ve dolayısı ile çelik korumasız kalır. Günümüz endüstrisinde redükleyici asitlere karşı da iyi bir direnç gösteren, içinde nikel, manganez ve molibden gibi alaşım elementleri bulunan paslanmaz çelikler üretilmektedir. Bu tür çelikler yapılarında kromun yanı sıra yüksek miktarlarda nikel, manganez ve molibden içerirler. Bu alaşım elementleri çeliklerin mikro yapılarını etkin bir biçimde değiştirebilir. Bu durum paslanmaz çeliklerin sınıflandırılmasına yardımcı olur. Günümüzde uygulama alanı bulmuş 170'den fazla paslanmaz çelik türü bilinmektedir. Bunun yanı sıra sürekli yeni alaşımlar üretilmekte ve eski alaşımlar da optimize edilerek özellikleri geliştirilmektedir. Bazı paslanmaz çelik türlerinde krom içeriği %30'a ulaşmakta, bazılarında da yeni elementler katılarak değişik özellikler elde edilmekte ve talaşlı işlenebilme kolaylığı sağlanmaktadır (Çalığülü, 2009).

### 2.5.1. Paslanmaz çeliklerin alaşım elementleri ve metalurjik 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. Çelikte bulunan elementleri, yabancı madde ve katkı elementleri olarak tanımlamak mümkündür. Yabancı madde, genellikle çeliğin elde edilmesi esnasında hammaddeden çeliğe geçen ve artılmayan elementlerdir. Bunlar fosfor, silisyum, kükürt, mangan, oksijen ve azottur. Karbon, çelikte daima mevcuttur ve çeliği çelik yapan en önemli elementtir. Alaşım elementleri ise çeliğe istenilerek katılan elementlerdir. Bazen yabancı madde olarak nitelendirilen bir element de alaşım elementi olarak çeliklere katabilir (Anonim, 2015).

Alaşım elementlerinin çeliklere kazandırdığı özellikler genel olarak şunlardır;

- Dayanımı artırmak
- Sertliği artırmak
- Sertleşirmeyi kolaylaştırmak
- 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

Karbon (C): 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 azaltır. İşlenebilirliğin ön planda olduğu çeliklerde karbon miktarı düşük tutulmalı, dayanım değerlerinin yüksek olması gerektiği durumlarda ise çeliğin karbon içeriği yüksek olmalıdır (Özdemir, 2015).

Krom (Cr): Krom paslanmaz çeliklerin temel alaşım elementidir. Korozyon ve oksidasyon direnci sağlar. Ferrit yapıcıdır. Sertleşebilme kabiliyetini artırır. Yüksek karbonlu çeliklerde aşınma direncini yükseltir. Krom, karbon ile tane sınırlarında biriken  $Cr_{23}C_6$  (krom-karbür) bileşimini oluşturur. Oluşan bu bileşik paslanmaz çeliklerde tane sınırlarındaki krom miktarını paslanmazlık sınırı olan %12'nin altına çeker (Köse ve Sakin, 2010).

Mangan (Mn): Mekanik özellikleri iyileştirmesi dolayısıyla ilave edilir. Temel alaşım elementi olarak da kendisini gösterebilir. Genel olarak sünekliği azaltmakla birlikte çeliğin dayanımını artırma özelliğine sahiptir. Çeliğin sertleşebilirliğini iyileştirici özelliktedir. Manganın iyi yöndeki etkisi karbon oranının artmasıyla birlikte artar (Özdemir, 2015).

Silisyum (Si): Silisyum oksijen giderici olarak kullanıldığı için çelik içinde yer alır. Çeliğin akma, çekme dayanımını ve elastikiyetini artırır. Çelik yapısındaki silisyum miktarı azaldıkça tufal oluşma oranı artar. Silisyum ucuz bir alaşım elementidir, yaygın olarak yüksek elastikiyet gerektiren yay çeliklerinde kullanılır. (Köse ve Sakin, 2010).

Fosfor (P): Fosfor çeliğin akma ve çekme dayanımını artırır. Yüzde uzamayı ve eğme özelliklerini çok fazla kötüleştirir. Soğuk kırılgenlik yaratır. Talaşlı şekillendirme kabiliyetini artırır. Fosfor çelik içinde üretim işlemlerinden kalan bir elementtir ve istenmeyen özellikleri nedeniyle mümkün mertebe yapıdan uzaklaştırılır (Köse ve Sakin, 2010).

Kükürt (S): Demir ile birlikte demir-sülfür bileşimi oluşturarak, tane sınırlarında birikerek malzemenin gevrek olmasına yol açar (Özdemir, 2015).

Nikel (Ni): Nikel, tavlı çeliklerde dayanımı ve darbe tokluğunu artırır. Östenit kararlaştırıcı bir elementtir. Östenitik paslanmaz çeliklere yüksek şekillendirilebilme özelliği kazandırır (Gürü ve Yalçın, 2012).

Molibden (Mo): Bir karbür ve ferrit yapıcıdır. Tane büyümesini önler ve sertleşebilme kabiliyetini artırır. Meneviş gevrekliğini giderir. Ayrıca çeliklerin sürünme dayanımını ve aşınma direncini yükseltir. Paslanmaz çeliklerde özellikle oyuklanma korozyonunu engellediği için korozyon direncini önemli ölçüde artırır (Gürü ve Yalçın, 2012).

Çinko (Zn): Dökülebilirliği düşürür. Yüksek çinkolu alaşımlar sıcak çatlama ve soğuma çekmesi gösterirler. Diğer alaşım elementleriyle birlikte dayanımı çok artırır (Can, 2010).

Kobalt (Co): Alaşımli takım çeliklerinde kullanılan bir alaşım elementidir. Takım çeliklerinin sıcakta sertliğini muhafaza etmesi için kullanılır (Özdemir, 2015).

Tungsten (W): Aşınma direncini artıran, sıcakta sertliğin muhafazasını sağlayan bir alaşım elementidir. Özellikle hız çeliklerinde olmak üzere alaşımli takım çeliklerinde yaygın olarak kullanılan bir elementidir (Anonim, 2015).

Vanadyum (V): Tane küçültme etkisi yaparak çeliklerin akma ve çekme dayanımlarını oldukça artırır. Karbür yapıcı etkisi ile mikro alaşımli çeliklerde niyobyum ve titanyum ile birlikte kullanılan bir mikro alaşım elementidir. Bu elementler tekli, ikili ve üçlü kompozisyonlar halinde mikro yapı içerisinde oluşturdukları karbonitrür çökeltileri ile tane boyutunu inceltmelerinin yanı sıra çökelti sertleşmesi mekanizmasıyla dayanımı artırırlar (Anonim, 2015).

Titanyum (Ti): Kuvvetli bir karbür ve nitrür yapıcıdır. Vanadyum gibi tane küçültücü etkisi vardır. Paslanmaz çeliklerde krom karbürün olumsuz etkisini giderebilmek için karbür oluşturucu alaşım elementi olarak kullanılır (Özdemir, 2015).

Niyobyum (Nb): Kuvvetli bir karbür yapıcıdır. Mikro alaşımli çeliklerde tane küçültme etkisi en yüksek olan mikro alaşım elementidir. Paslanmaz çeliklerde titanyumun yaptığı etkiyi yapar ve titanyumla birlikte veya tek başına kullanılır (Özdemir, 2015).

Ayrıca malzeme içerisindeki karbonla birleşerek krom karbür çökmesini önler. Tane küçültücü etkisi olup, ferrit oluşumuna katkıda bulunmaktadır (Odabaş, 2004).

Alüminyum (Al): Oksijeni gidermek için kullanılır. Akma dayanımını ve darbe tokluğunu artırıcı etki gösterir. Tane küçültücü etkisi vardır (Anonim, 2010).

Kalay (Sn): Akma ve çekme dayanımlarını pek etkilemez, fakat sıcak haddemelerde sorunlar yaratır. Düşük ergime sıcaklığına sahip bileşikler yaparak haddeme sırasında kopmalara neden olur (Anonim, 2010).

Bakır (Cu): Akma ve çekme dayanımını artırırken yüzde uzamayı ve şekillenebilirliği azaltır. Soğuk çekilebilirliği kötü yönde etkiler. Korozyon direncini yükselten etki gösterir (Anonim, 2010).

Azot (N): Nitrür teşekkül ettirdiği için önemlidir. Çelikte yaşlanma meydana getirir. Yaşlanmanın sorun olmadığı durumlarda, sertliği, mekanik dayanımı ve atmosfer korozyonuna karşı dayanımı artırır (Kuş, 2007).

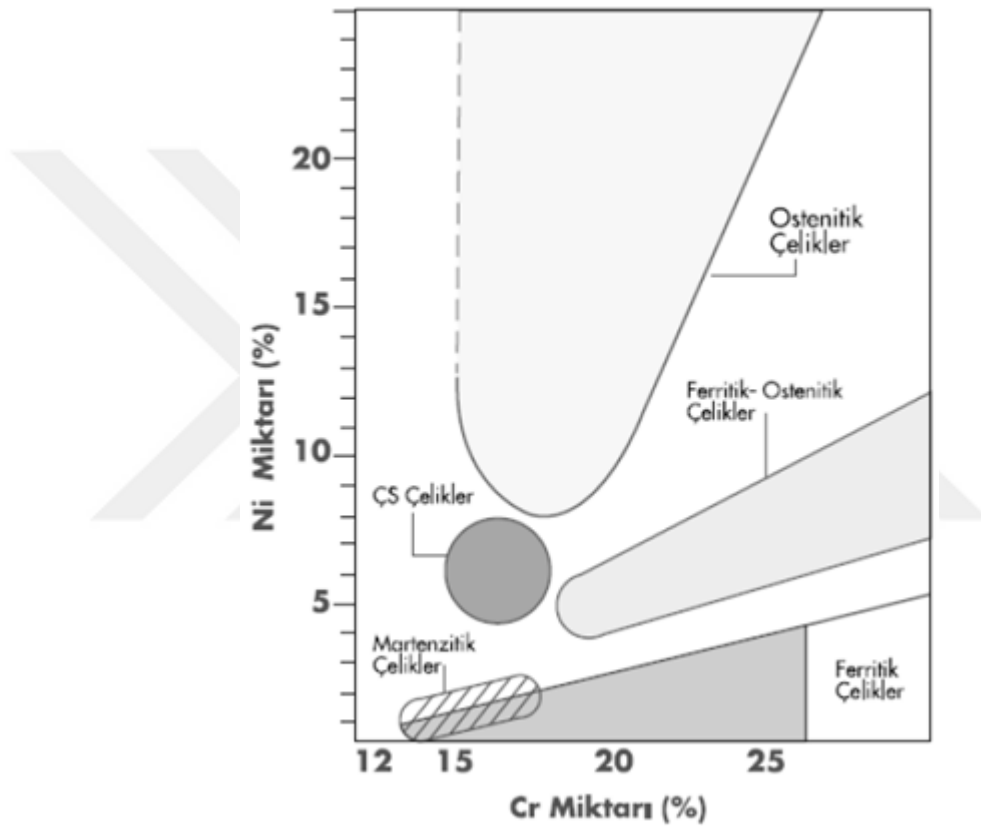
Çizelge 2.1. Alaşım elementlerinin çelik özelliklerine etkisi (Özdemir, 2015)

Alaşım Elementi	Sertlik	Mukavemet	Akma Noktası	Uzama	Kesit Daralması	Darbe Direnci	Elastisite	Yüksek Sıcaklığa Dayanım	Soğuma Hızı	Karbür Oluşumu	Aşınma Direnci	Dövülebilirlik	İşlenebilirlik	Oksitlenme Eğilimi	Korozyon Dayanımı
Si	↑	↑	↑↑	↓	~	↓	↑↑↑	↑	↓	↓	↓↓↓	↓	↓	↓	-
Mn*	↑	↑	↑	~	~	~	↑	~	↓	~	↓↓	↑	↓	~	-
Mn**	↓↓↓	↑	↓	↑↑↑	~	-	-	-	↓↓	-	-	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	-
Cr	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓↓↓	↑↑	↑	↓	-	↓↓↓	↑↑↑
Ni	↑	↑	↑	~	~	~	-	↑	↓↓	-	↓↓	↓	↓	↓	-
Al	-	-	-	-	↓	↓	-	-	-	-	-	↓↓	-	↓↓	-
W	↑	↑	↑	↓	↓	~	-	↑↑↑	↓↓	↑↑	↑↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	-
V	↑	↑	↑	~	~	↑	↑	↑↑	↓	↑↑	↑↑	↑	-	↓	↑
Co	↑	↑	↑	↓	↓	↓	-	↑↑	↑↑	-	↑↑↑	↓	~	↓	-
Mo	↑	↑	↑	↓	↓	↓	-	↑↑	↓↓	↑↑↑	↑↑	↓	↓	↑↑	-
S				↓	↓	↓	-	-	-	-	-	↓↓↓	↑↑↑	-	↓
P	↑	↑	↑	↓	↓	↓↓↓	-	-	-	-	-	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	↑↑
*perlitik çeliklerde								↑			~				
**östenitik çeliklerde								artırır	azaltır	değiştirmez		önemsiz			

Çizelge 2.1'de çeşitli alaşım elementlerinin çeliğin mekanik ve kimyasal özelliklerine etkisi gösterilmiştir.

### 2.5.2. Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması

Genel olarak paslanmaz çelikler Fe-Cr-Ni alaşımlarıdır. İçerdikleri alaşım elementleri artırılarak veya azaltılarak farklı tür paslanmaz çelikler elde edilebilir. Paslanmaz çelikler, içerdikleri krom ve nikel miktarına bağlı olarak Şekil 2.14'te görüldüğü gibi 5 ana grupta sınıflandırılırlar (Teker, 2010).



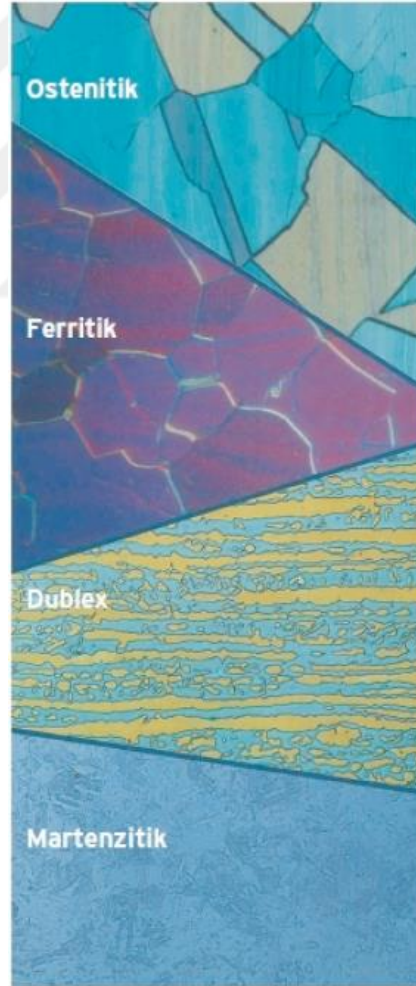
Şekil 2.14. Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması (Aran, 2003)

Paslanmaz çelik türleri;

- Ferritik paslanmaz çelikler
- Martenzitik paslanmaz çelikler
- Östenitik paslanmaz çelikler
- Dupleks paslanmaz çelikler
- Çöktürme sertleşmeli paslanmaz çelikler



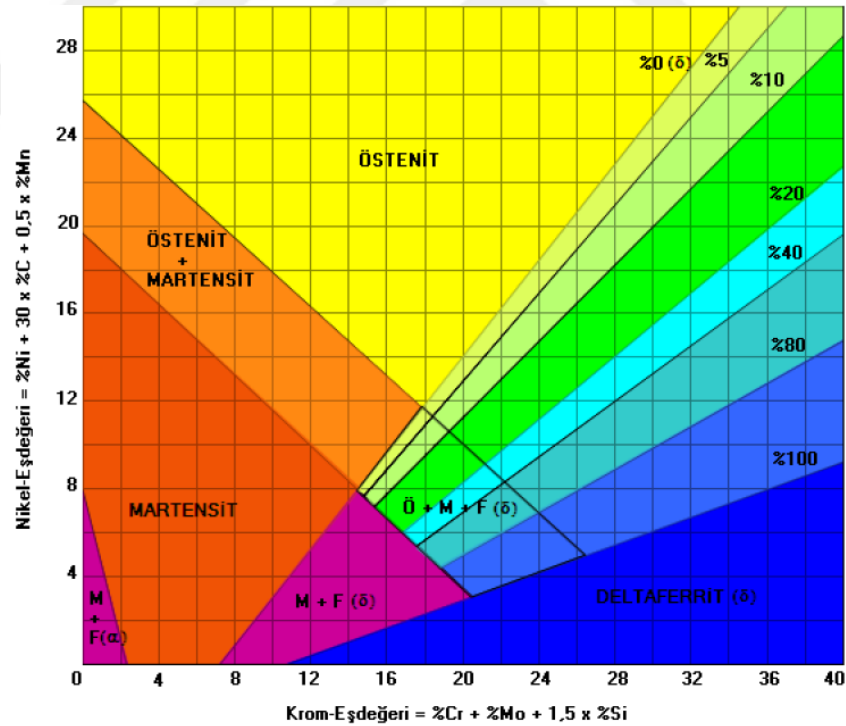
Paslanmaz çeliklerde mikro yapıyı belirleyen en önemli alaşım elementleri, önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangandır. Bunlardan, krom ve nikel mikro yapının ferritik veya östenitik olmasını belirler. Beş ana grup çatısı altında toplanan paslanmaz çeliklere ait mikro yapı görüntüleri Resim 2.1'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi östenitik paslanmaz çeliklerin mikro yapısı östenit tanelerinden meydana gelirken, ferritik paslanmaz çeliklerin yapısı ince ferrit tanelerinden oluşmaktadır. Martenzitik paslanmaz çeliklerin yapıları ise ferrit tane yapısı içerisindeki karbür dağılımları şeklinde görülmektedir. Dupleks paslanmaz çeliklerin yapısı ise östenit matris içerisinde uzanmış ferrit levhalarından meydana gelmektedir (Teke, 2010).



**Resim 2.1.** Paslanmaz çelik türlerine ait mikro yapı görüntüleri (Aran, 2003)

Paslanmaz çeliklerde karbon %0,02 ile 1 arasında olabilir, düşük karbon miktarları daha tipiktir. Yüksek oranlar martenzitik çeliklerde söz konusudur. Çelik bileşimindeki karbon yüzdesi yükseldikçe krom miktarı artırılmalı veya karbür yapma eğilimi kromdan fazla olan elementler katılarak, krom karbürün meydana gelmesi ve kafeste çözülmüş kromun azalması engellenmelidir (Teker, 2010).

Paslanmaz çeliklerin istenilen mikro yapı ve diğer özelliklerinin elde edilebilmesi için bileşiminde Mn, Si, Mo, Ni, Ti ve N gibi alaşım elementleri kullanılmıştır. Paslanmaz çeliklerin mikro yapısı üzerine bileşimin etkisini ayrıntılı olarak tanımlamak amacıyla Cr ve Ni eşdeğerliği kavramı geliştirilmiştir. Şekil 2.15'te Cr ve Ni eşdeğerliklerinin karşılıklı olarak verildiği Schaffler diyagramı, paslanmaz çeliklerde mikro yapı ve bileşim arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır (Smith ve Farrar, 1993).



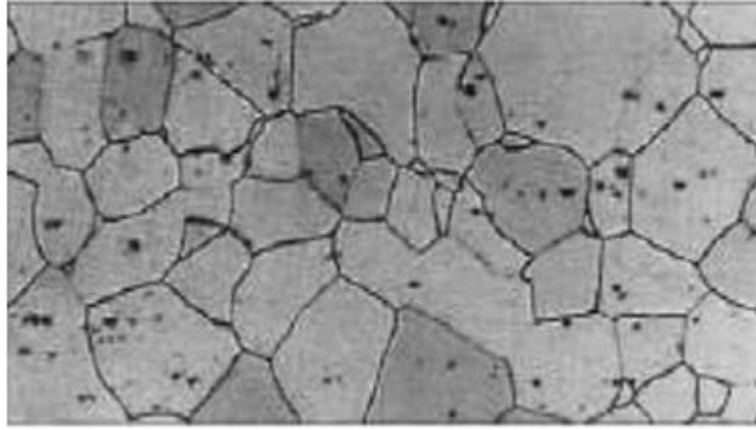
Şekil 2.15. Shaeffler diyagramı (Folkhard ve Verlag, 1987)

### 2.5.2.1. Ferritik paslanmaz çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler AISI 400 serisi paslanmaz çelik sınıfındandır. Bu çelikler genellikle %11-28 arasında krom (Cr) içeriğine sahiptirler. Ferritik çelikler, tasarım mühendisliği açısından önemlidir. Tavlama ve sertleştirme kutuları, otomobil egzoz sistemleri dönüştürücüleri, kondansatör kılıfları, yanma çemberleri, ısıtıcılar, motor kapakları, mutfak ekipmanları, otomobil süslemeleri gibi genel korozyon ve ısı direnci gereken yerlerde kükürt atmosferine maruz ekipmanların yapılarında kullanılırlar (Aran, 2003).

Başlıca özellikleri;

- Orta ile iyi derecede olan korozyon dayanımları vardır.
- Manyetikler.
- Düşük ısıl genleşmeye sahiptirler.
- Mükemmel yüksek sıcaklıkta oksitlenme direncine sahiptirler.
- Yüksek ısıl geçirgenliğe sahiptirler.
- Niyobyum ile stabilize edilmiş ferritikler mükemmel akma dayanımına sahiptirler.
- Östenitiklerle karşılaştırıldığında kesmek ve işlemek daha kolaydır.
- Soğuk biçimlendirme sırasında, östenitik çeliklere göre geri yaylanmaya daha az eğilimlidirler.
- AISI 304 tipi östenitik paslanmaz çeliklerle karşılaştırıldıklarında daha yüksek sünme dayanımına sahiptirler.
- Isıl işleme dayanımları artırılabilir (Gültekin, 1985).



**Resim 2.2.** Ferritik paslanmaz çeliğin mikro yapısı (Aran, 2003)

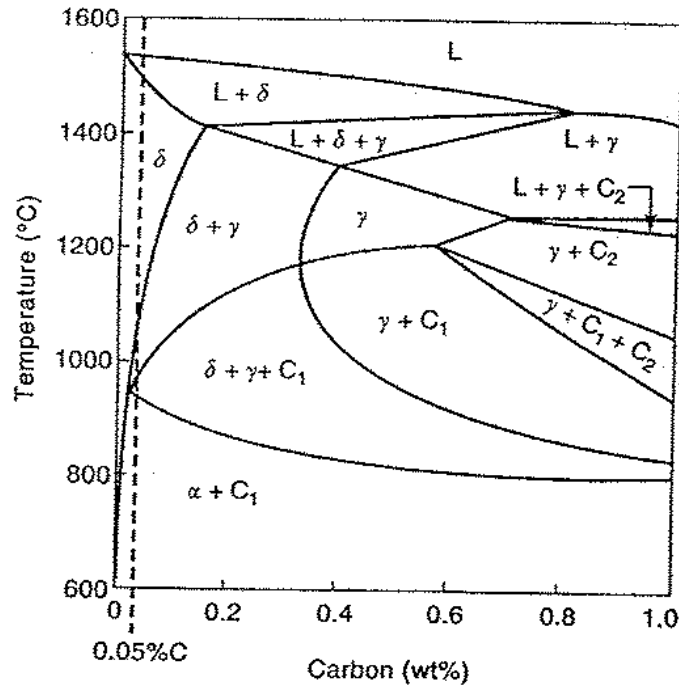
Ferritik paslanmaz çeliklerin tamamı ergime sıcaklığından oda sıcaklığına kadar, ferritik olarak bilinen hacim merkezli kübik (HMK) kristal kafes sistemine sahiptirler (Resim 2.2). Ferritik paslanmaz çelikler, östenitik paslanmaz çeliklere nazaran daha yüksek akma dayanımı ve daha düşük süneklığe sahiptirler (Mohandas ve ark., 1999).

Bu çelikler, soğutma hızı hassasiyetine sahiptirler. Soğutma hızına bağlı olarak, karbür ve nitrür çökeltmeleri tane sınırları boyunca aynı hızdayken, matriste rastgele dağılıma sahiptir. Bu yüzden tane boyutu, süneklik ve tokluk açısından önemli bir faktördür. Yüksek miktarda krom ve az miktarda karbon ihtiva etmelerinden dolayı martenzit oluşturmazlar. (Krysiak ve ark., 1993).

Karbür; sıkı paketlenmiş metal atomları arasındaki boşluklara yerleşen karbon atomlarının, metal atomları ile birleşerek karbür şeklinde yeni bir faz oluşturmasıdır (Woodhead, 1977).

Fe-Cr-C üçlü sistemi, ferritik paslanmaz çeliklerde meydana gelen faz dönüşümlerini tanımlamaktadır. %17 kromlu bir diyagram bu alaşımların fiziksel metalurjisini tanımlamak için yeterlidir. Şekil 2.16'da gösterilen diyagram, %0,05 C uygulanan normal bir karbon konsantrasyonu ile verilmiştir. Bu bileşim, 430 tip orta kromlu bir alaşıma yakındır (Castro ve Tricot, 1962).

Burada ilk katılaşma ferrit olarak meydana gelir. Yapı, diyagrama göre katılaşmanın sonunda tamamıyla ferrit olacaktır. Yaklaşık olarak 1100°C'nin altına soğutuluncaya kadar, katı halde ferritik olarak kalacaktır. Bu sıcaklıkta, bazılarının dönüşümü östenite olacak ve daha düşük sıcaklıklarda bazıları  $Cr_{23}C_6$  karbürlerine dönüşecektir. Dengeli soğuma şartları altında östenit, ferrite ve karbüre dönüşecek ve son yapı ferrit ve  $Cr_{23}C_6$  karbürlerinin bir karışımı olacaktır (Teker, 2010).



**Şekil 2.16.** %17 kromlu ferritik paslanmaz çelik faz diyagramı (Castro ve Tricot, 1964)

Ferritik paslanmaz çelikler, 900°C üzerinde ısıl işleme tabi kaldıklarında matris içinde çözülmüş eş eksenli krom karbür tanecikleri oluşmakta ve ardından hızlı soğuma sonucu bu krom karbür yapısı tane sınırlarına çökelmektedir. Ferritik paslanmaz çelikler bu dönüşümle fazla sertleşmekte, bu ise kırılganlığa ve düşük süneklığe neden olmaktadır (Smith, 2000).

Ferritik paslanmaz çeliklerde oluşan karbürlerin bileşimi, mikro yapısı, karbür dönüşümleri ve şekil değişimine bağlı olarak mikro yapıya etkileri vardır.

Zengin krom içeriklerinde 750-900°C sıcaklıklar arasında Cr elementinin çökmesiyle krom karbür oluşur. Tane sınırlarında çökelen ve taneler arası korozyonu hızlandıran krom karbürler burada kırılma yapı oluşmasına neden olurlar. Bu oluşum sırasında bir miktar krom, çözüldükten tane sınırlarına doğru yer değiştirir ve bunun sonucunda bu bölgesel alanlarda krom miktarında azalma olacağı için korozyon dayanımı düşer. Ferritik paslanmaz çelikte muhtemel faz,  $\alpha$ -Fe ve  $Cr_{23}C_6$  karbürüdür (Korkut, 1997).

Ferritik paslanmaz çelikleri içerdikleri krom miktarlarına göre üç grupta sınıflandırılır;

I. grup: Krom miktarı %11-13 arasında olanlar (405 ve 409 kaliteleri)

II. grup: Krom miktarı yaklaşık %17 olanlar (430 ve 434 kaliteleri)

III. grup: Yüksek kromlular %19-30 (süperferritikler 442 ve 446 kaliteleri)

I. grup ferritik paslanmaz çelikler, korozyon ve yüksek sıcaklıklarda pul pul dökülmeye, yani hidrojen kırılma dayanıklılığına karşı dayanıklıdır. Çizelge 2.2'de standart tip I. grup ferritik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri görülmektedir. Krom oranı düşük olan birinci grup, orta derecede korozyon ve oksidasyon dayanımının yanında düşük fiyat ve iyi imalat özelliklerine sahiptir. Otomotiv ve egzoz parçalarında tercih edilen bu grup içinde en çok kullanılanı 409 kalitedir (Krysiak ve ark., 1993).

**Çizelge 2.2.** I. grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler  
(Krysiak ve ark., 1993)

Tipi	% Bileşim				
	C	Cr	Mo	Ni	Diğer
405	0,08	11,5-14,5	-	-	0,1-0,3 Al
409	0,08	10,5-11,5	-	0,5	0,48-0,75 Ti
409 C	0,02	12,5	-	0,2	0,4 Nb
441	0,02	18,5	-	0,3	0,7 Nb, 0,3 Ti
AL 443	0,02	19,0	-	0,3	0,4 Nb, 0,1 Ti
AL 446	0,01	11,5	-	0,2	0,2 Nb, 0,1 Ti
AL 468	0,01	18,2	-	0,2	0,2 Nb, 0,1 Ti
YUS 436 S	0,01	17,4	1,2	-	0,2 Ti
439	0,07	12,0	-	-	1,2 Al, 0,3 Ti
12 SR	0,2	12,0	-	-	2 Al, 0,4 Ti
18 SR	0,04	18,0	-	-	2 Al, 0,4 Ti
406	0,06	12,0-14,0	-	0,5	2,75-4,25 Al, 0,6 Ti

II. grup ferritik paslanmaz çelikler, standart tip ferritik paslanmaz çeliklerin biraz değiştirilmiş halidir. Bu gruptaki ferritik paslanmaz çelikler, daha düşük oranda karbon ve krom içerir. Orta derecede krom içeren ve otomotiv sac parçaları ve mutfak gereçleri yapımında kullanılan bu grup, düşük tokluk ile göze çarpar. Yüksek sıcaklık uygulamaları, tarımsal ilaçlama tankları ve otomotiv sanayinde kullanılmaktadırlar. Çizelge 2.3'te II. grup standart tip ferritik paslanmaz çelikler görülmektedir (Krysiak ve ark., 1993).

**Çizelge 2.3.** II. grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler  
(Krysiak ve ark., 1993)

Tipi	% Bileşim			
	C	Cr	Mo	Diğer
429	0,12	14,0-16,0	-	-
430	0,12	16,0-18,0	-	-
430 F	0,12	16,0-18,0	0,6	0,06 P
430 FSe	0,12	16,0-18,0	-	-
434	0,12	16,0-18,0	0,75-1,25	0,6 Nb + Ta
436	0,12	16,0-18,0	0,75-1,25	-
442	0,20	18,0-23,0	-	-
446	0,20	23,0-27,0	-	-

III. grup ferritik paslanmaz çelikler, yüksek krom ve molibden içerikli ferritik paslanmaz çeliklerdir. Genel korozyon, oyuklaşma korozyonu ve gerilmeli korozyon kırılmasına karşı dayanıma sahiptirler (Krysiak ve ark., 1993). Çizelge 2.4'te standart tip III. grup ferritik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri görülmektedir.

**Çizelge 2.4.** III. grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler (Krysiak ve ark., 1993)

Tipi	% Bileşim					
	C	N	Cr	Mo	Ni	Diğer
E-Brite 26-1	0,01	0,015	25-27	0,75-1,5	0,30	0,4 Mn
AL 29-4-2	0,01	0,020	28-30	3,5-4,2	2-2,5	-
AL 29-4	0,01	0,020	28-30	3,5-4,2	0,15	0,3 Mn
SHOMAC 30-2	0,003	0,007	30	2	0,2	0,3 Mn
YUS 190 L	0,004	0,0085	18	2	0,4	-

#### AISI 430 ferritik paslanmaz çeliği

%17 Cr içeren AISI 430, temel bir ferritik paslanmaz çeliktir (Çizelge 2.5). Bu tip ferritik paslanmaz çelikler yüksek gerilmeli korozyon çatlaması direnci gösterirler fakat sınırlı genel ve çukurcuk korozyon direncine sahiptirler. 430 tipi paslanmaz çeliğin uygulama alanları; otomotiv endüstrisi, nitrik asit tankları ve gıda işleme ekipmanlarıdır. Bu kalitedeki malzemelerin hareketli parçalarda ve çarpışmanın olduğu parçalarda kullanılması tavsiye edilmemektedir. Oldukça parlak ve dekoratif görünüme sahip olan bu tür paslanmaz çelikler, Dünya paslanmaz çelik türlerinde östenitik paslanmaz çeliklerden sonra en büyük pazar payı ile ikinci sıradadırlar. Ayrıca, bünyelerine katılan alaşım elementleriyle geliştirilmiş türleri, talaşlı şekillendirilebilme özellikleri iyileştirilerek paslanmaz makine elemanlarının imalatında kullanılmaktadır. Nikel olmadığından dolayı bu malzemeler, genelde gerilmeli korozyon çatlağına karşı dirençlidirler. Bu yüzden, klor içeren ortamlarda, östenitik paslanmaz çeliklerinin yerini almaktadır (Demo, 1977; Bond, 1969; Nichol ve Davis, 1978).



**Çizelge 2.5.** AISI 430 paslanmaz çelik malzemenin ağırlıkça % kimyasal bileşimi ile fiziksel, mekanik, yüksek sıcaklık ve imalat özellikleri (Çelik, 2006; Aran ve Temel, 2004)

Alaşım Elementleri	Cr	C	Mn	P	S	Si
%	16,0-18,0	0,12	1,00	0,04	0,03	1,00
Standart Numaraları	ASTM 430		EN 1.4016		UNS S43000	
<b>Fiziksel Özellikleri</b>						
Elastik modülü [GPa]			220			
Özgül ağırlık [gr/cm <sup>3</sup> ]			7,7			
Isıl genleşme katsayısı [1/K]			10			
Elektrik direnci [ $\Omega$ mm <sup>2</sup> /m]			0,60			
Özgül sıcaklık [J/kg.K]			460			
Isıl iletkenliği [W/m.K]			25			
Isıl iletkenliği [W/m.K]			25			
Manyetiklik			Var			
<b>Mekanik Özellikleri</b>						
	%0,2 Akma Dayanımı [MPa]	Çekme Dayanımı [MPa]	Kopma Uzaması [%]	Sertlik [Brinell]		
Tavlanmış durumda	En az 210	430-600	>20	150-190		
<b>Yüksek Sıcaklık Özellikleri</b>						
Sıcaklık [°C]	100	200	300	400		
Elastik modülü [GPa]	216	212	206	197		
%0,2 Akma dayanımı [MPa]	220	210	200	190		
Isıl genleşme katsayısı [1/K]	10	10	10,5	10,5		

**Çizelge 2.5.** (Devam) AISI 430 paslanmaz çelik malzemenin ağırlıkça % kimyasal bileşimi ile fiziksel, mekanik, yüksek sıcaklık ve imalat özellikleri (Çelik, 2006; Aran ve Temel, 2004)

İmalat Özellikleri	
Tavlama sıcaklığı	750-800°C sıcaklık aralığında 20-30 dakika tutulur. Tavlama sonrasında kalınlığa bağlı olarak su veya havada soğutulur. İşlem sonrası yüzeyde oluşan renk değişimleri veya tufal oluşumları kimyasal veya mekanik olarak giderilemez ise korozyon dayanımı olumsuz etkilenir.
Gerilme giderme tavlama	650-700°C sıcaklık aralığında 15 dakika tutulur. İşlem sonrası yüzeyde oluşan renk değişimleri veya tufal oluşumları kimyasal veya mekanik olarak giderilemez ise korozyon dayanımı olumsuz etkilenir. Tavlama sonrasında kalınlığa bağlı olarak su veya havada soğutulur.
Sıcak şekillendirme	750-1050°C sıcaklık aralığında yapılır. Havada soğutulur. İşlem sonrası yüzeyde oluşan renk değişimleri veya tufal oluşumları kimyasal veya mekanik olarak giderilemez ise korozyon dayanımı olumsuz etkilenir.
Soğuk şekillendirme	Malzemenin kalınlığına bağlıdır. Ferritik çelikler düşük sıcaklıklarda gevrek olduklarından 3 mm kalınlıktaki saclar en az oda sıcaklığında olmak üzere şekillendirilebilirler. Daha kalın saclarda 100-300°C sıcaklığa ısıtmak gerekebilir. Soğuk haddelenmiş saclarda keskin köşeler haddelene doğrultusuna paralel olarak yapılmalıdır.
Talaşlı imalat	Yumuşak ferritik içyapı nedeniyle malzemenin sıvanma eğilimi vardır. Talaşlı işlenebilme özelliği dayanımı yaklaşık 500 MPa olan alaşımsız çeliğin işlenmesindeki koşullara benzer.
Kaynaklanabilirlik	Kaynak kabiliyeti orta düzeydedir. Gaz ergitme kaynağı hariç bütün yöntemler uygulanabilir. 3 mm'den kalın saclarda 100-200°C arasına ön ısıtma önerilir. Taneler arası korozyona dayanımı tekrar kazanması için kaynak sonrasında tavlama gerekir.

### 2.5.2.2. Martenzitik paslanmaz çelikler

Karbon miktarı %0,1'den fazla olan çelikler yüksek sıcaklıklarda östenitik mikro yapıya sahiptirler. Östenitleme sıcaklığı çeliğin türüne göre 950-1050°C arasındadır. Bu sıcaklıkta tutulan çeliğe su verilirse martenzitik bir mikro yapı elde edilir. Bu şekilde elde edilen yüksek sertlik ve mekanik dayanım, karbon yüzdesi ile birlikte artar. Ürün tipine bağlı olarak martenzitik çelikler tavllanmış veya ıslah edilmiş durumda pazara sunulur (Aran ve Temel, 2004).

Martenzitik paslanmaz çelikler; valfler, bağlantı elemanları, dişliler, pim, yük aktaran miller, zincirler, cerrahi dişçilik aletleri, makaslar yaylar, düşük karbonlu olanları ise türbin kanat ve çarklarında, buhar türbinlerinde kullanılır. Ferromanyetiklerdir, martenzitik paslanmaz çelikler genellikle atmosferik korozyona karşı dirençlidirler. İyapıları kübik hacim merkezli (KHM) veya sertleştirilmiş halde hacim merkezli tetragonal kristal kafes sisteminden meydana gelen yapıdadır (Çelik, 2006).

### 2.5.2.3. Östenitik paslanmaz çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler %16-26 krom, %10-24 nikel, %0,4'e kadar karbon ve diğer bazı özellikleri geliştirmek için katılmış molibden, titanyum, niyobyum, tantal ve azot gibi elementler içerirler (Aydın, 2002). Östenitik mikro yapı, dönüşüm göstermediği için normalleştirme ve sertleştirme ısıl işlemi uygulanamaz. Kromun ferrit yapıcı etkisi östenit yapıcı alaşım elementleri katılarak giderilir. Sertlik, sadece soğuk şekillendirme ile artırılabilir (Odabaş, 1998). Östenitik paslanmaz çelikler düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerden daha zor işlenirler. Düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklere göre dayanımlarının ve sünekliklerinin yüksek olması, yüksek deformasyon sertleşme eğilimleri ve düşük ısıl iletkenlikleri östenitik paslanmaz çeliklerin zor işlenmelerinin nedenleri olarak kabul edilir (Çiftçi, 2005).

#### 2.5.2.4. Dupleks paslanmaz çelikler

Çift fazlı çelikler olarak da adlandırılan bu çeliklerin mikro yapısında her iki faz bir arada bulunur. Bu sayede östenitik ve ferritik çeliklerine nazaran iyileştirilmiş özellikler gösterir. Östenitik çeliklere kıyasla daha iyi gerilme korozyonu dayanımına, ferritik çeliklere kıyaslandığında ise daha iyi tokluk ve sünekliğe sahiptirler (Gooch, 1992). Mikro yapıda eşit oranda HMK ferrit ve YMK östenit bulundurlar. Gerilmeli korozyon, kırılma dayanımı, mukavemet ve oyuklaşma korozyonuna karşı dayanıklıdırlar. Bu malzemeler asit ve su kaynaklı kloro karşı direncin gerektiği orta dereceli sıcaklık alanlarında kullanılırlar (Noble, 1993).

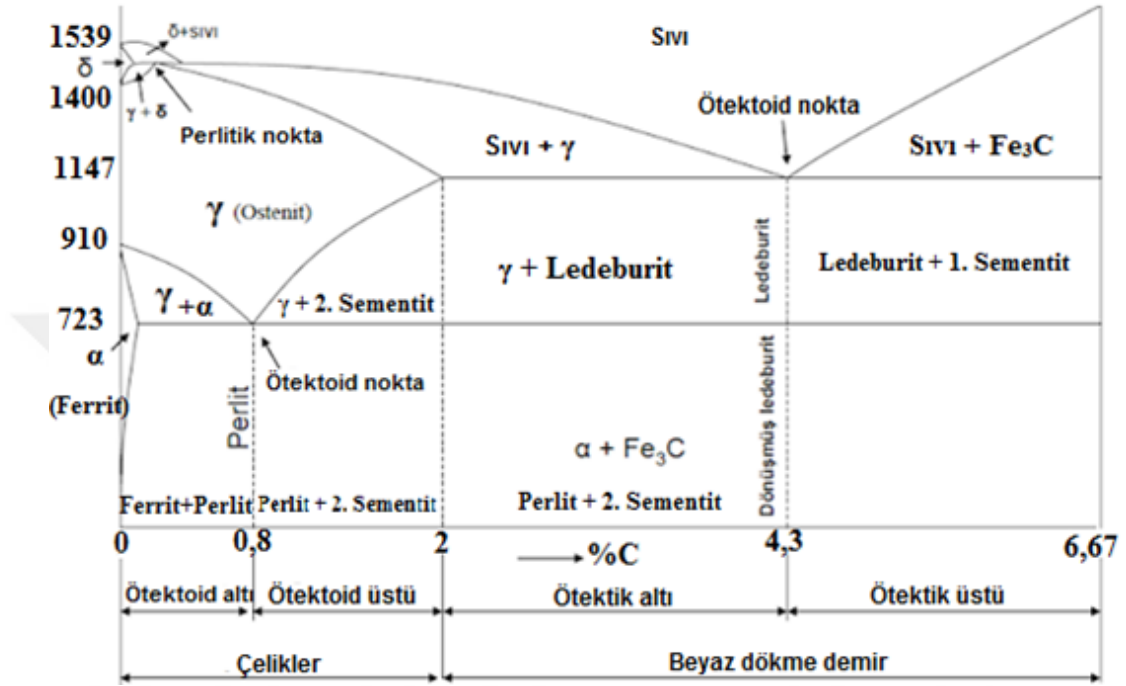
#### 2.5.2.5. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler

Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler bakır, molibden, niyobyum, titanyum ve alüminyum gibi alaşım elementleri içeren, bu elementlerin bir veya birkaçının etkisi ile çökelme sertleşmesi gösteren Fe-Cr-Ni içeren paslanmaz çelikler ailesinin bir grubudur. Bu çeliklere gerekli mukavemeti kazandırmak için kontrollü olarak çökelme sertleşmesi (yaşlandırma) uygulanmaktadır. Çökelti oluşumunu sağlamak için alüminyum (Al), molibden (Mo), titanyum (Ti), niyobyum (Nb) ve bakır (Cu) elementleri ile alaşımlama yapılır (Aydın, 2002).

### 2.6. Çeliklere Uygulanan Isıl 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 hacim merkezli kübik (HMK) yapılı, 912°C ile 1398°C arasında yüzey merkezli kübik (YMK) yapılı ve 1398°C ile ergime sıcaklığı olan 1535°C arasında ise tekrar HMK yapılı demir bulunur. Yani, demir allotropik 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 (Özdemir, 2015).

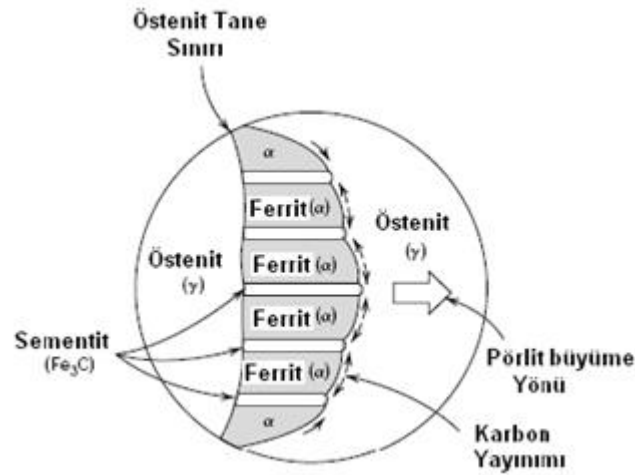
Şekil 2.17’de demir-karbon (Fe-C) denge diyagramı verilmiştir. Bu denge diyagramı üzerinde  $\alpha$  (alfa),  $\gamma$  (gama),  $\delta$  (delta), sıvı ve sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) fazları ile ledeburit ( $\gamma$ +sementit) ve perlit ( $\alpha$ +sementit) karışım yapıları bulunmaktadır.



Şekil 2.17. Demir-karbon (Fe-C) denge diyagramı (Anonim, 2013)

$\alpha$  (ferrit): Ferrit, demirde az miktarda karbonun erimesiyle oluşan bir arayer katı eriyiğidir. Demir-karbon denge diyagramında “ $\alpha$ ” işaretiyle gösterilen bölgede oluşur. Ferritte çözünebilen en fazla karbon miktarı %0,008’dir. Hacim merkezli kübik yapıya sahip, sertliği düşük, sünekliği yüksektir ve çelikteki en yumuşak fazdır. HMK yapıda arayer yayılımı için az bölge olmasından dolayı karbon çözünürlüğü oldukça düşüktür (Özdemir, 2015).

$\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$  (perlit): %0,83 karbon içeren ötektoid yapıdır. Ferrit ve sementit fazlarının karışımı olan perlit çok yavaş soğuma şartlarında 723°C sıcaklıkta oluşmaya başlar. 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 (Özdemir, 2015).



**Şekil 2.18.** Perlit fazının oluşum mekanizması (Callister, 2003)

Ferrit fazının karbon çözünürlüğü düşük olmasından dolayı, östenit fazından ferrit fazına geçiş sırasında östenitin içerdiği fazla karbon difüzyon yoluyla ferrit fazından dışarı atılmaktadır (Şekil 2.18). Ferrit fazının sınırlarında karbon yayınından dolayı karbonca zengin, sementit bölgeleri oluşmaktadır (Callister, 2003).

$\gamma$  (östenit): YMK şeklinde demir yapıda katı karbon çözeltilisidir. Demir-karbon denge diyagramında “ $\gamma$ ” işaretiyle gösterilen bölgede oluşan östenit yaklaşık %2’ye kadar karbon çözümlenebilir. Her cins çelikte  $723^{\circ}\text{C}$ ’nin üzerinde bulunur.  $A_{c3}$  ve  $A_{cm}$  sıcaklıklarının üzerinde ise çözünme tamdır. Yumuşak ve anti manyetiktir (Özdemir, 2015).

$\text{Fe}_3\text{C}$  (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. Bu faz, ötektoid sıcaklığın hemen altında yapılan menevişleme işlemi ile küresel hale getirilir ve böylece daha tok bir yapı elde edilir (Özdemir, 2015).

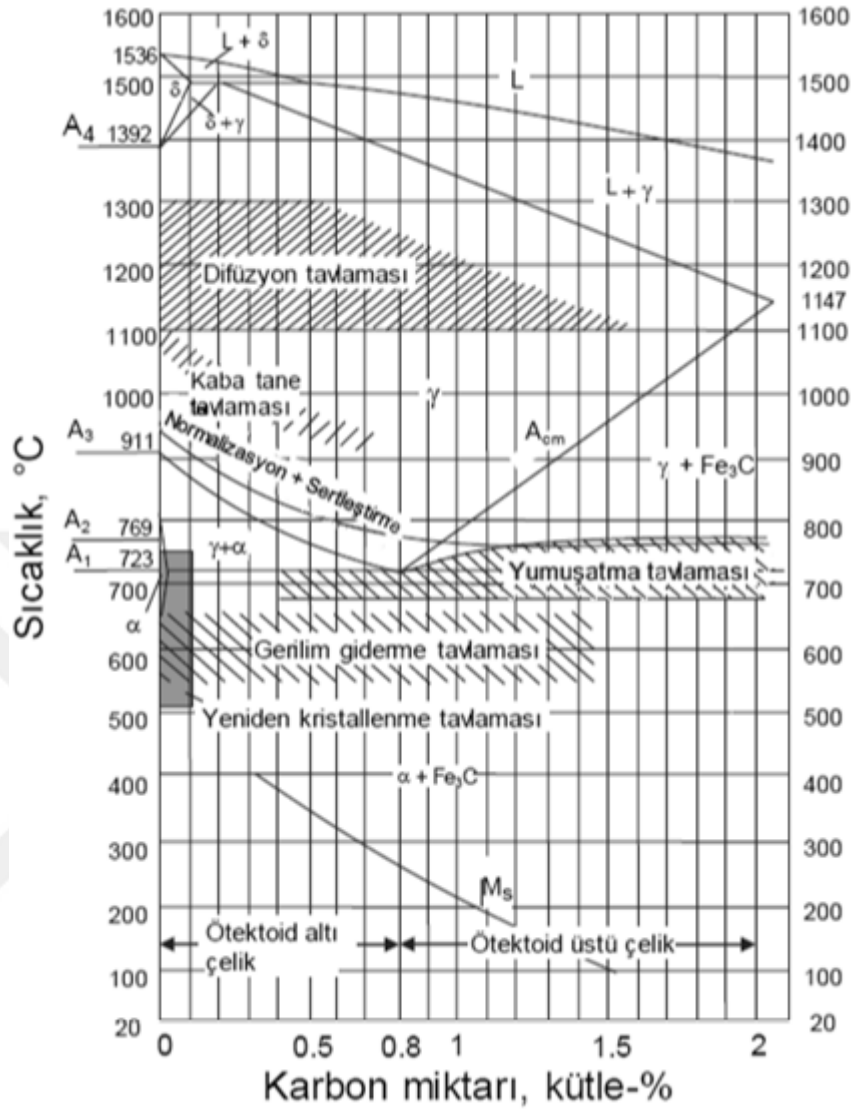
$\gamma$ +sementit (ledebürit): Östenit ve sementit fazlarının mekanik karışımıdır. Fe-C denge diyagramının ötektik pozisyonudur (Özdemir, 2015).

Grafit: Sementit ( $Fe_3C$ ) 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 tavlama sonucunda ortaya çıkabilir. Silisyum, grafit oluşumunu özendirir (Özdemir, 2015).

Çelik, demir ve karbonun alaşımı olarak tanımlanır. Karbon oranındaki az miktarda değişim çeliğin ısıtıldığı sıcaklıktan soğutulması ile elde edilen özelliklerin büyük miktarda değişimine yol açar. Hızlı soğutma veya sulama, çeliği kırılabilir 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 ısıtılma işlemindeki davranışını değiştiren ve özelliklerini iyileştiren alaşım elemanları katılır. Bütün çeliklerin ısıtılma işleminde esas olan, çelikleri belli bir sıcaklığa ısıtıp bu sıcaklıkta belli bir süre tutup önceden belirlenmiş soğutma hızı ile soğutmaktır. Isıtılma işlemi, ürünü şekillendirmek ve parçaların uygun kullanım özelliklerini sağlamak amacıyla yapılır. Isıtılma işlem yöntemlerini üç ana başlık altında toplanabilir. Bunlar; tavlama, sertleştirme ve menevişlemedir (Topbaş, 1998).

### **2.6.1. Tavlama**

Çeliklerde mikro yapıyı düzenlemek, taneleri küçültmek ya da irileştirmek, bileşimin 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 bir sıcaklığa kadar ısıtılıp istenilen değişiklikler sağlanıncaya kadar bu sıcaklıkta tutulması ardından ise soğutulması işlemine tavlama adı verilir. Şekil 2.19'da Fe-C denge diyagramında tavlama yöntemleri ve uygulama sıcaklıkları görülmektedir (Novikov, 2012).



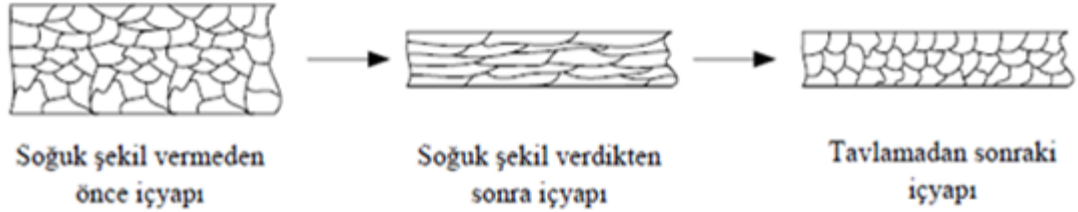
Şekil 2.19. Fe-C denge diyagramında tavlama yöntemleri ve uygulama sıcaklıkları (Erişir, 2013)

### 2.6.1.1. Normalizasyon tavlama

Malzemenin normal yapısını (eşit boydaki yuvarlak tanelerden oluşan ince taneli yapı) yeniden kazanmasıdır. Dövülmüş, haddelenmiş, çekilmiş, dökülmüş, iri taneli ve eş yönlü yapılar düzelir ve malzeme her zaman yeniden kazanabileceği özelliklere (çekme mukavemeti, süneklik, vs.) geri döner. Çeliğin bileşimine göre  $A_{c3}$  veya  $A_{cm}$  sıcaklıklarının 30-50°C üstüne ısıtılıp 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

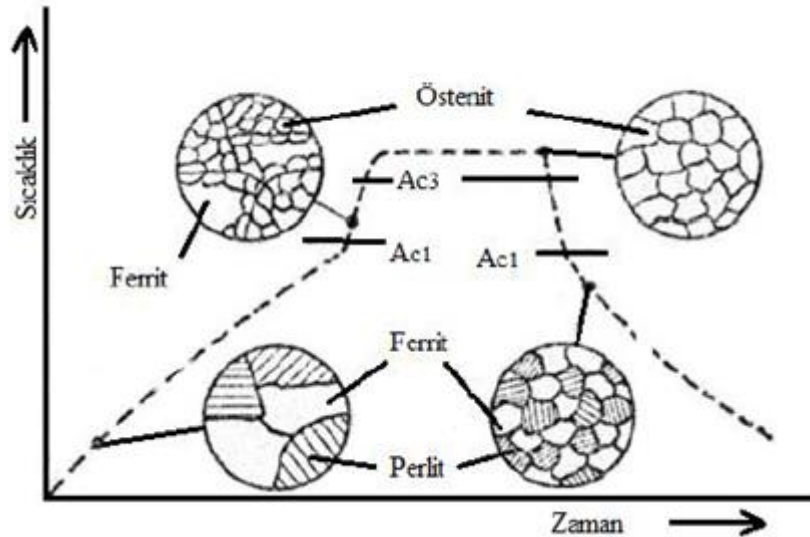


dağılımlı ferritik-perlitik bir yapı elde edilir (Şekil 2.20). Ötektoid üstü çeliklerde ise normalleştirme, sürekli sementit ağını kısmen parçalayarak, sonraki yumuşatma tavını kolaylaştırıcı bir ön işlem olarak uygulanır (Özdamar, 1999).



**Şekil 2.20.** Haddelenmiş çeliğin normalizasyon tavlama sonrası mikro yapısında oluşan homojen taneler (Anonim, 2013)

Başlangıçtaki iri taneli yapıda, 723°C üstüdeyken her bir perlit bölgesinden çok sayıda küçük perlit tanesi meydana gelir.  $A_{c3}$  sıcaklığının üzerinde yapı sadece ince taneli östenitten meydana gelir. Taneler zamanla irileşmeye başlar. İnce taneli östenit soğutma sonucu yine ince taneli ferrit+perlit haline dönüşür (Şekil 2.21) (Özdamar, 1999).



**Şekil 2.21.** Normalizasyon sonrasında küçük tanelerin oluşması (Özdemir, 2015)

Normalizasyon tavlaması şu amaçlar için yapılır (Erişir, 2013);

- Tane boyutunu inceltmek
- Homojen bir mikro yapı 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 parçasının türüne göre düşük termal mekanikliğini arttırmak
- Yumuşatma tavisına tabi tutulmuş çeliklerin sertlik ve mukavemetini arttırmak

#### **2.6.1.2. Yumuşatma tavlaması**

İçerisinde %0,6 oranından fazla karbon bulunan çelik malzemelerin işlenmesi sırasında özellikle makine işçiliğinde zorluklarla karşılaşılır. Makine işçiliği ile işleme veya doğrudan talaş kaldırma işçiliği için bu türdeki malzemeler, içerisindeki karbon miktarına göre 680-750°C arasında birkaç saat süreyle tutularak kendi halinde soğutulmaya bırakılır. Bu sayede malzemenin dokusu değişir. Bu işleme yumuşatma tavisı denir (Anonim, 2006).

#### **2.6.1.3. Gerilme giderme tavlaması**

Çelik malzemeleri, özellikle takım çeliklerini talaş kaldırma işlemine elverişli hâle getirmek veya talaş kaldırma işleminden sonra mikro yapılarında oluşan gerginlikleri gidermek için, 600-650°C'de tavlalarak kendi halinde soğumaya bırakma işlemine gerilme giderme tavlaması denir (Anonim, 2006).

#### 2.6.1.4. Yeniden kristalleşme tavlaması

Yeniden kristalleşme, deformasyona uğramış tanelerin tamamının, yeni çekirdeklenen ve büyüyen tanelere dönüşmesini sağlayan bir tavlama işlemidir. Yeniden kristalleşme tavlama, yoğun soğuk işlem görmüş metallere uygulanıp faz değişikliği olmadan yeni ferrit tanelerinin çekirdeklenmesi ve büyümesi ile deformasyon sonucu oluşan hasarları düzeltme için yapılır (Anonim, 2012).

#### 2.6.2. Sertleştirme

Takım çeliklerinin mümkün olan en yüksek sertlik derecesine ve aşınma mukavemetine sahip olması istenir. Ancak bu esnada soğuk şekil değiştirme kabiliyeti kaybolur ve süneklik çok düşer. Sertleştirme işlemi, 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. Bu süre çeliğin kimyasal bileşimine bağlı olarak değişir. Çelik, daha sonra su verilerek sertleştirilir. Bu suretle malzeme cam sertliğinde fakat gevrek ve kırılmaya karşı duyarlı olur. Bundan dolayı, iş parçası bu işlemi takiben ısıtılır ve sonra havada serbest olarak soğutulur. Çelik bu surette kendi kullanma sertliğine erişir (Novikov, 2012).

Aşağıda azalan soğutma şiddetlerine göre soğutma ortamları sıralanmıştır.

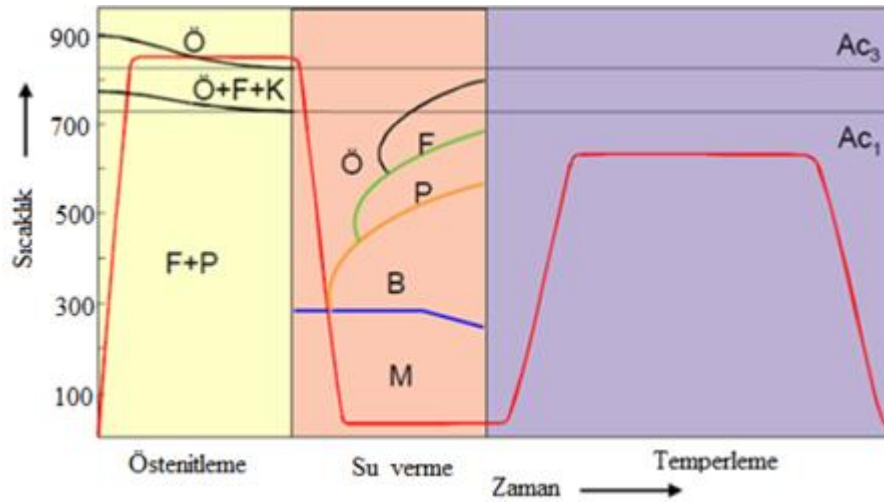
- %10'luk NaCl<sub>2</sub> çözeltisi
- Su
- Tuz banyosu
- Yağ çözeltileri
- Yağ
- Hava

### 2.6.3. Menevişleme

Menevişleme, sertleştirilmiş bir çeliğin mikro yapısındaki gerilmelerin alınması için yeniden ötektoid sıcaklığının altında bir sıcaklıkta belirli bir süre bekletildikten sonra soğutulması işlemidir (Callister, 2003).

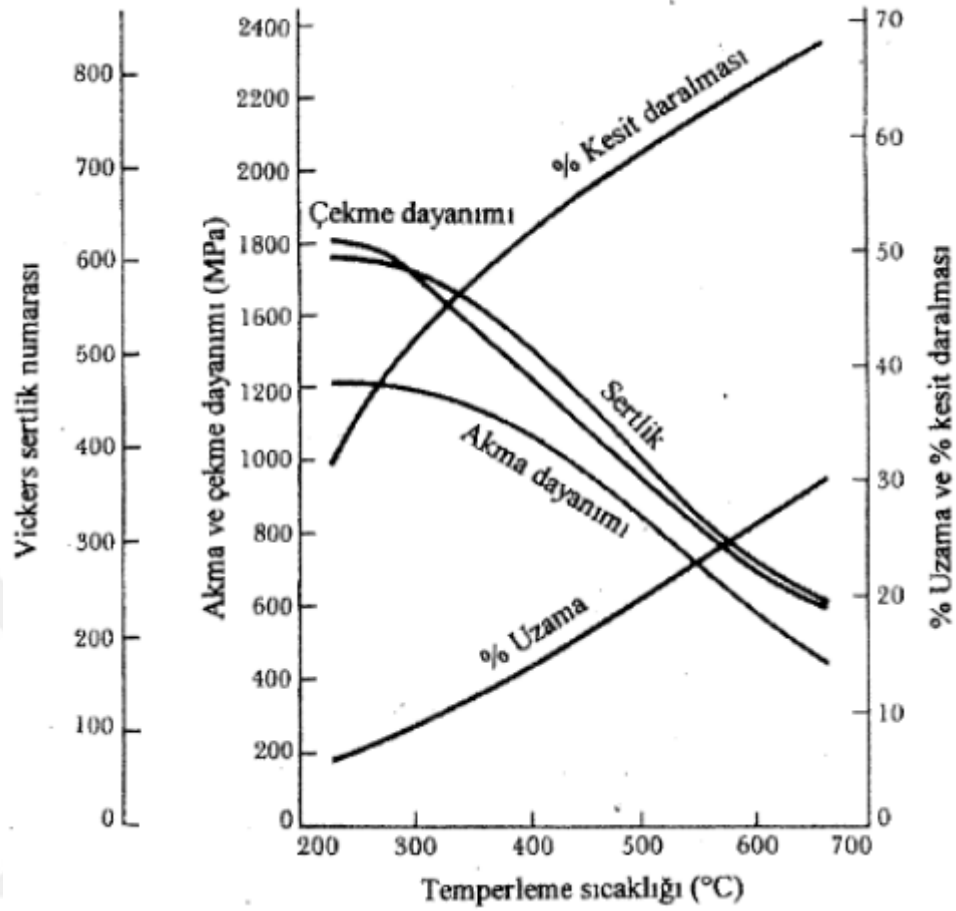
Fazlar içerisinde en fazla sertliğe ve en yüksek dayanıma sahip olanı martenzit fazıdır. Bununla birlikte sünekliği ihmal edilebilecek kadar düşüktür. Martenzit fazının sertliği yapısında bulunan karbon ile doğrudan ilgilidir. Oldukça gerilimli mikro yapıya sahip bu fazda karbon atomları dislokasyon hareketlerini engelleyerek malzemeye dayanıklılık kazandırır. Ancak dayanımın artmasıyla birlikte sünekliğini yitiren malzemenin tokluğu düşmekte ve malzeme kırılganlaşmaktadır (Krauss, 2005). Temperleme sıcaklığı çeliğin türü ve parçanın kullanılacağı yere bağlı olarak 150-600°C arasında değişir. Tutma süresi ise parça kalınlığına bağlı olarak 1-2,5 saat arasındadır. Genellikle 2,5 mm kalınlığında bir parça için 1 saatlik bir temperleme süresi uygulanır. Bu sürenin sonunda parça fırından çıkarılarak durgun havada soğumaya bırakılır (Rajan ve ark., 2012).

Menevişleme esnasında, kristal kafes içinde hapsedilmiş karbonun bir bölümü ayrılarak serbest karbür taneciklerini oluştururken, martenzit (M) yapı da ferrite (F) dönüşmeye çalışır. Bu dönüşüm menevişleme sıcaklığı yükseldikçe hızlanır. Düşük sıcaklıklar parçayı yumuşatmadan gerilmeleri alır (Şekil 2.22).



**Şekil 2.22.** Su verme sonrasında uygulanan temperleme işlemi (Erişir, 2013)

Sıcaklık yükseldikçe parçanın sertliği ve mukavemeti düşer. Buna karşın daha tok ve sünek olur. Tüm bu özellik değişimleri, menevişleme süresine bağlıdır. Bir çeliğin menevişlenmesi esnasında mekanik özelliklerdeki değişimler, kısmen iç gerilmelerin azalması sonucu ise de, esas değişimler ısıtma esnasında mikro yapıda meydana gelen olayların sonucudur. Bu değişimler, temel olarak menevişleme sıcaklığına bağlıdır. Ancak 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 seyrederek. Sertleştirilmiş çelikler menevişlendiğinde, çekme dayanımı ve akma sınırı, düşük meneviş sıcaklıklarında pek az artma gösterebilir. Yalnız artan meneviş sıcaklıklarında sertlikte olduğu gibi devamlı düşme gösterirler. Buna karşın, malzemenin şekil değişebilirlik karakteristikleri olan kopma uzaması, kesit daralması ve çentik darbe dayanımı meneviş sıcaklığı arttıkça artar. Meneviş kırılabilirlik gösteren çeliklerde, kırılabilirliğin meydana geldiği meneviş sıcaklıklarında tavlama yapılırsa ya da bu sıcaklık bölgesinden yavaş soğuma ile geçilirse şekil değiştirme karakteristiklerinde büyük düşme görülebilir (Novikov, 2012).



Şekil 2.23. Menevişleme sonrası mekanik özelliklerin değişimi (Güral, 2010)

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 değiştirebilirlik ile birlikte elastiklik sınırında da iyileşme görülür (Şekil 2.23) (Topbaş, 1998).

## 2.7. Kaynak Araştırması

Özdemir, 16Mo3 sac malzemesinin V dip bükme işlemi neticesinde ileri ve geri yaylanma davranışı ile bükme işleminin, normalizasyon ve menevişleme ısıl işlemine tabi tutulan 16Mo3 sac malzemelere olan etkisini mikro yapısal olarak incelemiştir. Ayrıca deney parametreleri olarak 4 farklı sac kalınlığı (3, 4, 5, 6 mm), 3 farklı bükme açısı (30°, 60°, 90°) ve 2 farklı zımba yuvarlatma yarıçapı (4, 5 mm) kullanmıştır. Bunun dışında zımbanın sac malzeme üzerinde 30 saniye bekletilip bekletilmemesi durumuna göre yaylanma davranışlarını gözlemlemiştir. Farklı parametreler ile farklı deneyler yaparak çapraz karşılaştırmalar yapmıştır. Çalışmanın sonucunda ısıl işlemsiz ve normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış sac malzemelerde ileri yaylanma davranışı meydana gelirken, menevişleme uygulanmış malzemelerde ise, geri yaylanma davranışı meydana geldiğini belirlenmiştir. 30° bükme işleminde, ısıl işlemsiz ve normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış sac malzemelerin kalınlığı arttıkça, ileri yaylanma değeri artarken, 60° ve 90° bükme işlemlerinde sac malzeme kalınlığı arttıkça ileri yaylanmanın azaldığını tespit etmiştir. Menevişlenmiş malzemelerde ise, sac malzeme kalınlığı arttıkça geri yaylanma miktarının azaldığını belirlemiştir. Isıl işlemsiz ve normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış malzemelerde zımba yuvarlatma yarıçapı değeri arttıkça ileri yaylanma değeri azalırken, menevişlenmiş malzemelerde ise, geri yaylanma davranışının arttığını tespit etmiştir (Özdemir, 2015).

Işıktaş, çalışmasında V bükme kalıplarında geri yaylanmanın deneysel olarak tespitini araştırmıştır. Geri yaylanma miktarlarını belirleyebilmek için bir V bükme kalıbı tasarlamış, deney malzemesi olarak ise Dkp ve paslanmaz sac malzemesi kullanmıştır. Deney numunelerini 30x60 mm ebatlarında ve 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm kalınlığında seçmiştir. 60°, 90° ve 120° kalıp açılarında ve her açıda 2 ve 6 mm zımba yuvarlatma yarıçap değerleri kullanarak bükme yapmıştır. Geri yaylanma deneylerinde her parametre için beşer adet numune bükülerek test yapmıştır.

Testler sonucunda, malzeme kalınlığının artması ile geri yaylanma değerinin azaldığını, bükme açısının artması ile de geri yaylanma değerinin azaldığını ve zımba yuvarlatma yarıçapı büyüdükçe geri yaylanma miktarının arttığını tespit etmiştir (Işıқтаş, 2011).

Tekarslan ve ark., çalışmalarında bükme kalıpları ve bükmede geri yaylanma konusu araştırmıştır. Bükmede geri yaylanma miktarının tespiti için bir V kalıp tasarlanmış ve bu kalıpta 0,75 mm alınlıktaki sac malzemelerin farklı açılarda ne kadar geri esneyebilecekleri tespit edilerek geri yaylanma grafikleri elde edilmiştir. Farklı kalıpta, her açıda onar adet parça bükülmek suretiyle kalıptan çıkan parçaların geri yaylanma miktarları optik profili metre ile ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda, zımba yükünün sac malzeme üzerinde daha fazla tutulmasıyla, geri yaylanmanın aynı oranla azalabileceğini, zımbanın kalıp içine tam oturması ile oturmaması arasında da önemli ölçüde farklılıklar olduğunu, zımba yükünün malzeme üzerinde 20 saniye bekletilmesi ile sac malzeme kalınlığının ihmale dilmemesi, zımba ile kalıbın temasının sağlanması ve sac malzemenin üstünde zımbanın hiç bekletilmediği metotların geri yaylanmayı tespit etmede uygun olmadığını tespit etmişlerdir (Tekarslan ve ark., 2006).

Özdemir, serbest bükme kalıplarında geri yaylanmanın deneysel olarak tespiti ve sonlu elemanlar yöntemi ile tahmini üzerine bir çalışma yapmıştır. Geri yaylanma miktarlarının belirlenebilmesi için modüler serbest V bükme kalıbı tasarlayarak, deney malzemesi olarak DKP ve paslanmaz çelik (AISI/SAE 304) seçmiştir. Numuneleri 1, 2, 3 ve 4 mm kalınlıklarda seçip her kalınlık için 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 ve 120 derecedeki açılarda, her açıda 3 farklı yarıçap değeri ile her bir numuneden en az 3 tane bükme gerçekleştirmiştir. Parçaların ölçümlerini optik projeksiyon cihazı ile elde edilmiş ardından bu değerlerin bilgisayar destekli sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan Marc-Mentat programındaki çözümlerle karşılaştırmasını yapmıştır. Yapay sinir ağlarında sigmoid fonksiyon kullanarak 2 gizli ara katman ve her katmanda 4 hücre ile tahmin ederek, deney yapılmayan sonuçları tablolar halinde vermiştir. Çalışma sonucunda; malzeme kalınlığının artması geri yaylanma değerini azaldığını, bükme açısının artması ile de geri



yaylanma değerinin azaldığını, bükme yarıçapı büyüdükçe geri yaylanma miktarının arttığını, bükme operasyon problemlerin çözümünde sonlu elemanlar yönteminin kullanılabilceğini tespit etmiştir (Özdemir, 2010).

Ötü, çalışmasında AA 5754-O ve AL 1050-O sac malzemelerin V şekilli kalıplarda farklı bükme yöntemleri uygulayarak geri yaylanmalarını incelemiştir. Bu bağlamda deneysel ve sonlu elemanlar yöntemlerini karşılaştırmıştır. Kullanılan sac malzemeleri 1 mm ve 2 mm kalınlığında, kalıp bükme açılarını ise 60°, 90° ve 120° olarak seçmiştir. Sac malzemeleri hadde doğrultusuna göre 0°, 45° ve 90° olacak şekilde V bükme için hazırlamıştır. Zımbaların yuvarlatma yarıçaplarını ise 2 mm, 4 mm ve 6 mm olarak belirlemiştir. Literatürde sıklıkla kullanılan dört farklı bükme yöntemini iki grupta incelemiştir. Birincisi AA 5754-O, ikincisi AL 1050-O sac malzemelerdir. Her bir parametre için en az üçer tane olmak üzere yaklaşık 1500 adet deney numunesini bükerek şekillendirmiş, geri yaylanma grafiklerini çıkarmıştır. Çalışmasında kullandığı zımbaların yuvarlatma yarıçaplarının artması ile zımbanın bükülen malzeme üzerinde bekletilme süresinin geri yaylanmayı azalttığını, ayrıca sac malzemelerin hadde doğrultusu özelliğinin geri yaylanma açısından farklılıklar oluşturduğunu tespit etmiştir (Ötü, 2012).

Chan ve ark., V bükmede geri yaylanma davranışının sonlu elemanlar analizi ile tespiti üzerine çalışmış, zımba yuvarlatma yarıçapı, zımba açısı ve kalıp yuvarlatma yarıçapı parametrelerinin geri yaylanma üzerindeki etkisini araştırmıştır. Patran, Abaqus/Standart ve Abaqus/CAE yazılımlarını kullanmıştır. Analizler sonucunda, geri yaylanma açısının zımba yuvarlatma yarıçapı ve zımba açısının artmasıyla azaldığını tespit etmiştir. Geri yaylanmanın zımba yuvarlatma yarıçapı, zımba açısı ve kalıp yuvarlatma yarıçapına bağlı olduğunu belirlemiştir. Zımba açısı ve zımba yuvarlatma yarıçapı değeri arttıkça geri yaylanmanın azaldığını tespit etmiştir. Zımba yuvarlatma yarıçapının artmasıyla meydana gelen plastik deformasyon miktarının sınırlı olduğunu tespit etmiştir. Zımba yuvarlatma yarıçapı belirli değerleri aştığı zaman geri yaylanma değerinde önemsiz bir azalma meydana geldiği sonucuna varmıştır (Chan, 2004).

Bakhshi ve ark., CK67 malzeme üzerine U ve V bükme kalıplarında deneyler yaparak bükme parametrelerin etkisi araştırmış ve sayısal simülasyon gerçekleştirmiştir. CK67 sac malzemeyi, 0°, 45° ve 90° hadde doğrultusunda keserek, bükme işlemi sonunda meydana gelen ileri ve geri yaylanma değerlerini incelemiştir. Yapılan deneyler sonucunda, V bükmede zımba yuvarlatma yarıçapı 2 mm ve 3 mm için ileri yaylanma, zımba yuvarlatma yarıçapı 3 mm ve 4 mm için ise geri yaylanma meydana geldiğini tespit etmiştir. V ve U bükme işleminde CK67 malzemesinin ileri ve geri yaylanma miktarı üzerinde zımba yuvarlatma yarıçapı, sac anizotropisi ve sac kalınlıklarını kapsayan parametrelerin etkisini sayısal ve deneysel olarak incelemiştir (Bakhshi ve ark., 2008).

Toros ve ark., alüminyum magnezyum alaşımlarından AA 5754-O alaşımının 60 derecelik V bükme kalıbında geri yaylanma davranışını incelemiştir. Malzemelere %1, 3, 5, 7, 9 ve 11'lik ön gerilmeler uygulayarak akma noktalarını değiştirmiş ve bu ön gerilmelerin geri yaylanma üzerindeki etkilerini deneysel olarak karşılaştırmıştır. Çalışmalarını ETA/Dynaform simülasyon programında analiz ederek deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. Uygulanan ön gerilmenin geri yaylanmaya olumlu etkisi tespit dememiştir. Sonlu elemanlar programıyla yapılan simülasyonların deney sonuçlarına göre yeterince yakın olduğunu görmüştür (Toros, 2009).

### 3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 430 ferritik paslanmaz çelik sac malzemesi, bükme parametreleri ve uygulanan yöntemler ile kullanılan hidrolik pres, ısıl işlem fırını ve test cihazları hakkında bilgiler verilmiştir.

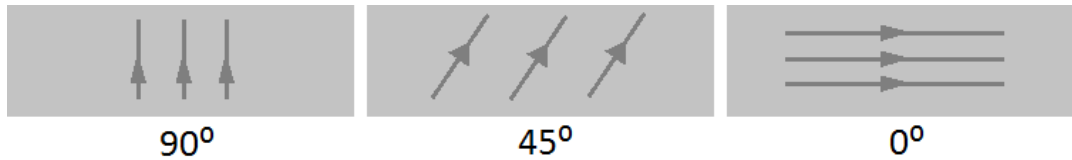
#### 3.1. Deney Malzemesi

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere AISI 430 (DIN 1.4016) ferritik paslanmaz çelik sac plakadan, Ermaksan Lasermak CO<sub>2</sub> Laser Cutting makinesinde (Resim 3.2) lazer kesim yöntemi ile 40x120 mm ebatlarında ve 1 mm et kalınlığında (Resim 3.1), her birinden 60 adet olmak üzere 0°, 45° ve 90° hadde doğrultularında (Şekil 3.1) toplamda 180 adet numune kesilmiştir.



**Resim 3.1.** Deneysel çalışmalarda kullanılan sac metal malzeme

Malzeme ebatlarının küçük seçilmesinin nedeni, dar alanda geri yayılmanın daha sağlıklı olarak tespit edilebileceği düşüncesinden kaynaklanmıştır.



**Şekil 3.1.** Sac metal numuneler üzerinde hadde doğrultuları



**Resim 3.2.** Lazer kesim makinesi

Kullanılan malzemenin ThermoFisher ARL™ 3460 spektral analiz cihazı (Resim 3.3) ile yapılan kimyasal analiz raporu Çizelge 3.1'de, literatürden alınmış ağırlıkça yüzde kimyasal bileşimini gösteren tablo ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.



**Resim 3.3.** Spektral analiz cihazı

**Çizelge 3.1.** AISI 430 paslanmaz çelik malzemeye ait ağırlıkça yüzde kimyasal bileşim analizi

Alaşım Elementi	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
%	82,173	0,041	0,354	0,511	0,022	0,001	16,430	0,025
	Ni	V	Cu	Nb	Sn	Co	Mg	Al
	0,146	0,104	0,122	0,008	0,006	0,032	0,019	0,006

Deneyleerde kullanılan AISI 430 sac malzemeye ait kimyasal bileşim analizi ile literatürden alınan alaşım elementlerinin ağırlıkça yüzde değerlerini gösteren tablo incelendiğinde, kimyasal bileşimlerin uyduğu görülmektedir.

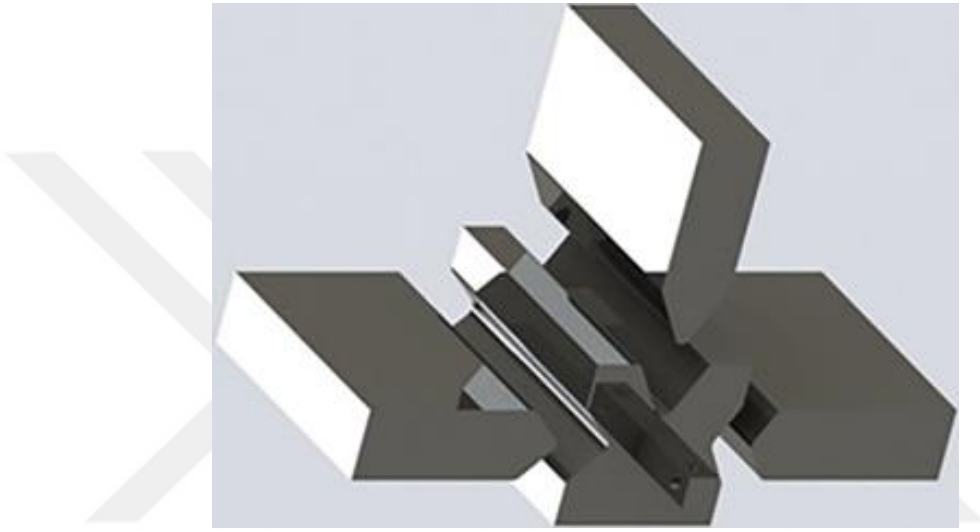
**Çizelge 3.2.** AISI 430 paslanmaz çelik malzemenin literatürden alınan ağırlıkça yüzde kimyasal bileşimi (Çelik, 2006)

Alaşım Elementleri	Fe	Cr	C	Mn	P	S	Si
% max	80,0-82,0	16,0-18,0	0,12	1,00	0,04	0,03	1,00

Kullanılan malzemenin kimyasal bileşiminin yaklaşık olarak %18'ini demir dışı alaşım elementleri oluşturmaktadır. Bunlardan krom %16,43 ile ferritik paslanmaz çeliğin temel alaşım elementidir. Yapısında bulunan yüksek krom malzemeye korozyon ve oksidasyon direnci sağlar. Ferrit yapıcı bir element olan krom aynı zamanda malzemenin sertleşebilme kabiliyetini artırır. %0,04 karbon oranı ile düşük karbonlu çelikler sınıfına giren AISI 430 paslanmaz çeliğinde tavlama sonrası su verme işleminde martenzitik yapı oluşmaz. Bu yönüyle yapıda aşırı sertleşme ve gevreklik görülmez. Ayrıca akma ve çekme mukavemeti, yüksek karbonlu çeliklere nazaran daha düşüktür. Düşük olan karbon oranı yüzde uzama ve şekillenebilirlik bakımından çeliğe olumlu etki yapar. Mangan çeliğin mekanik özellikleri iyileştirip, dayanımını artırmaktadır. Sertleşebilme kabiliyetine olumlu etki yapar. Silisyum ise çelikte oksijen giderici olarak kullanılır. Kükürt ve fosfor ise malzemedeki gevrekliğe yol açtığı ve eğme özelliğini kötüleştirdiği için bileşik içinde mümkün olduğunca düşük tutulmuştur.

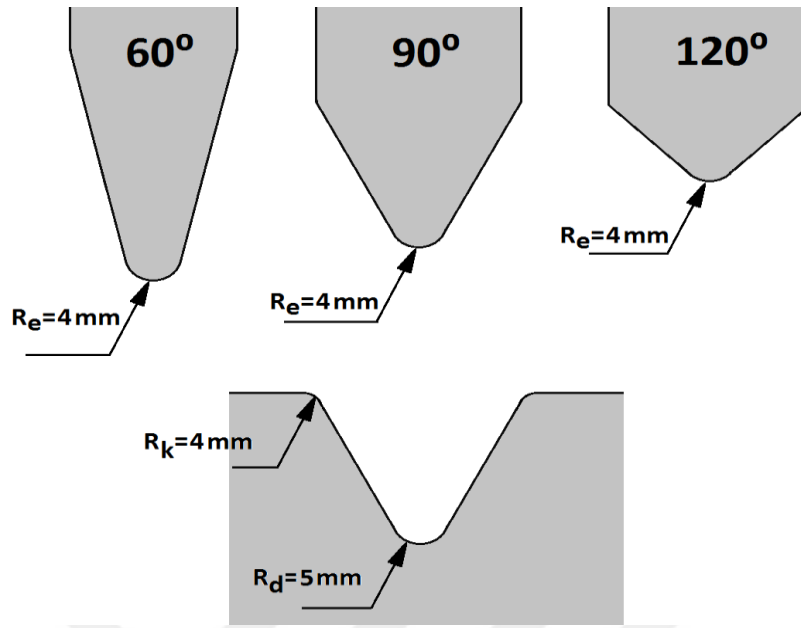
### 3.2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Bükme Kalıbı ve Zımbalar

Deneysel çalışmalarda kullanılan bükme kalıbı ve zımbalar Ç1390 blok çeliğinden CNC freze tezgâhında yapılmıştır (Resim 3.4). Bükme kalıbı ve zımbalarda bükme kuvvetinden kaynaklı çatlama ve kırılma meydana gelebileceğinden, malzemenin mikro yapısındaki gerilmeleri gidermek için menevişleme ısı işlemi uygulanmıştır.



**Resim 3.4.** V bükme kalıbı ve zımbalar

Zımbalar 60°, 90° ve 120° açılarında seçilmiş ve zımba yuvarlatma yarıçapları ( $R_e$ ) 4 mm, kalıp dip yuvarlatma yarıçapı ( $R_d$ ) ise 1 mm olan sac metal kalınlığı dikkate alınarak 5 mm olarak belirlenmiştir. Kalıp köşe yuvarlatma yarıçapları ( $R_k$ ) 4 mm olarak seçilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Zimba ve kalıp yuvarlatma yarıçapları

### 3.3. Deney Numunelerine Uygulanan Isıl İşlemler

Isıl işlem uygulamalarında Protherm marka MoS Serisi Kamara fırın kullanılmıştır (Resim 3.5). Bu fırının avantajı dâhili ısıl işlem programlama ünitesi ile istenilen sıcaklık değerine istenilen sürede çıkılıp, ardından yine istenilen süre boyunca bu sıcaklık değerinde bekletilebilmesidir. Fırın  $1600^{\circ}\text{C}$ - $1800^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklara kadar çalışabilmektedir. Yüksek dış ısıdan korunmak ve yüksek ısı stabilizasyonu için çift kat kaplama kullanılarak üretilmiş ve kolay operasyon için ön taraftan yükleme seçeneğiyle kullanıcılara sunulmuştur. Galvanize kaplı ve epoksi boyalı yapısıyla uzun ömürlü bir kullanım sunmaktadır.



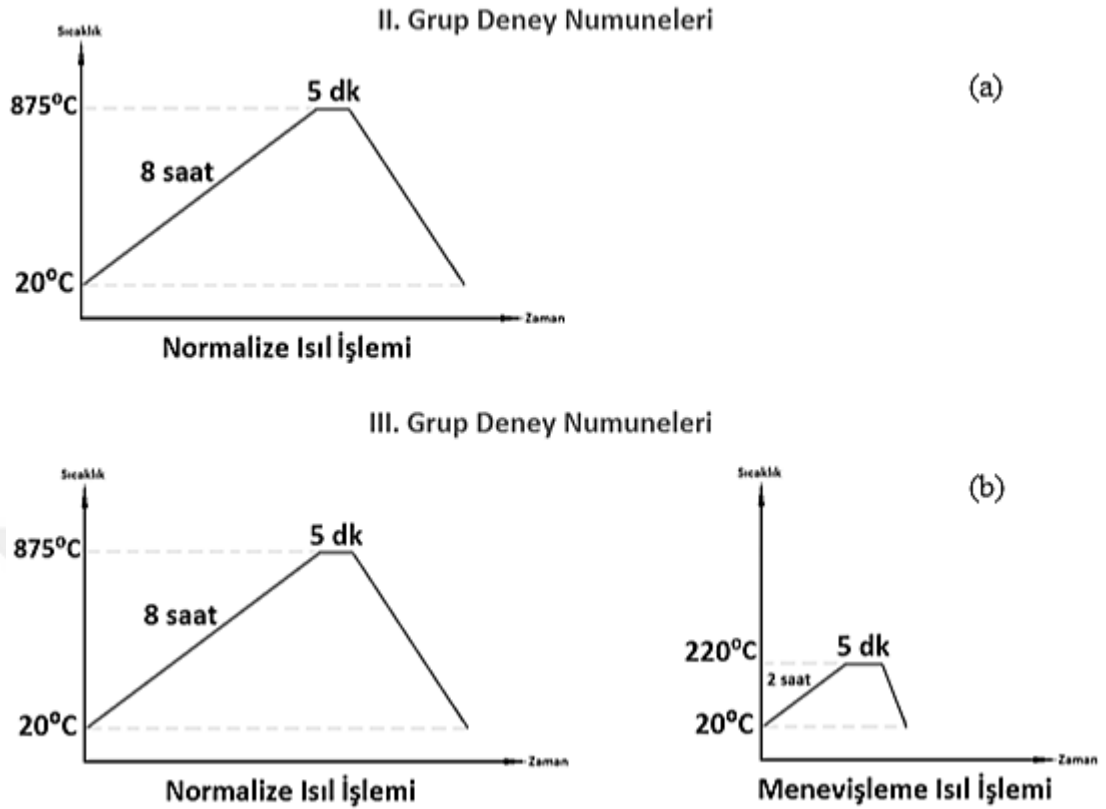
**Resim 3.5.** Isıl işlem fırını

Deney numuneleri uygulanan ısıl işlemlere göre 3 farklı gruba ayrılmıştır. Birinci grup numuneler üzerine herhangi bir ısıl işlem uygulanmamıştır.

İkinci grup numunelere ise normalizasyon ısıl işlemi uygulanmıştır. Bu bağlamda 60 adet deney numunesi fırına yerleştirilmiş ve ötektoid altı bir çelik olan AISI 430 için  $A_3$  sıcaklığının hemen üzerine,  $875^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa 8 saatte kademeli olarak çıkılmış ve 5 dk kadar bekletilmiştir. Ardından fırından çıkartılan numuneler durgun havada oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır (Şekil 3.3a).

Üçüncü grup numunelere ise önce normalizasyon, ardından menevişleme ısıl işlemi uygulanmıştır. Yine bu bağlamda fırına yerleştirilen 60 adet numune  $875^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa kadar 8 saatte kademeli olarak çıkartılmış ve bu sıcaklıkta 5 dk kadar bekletildikten sonra durgun havada soğumaya bırakılmıştır. Oda sıcaklığına kadar soğuyan numuneler tekrar fırına alınmış ve 2 saatte  $220^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa kademeli olarak çıkılmıştır. Bu sıcaklıkta 5 dk kadar bekleyen numuneler tekrar durgun hava ortamına alınmış ve oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır (Şekil 3.3b).





**Şekil 3.3.** Deney numunelerine uygulanan ısı işlemler

Her iki gruba da uygulanan ısı işlemlerin ardından malzemenin kimyasal özelliklerinde herhangi bir değişiklik olup olmadığı spektral analizleri yapılarak kontrol edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda yapılarında kimyasal bir değişim olmadığı görülmüştür.

### 3.4. V-Bükme İşlemleri

Çalışmalarda kullanılan sac numunelere; 3 farklı ısı işlem durumunda (ısı işlemli, normalizasyon, normalizasyon ve ardından menevişleme), 3 farklı hadde doğrultusunda ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ), 3 farklı kalıp açısında ( $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ) ve zımbanın bükme sonrası sac malzeme üzerinde 30 saniye kadar bekletilip bekletilmemesi durumuna göre  $3 \times 3 \times 3 \times 2$  olmak üzere 54 farklı parametrede ve her deneyi üçer kez tekrar etmek suretiyle toplamda 162 bükme yapılmıştır (Çizelge 3.3).

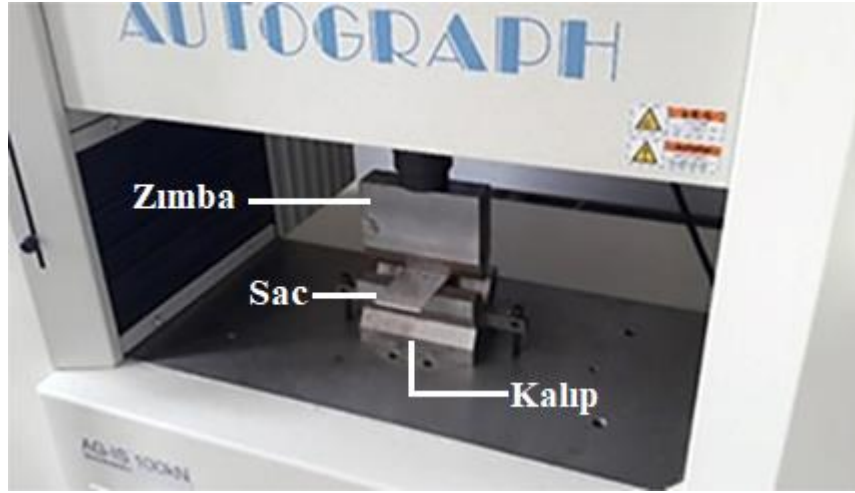
Çizelge 3.3. Bükme parametreleri

Numunelere Uygulanan Isıl İşlemler	Kalıp Açısı	Hadde doğrultusu					
		0°		45°		90°	
		Zımbanın Sac Malzeme Üzerinde Bekleme Süresi					
Isıl İşlem Uygulanmamış	60°	-	30 saniye	-	30 saniye	-	30 saniye
	90°	-	30 saniye	-	30 saniye	-	30 saniye
	120°	-	30 saniye	-	30 saniye	-	30 saniye
Normalizasyon Isıl İşlemi Uygulanmış	600°	-	30 saniye	-	30 saniye	-	30 saniye
	90°	-	30 saniye	-	30 saniye	-	30 saniye
	120°	-	30 saniye	-	30 saniye	-	30 saniye
Normalizasyon ve Menevişleme Uygulanmış	60°	-	30 saniye	-	30 saniye	-	30 saniye
	90°	-	30 saniye	-	30 saniye	-	30 saniye
	120°	-	30 saniye	-	30 saniye	-	30 saniye

Bükme işlemleri için Shimadzu Autograph AG-IS marka 100 kN kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır (Resim 3.6). Kalıp, üzerinde daha önceden hazırlanmış kulakçık ve somun yuvaları ile tezgâhın tablasına sabitlenmiştir. Tezgâhın yük hücresi başlığına ise kalıba uygun açıda zımba yerleştirilmiştir. (Resim 3.7)



Resim 3.6. Hidrolik Bükme tezgahı

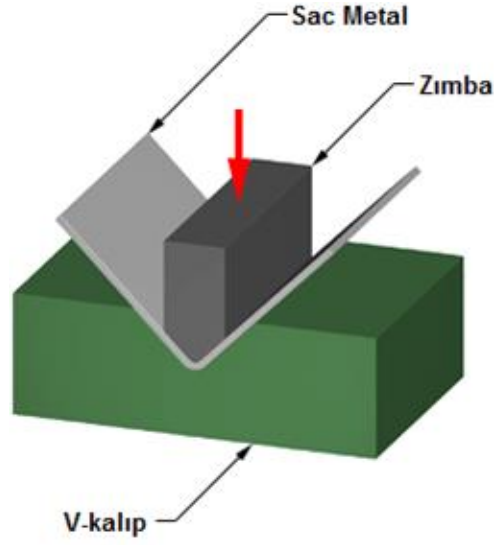


**Resim 3.7.** Bükme işlemi için tezgaha bağlanan kalıp, zimba ve numune

Sac numune kalıp üzerinde işaretlenen alana yerleştirildikten sonra zimba, numuneye temas edene kadar aşağıya indirilmiştir. Zimba ile kalıp arasında sac kalınlığı kadar boşluk bırakılmıştır. Tezgâhı kontrol eden Trapezium yazılımına gerekli bilgi ve parametreler girildikten sonra bükme işlemi başlatılmıştır. Zimba 60°, 90° ve 120° kalıp açıları için Çizelge 3.4'teki strok (kurs) değerleri kadar 15 mm/dk hız ile aşağıya inmiş ve V dip bükme (bottoming) işlemi uygulanmıştır (Şekil 3.4). 162 bükmenin yarısında zimba V dip bükmeden sonra sac malzeme üzerinde 30 saniye bekletilirken diğer yarısında ise zimba bükme işlemi tamamlandıktan hemen sonra sac üzerinden kaldırılmıştır.

**Çizelge 3.4.** Kalıp açıları için strok boyları

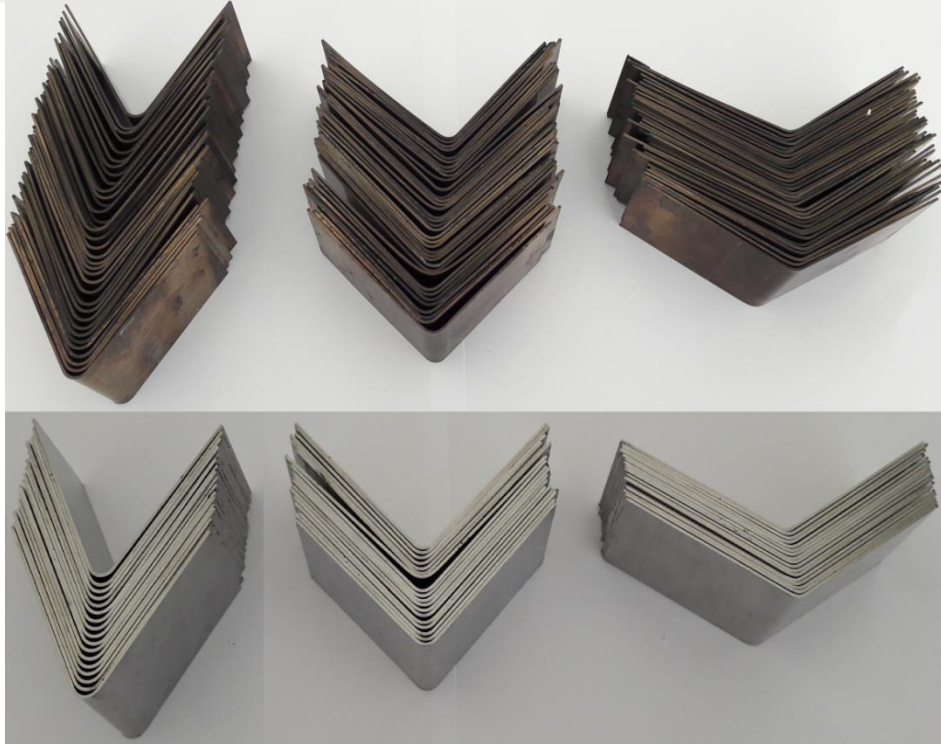
	<b>Kalıp Açıları</b>		
	<b>60°</b>	<b>90°</b>	<b>120°</b>
<b>Strok [mm]</b>	25,641	16,272	10,154



### Dip Büküm (Bottoming)

Şekil 3.4. Dip bükme tekniği (Anonim, 2009)

60°, 90° ve 120° kalıp açılarında bükülen 162 adet sac metal numuneye ait görüntüler Resim 3.8’de verilmiştir.



Resim 3.8. 60°, 90° ve 120° kalıp açılarında bükülen sac metal numunelerden ısı işlem görmüş (üstte) ısı işlem görmemiş (altta)

### 3.5. Metalografik İnceleme

Mikro yapı incelemeleri için her 3 ısıl işlem grubundan (ısıl işlemsiz, normalizasyon, normalizasyon ve menevişleme) bükme işlemi görmemiş birer sac metal numune alınmış ve Metkon Metacut 250 abrasif kesici cihazı (Resim 3.9) ile belli boyutlarda kesitler alınmıştır.



**Resim 3.9.** Abrasif kesici cihaz

Kesilen her numune için Metkon Ecompress 50 bakalit cihazı (Resim 3.10) ile ayrı ayrı bakalit alınmıştır.



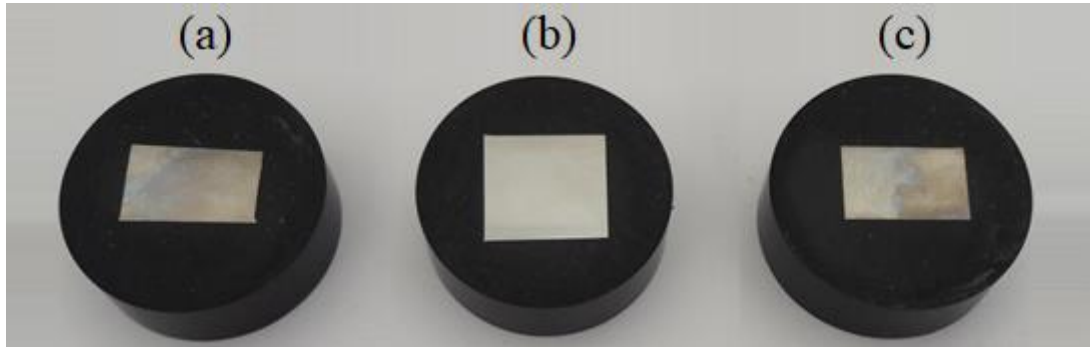
**Resim 3.10.** Bakalit cihazı

Ardından numuneler Metkon Forcipol 1V cihazında (Resim 3.11) sırası ile 180, 320, 600, 800, 1000 ve 1200 meshlik zımparalama aşamalarından geçirilmiştir. Daha sonra 1  $\mu\text{m}$  elmas süspansiyon ile parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir.



**Resim 3.11.** Zımparalama ve parlatma cihazı

Zımparalama ve parlatma işleminden geçen numunelerin yüzeyleri 5 ml nitrik asit ( $\text{HNO}_3$ ), 10 ml gliserol ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ) ve 15 ml hidroklorik asit ( $\text{HCl}$ ) Viella reaktifi çözeltisi ile dağlanmıştır (Resim 3.12) (Salman ve Gülsoy, 2004).



**Resim 3.12.** Zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerinden geçmiş numuneler  
 a) Normalizasyon ısıl işlemi görmüş b) Isıl işlem görmemiş  
 c) Normalizasyon ve menevişleme ısıl işlemi görmüş

Numunelerin mikro yapıları incelemeleri; aydınlık alan, karanlık alan, temel polarize, DIC, epifloresans ve çift-ışın interferometri araştırmaları ile uyumlu olan Nikon LV150n düz optik metal mikroskop cihazı (Resim 3.13) ile yapılmış ve dijital kamera vasıtasıyla fotoğraflanmıştır.



**Resim 3.13.** Düz optik metal mikroskobu

### **3.6. Sertlik Ölçümleri**

Numunelerin sertlik ölçümlerinde Metkon Duroline-M mikrosertlik ölçüm cihazı (Resim 3.14) kullanılmıştır. Ölçümler 500 gramlık yükün numune yüzeyi üzerinde 20 saniye bekletilmesi suretiyle yapılmıştır. Her numune yüzeyinden aynı hat üzerinde belirli aralıklarla 3 farklı ölçüm yapılmış ve dijital olarak fotoğraflanmıştır. Elmas başlığın oluşturduğu deformasyon izleri üçer kez ölçülmüş ve çıkan değerlerin ortalaması Vickers cinsinden kaydedilmiştir.



**Resim 3.14.** Sertlik ölçüm cihazı

### 3.7. Açı Ölçümleri

Bükme işlemi gerçekleştirilen sac metal numunelerin açı ölçümleri önce Mitutoyo marka mercekli universal açıölçer (Resim 3.15) ile daha sonra Axiom Too CMM koordinat ölçme cihazı (Resim 3.16) ile yapılmıştır.



**Resim 3.15.** Açıölçer



**Resim 3.16.** Koordinat ölçme cihazı (CMM)



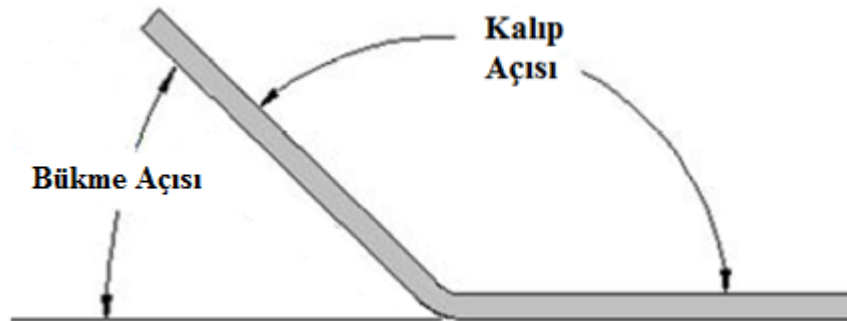
#### 4. DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde, tez çalışmasında gerçekleştirilen deney ve ölçümlerden elde edilen sonuçlar, sac numunelere uygulanan ısıtım işlem durumlarına göre; ısıtım işlemsiz, normalizasyon, normalizasyon ve menevişleme olmak üzere üç başlık altında toplanmıştır. Ayrıca bu deneylerden elde edilen tüm sonuçların; ısıtım işlem durumları, bükme açıları, hadde doğrultuları ve zımba bekleme süresi parametrelerine göre elde edilen ileri ve geri yaylanma değerlerinin yüzde ortalamaları verilmiştir.

##### 4.1. Isıtım İşlem Uygulanmayan Numuneler

Bu gruptaki deney numunelerine herhangi bir ısıtım işlem uygulanmamış doğrudan metalografik inceleme, sertlik ölçüm ve V dip bükme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda kullanılan sac numunelere; 3 farklı hadde doğrultusunda ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ), 3 farklı kalıp açısında ( $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ) ve zımbanın bükme sonrası sac malzeme üzerinde 30 saniye kadar bekletilip bekletilmemesi durumuna göre 18 farklı parametrede ve her deneyi üçer kez tekrar etmek suretiyle toplamda 54 bükme yapılmıştır.

Yapılan deneyler sonrası sac numunelerin açı ölçümlerinden elde edilen sonuçlar bükme açısına ve kalıp açısına göre (Şekil 4.1) iki farklı tablo halinde gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Bükme açısı ve kalıp açısı birbirinin tümleyenidir

#### 4.1.1. V-Bükme sonuçları

Isıl işlem uygulanmamış sac metal numuneler için V dip bükme sonrası elde edilen açı değerleri Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'deki gibidir.

**Çizelge 4.1.** Isıl işlem uygulanmamış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası kalıp açılara göre elde edilen açı değerleri

	Hadde doğrultusu	0°			45°			90°			
		60°	90°	120°	60°	90°	120°	60°	90°	120°	
Isıl İşlemsiz	Kalıp Açısı										
	Zımbanın sac üzerinde bekleme süresi	-	59°15'	90°	120°	57°30'	88°40'	119°5'	56°35'	87°40'	118°30'
		-	59°10'	90°	120°	57°30'	88°45'	119°15'	56°35'	87°45'	118°30'
		-	59°15'	90°	120°45'	57°30'	88°45'	119°15'	56°35'	87°40'	118°35'
		30s	59°55'	90°	120°5'	58°15'	89°35'	119°40'	56°40'	88°10'	119°
		30s	59°50'	90°	120°	58°20'	89°20'	119°40'	56°40'	88°10'	119°5'
		30s	59°55'	90°	120°5'	58°20'	89°20'	119°45'	56°40'	88°15'	119°5'

V bükme işlemi sonrası elde edilen kalıp açıları ile bükme açılara ait değerler birbirini 180 dereceye tamamlar. Bu yüzden Çizelge 4.2'de bükme açısı değerleri 120°, 90°, 60° sırasına göre Çizelge 4.1'deki kalıp açılarını tamamlayacak şekilde gösterilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Isıl işlem uygulanmamış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açılarına göre elde edilen açı değerleri

	Hadde doğrultusu	0°			45°			90°			
		120°	90°	60°	120°	90°	60°	120°	90°	60°	
<b>Isıl İşlemsiz</b>	Bükme Açısı	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Zımbanın sac üzerinde bekleme süresi	-	120°45'	90°	60°	122°30'	91°20'	60°55'	123°25'	92°20'	61°30'
		-	120°50'	90°	60°	122°30'	91°15'	60°45'	123°25'	92°15'	61°30'
		-	120°45'	90°	59°15'	122°30'	91°15'	60°45'	123°25'	92°20'	61°25'
		30s	120°5'	90°	59°55'	121°45'	90°35'	60°20'	123°20'	91°50'	61°
		30s	120°10'	90°	60°	121°40'	90°40'	60°20'	123°20'	91°50'	60°55'
		30s	120°5'	90°	59°55'	121°40'	90°40'	60°15'	123°20'	91°50'	60°55'

Çizelge 4.3'te, Çizelge 4.2'de her parametre için üçer kez tekrar edilmiş bükme deneylerinden elde edilen sonuçların aritmetik ortalamaları verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Isıl işlem uygulanmamış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açılarına göre elde edilen ortalama açı değerleri [°]

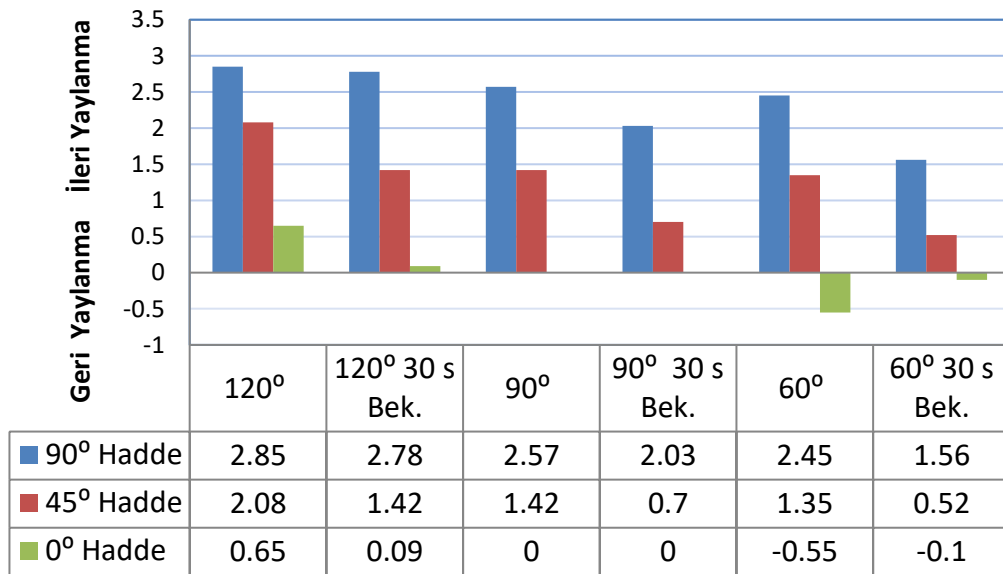
Numunelere Uygulanan Isıl İşlem	Bükme Açısı	Hadde doğrultusu					
		0°		45°		90°	
		Zımbanın Sac Malzeme Üzerinde Bekleme Süresi					
		-	30 s	-	30 s	-	30 s
Isıl İşlem Uygulanmamış	120°	120,78°	120,11°	122,50°	121,70°	123,42°	123,33°
	90°	90°	90°	91,28°	90,64°	92,31°	91,83°
	60°	59,67°	59,94°	60,81°	60,31°	61,47°	61,96°

Çizelge 4.4'te ise Çizelge 4.3'de elde edilen açıların ileri ve geri yaylanma değerlerinin yüzde karşılıkları verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Isıl işlem uygulanmamış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açılarına göre elde edilen ileri ve geri yaylanmaların yüzde değerleri [%]

Numunelere Uygulanan Isıl İşlemler	Bükme Açısı	Hadde doğrultusu					
		0°		45°		90°	
		Zımbanın Sac Malzeme Üzerinde Bekleme Süresi					
		-	30 s	-	30 s	-	30 s
Isıl İşlem Uygulanmamış	120°	0,65	0,09	2,08	1,42	2,85	2,78
	90°	0	0	1,42	0,7	2,57	2,03
	60°	-0,55	-0,1	1,35	0,52	2,45	1,56

Şekil 4.2'de ısıl işlem uygulanmamış numunelerin hadde doğrultusu, kalıp açısı ve zımbanın sac numune üzerinde bekleme süresine göre gerçekleştirilen tüm bükme deneyleri sonrası elde edilen ileri ve geri yaylanma açılarının ortalama yüzde değerleri verilmiştir. Grafiğin daha rahat anlaşılabilmesi için sütun çizgileri 90°, 45°, 0° hadde doğrultusu ve 120°, 90°, 60° bükme açısı sırasına göre büyük değerden küçük değere doğru sıralanmıştır.



**Şekil 4.2.** Isıl işlem uygulanmamış sac numunelere ait; hadde doğrultusu, kalıp açısı ve zımbanın bekleme süresine göre ileri ve geri yaylanma değerleri [%]

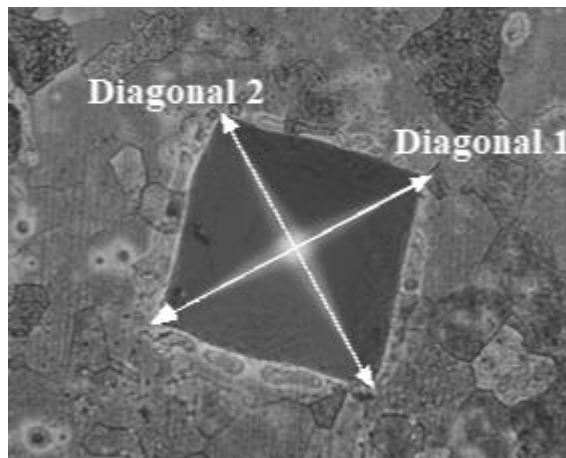
#### 4.1.2. Sertlik ölçümü

Elmas başlığın oluşturduğu üç farklı deformasyon izinin her biri üçer kez ölçülmüş ve çıkan değerlerin ortalaması Vickers cinsinden kaydedilmiştir (Çizelge 4.5).

**Çizelge 4.5.** Isıl işlem uygulanmamış sac numune yüzeyinden alınan sertlik ölçümü değerleri

Ölçüm No	HV	Diagonal 1[ $\mu\text{m}$ ]	Diagonal 2[ $\mu\text{m}$ ]
A1	159	75,83	76,88
A2	159,72	75,05	77,32
A3	158,91	75,92	76,83
B1	158,63	75,56	77,32
B2	157,33	76,01	77,51
B3	158,67	75,62	77,26
C1	158,21	77,27	76,31
C2	157,54	77,67	76,24
C3	158,14	77,76	76,35
<b>Ortalamlar</b>	<b>158,12</b>	<b>76,30</b>	<b>76,90</b>

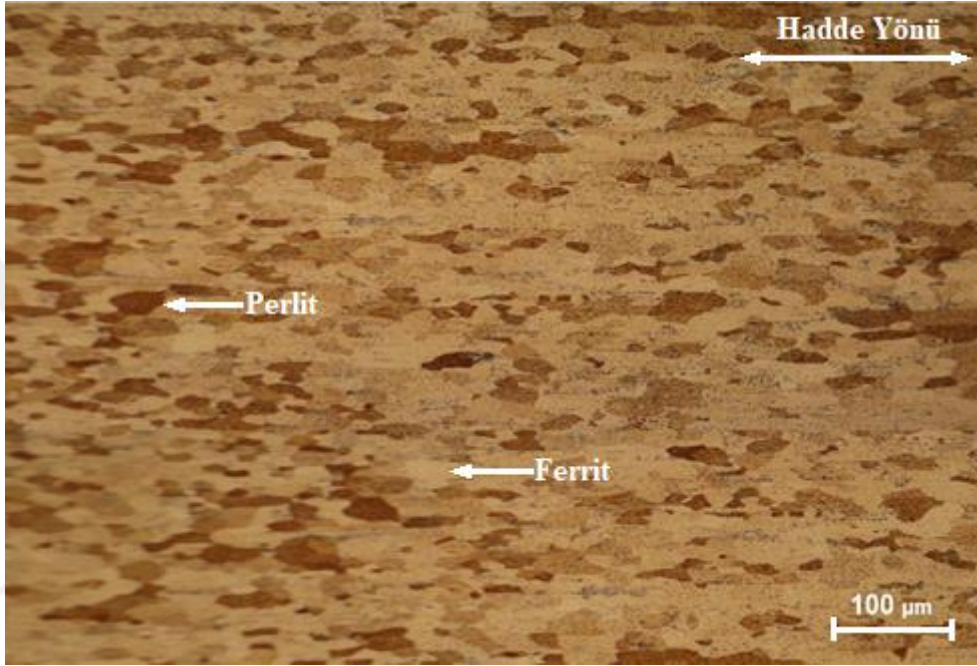
Isıl işlem görmemiş numune yüzeyinde yapılan sertlik ölçümünde elmas başlığın oluşturduğu deformasyon izi dijital olarak fotoğraflanmıştır (Resim 4.1).



**Resim 4.1.** Isıl işlem görmemiş numune yüzeyinde yapılan sertlik ölçümünde elmas başlığın oluşturduğu deformasyon izi

### 4.1.3. Mikro yapı

AISI 430 sac metal malzemenin ısıtılmış numunesinden alınan mikro yapı görüntüleri Resim 4.2'de görülmektedir.



**Resim 4.2.** Isıtılmış işlem görmemiş deney malzemesi mikro yapısı

Görüntüde açık renkli taneler HMK yapıları demir içerisinde çok az oranda karbonun çözünmesi ile oluşan arayer ferrit fazı, koyu renkli olanlar ise karbonca zengin sementit lamellerinin ferrit matris üzerinde dizilmesiyle oluşan perlit yapısıdır. Ferrit yumuşak, perlit ise görece daha sert bir fazdır. Düşük karbonlu paslanmaz çelik sınıfına giren AISI 430 resimde de görüldüğü üzere yapısındaki karbon oranından dolayı perlit taneleri yapıda daha az yer alırken, demirce zengin ferritik matris fazı mikro yapının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Haddelenmenin bir sonucu olarak ise tanelerde belirli kristalografik doğrultuda yönelme ve yatay olarak uzama görülmektedir.

## 4.2. Normalizasyon Isıl İşlemi Uygulanan Numuneler

Bu gruptaki deney numunelerine normalizasyon ısıl işlemi uygulanmıştır. Bu bağlamda 60 adet deney numunesi fırına yerleştirilmiş ve ötektoid altı bir çelik olan AISI 430 için A<sub>3</sub> sıcaklığının hemen üzerine, 875°C sıcaklığa 8 saatte kademeli olarak çıkılmış ve 5 dk kadar bekletilmiştir. Ardından fırından çıkartılan numuneler durgun havada oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır (Bkz. Şekil 3.3a).

Normalizasyon ısıl işlemi görmüş sac numunelere; 3 farklı hadde doğrultusunda (0°, 45°, 90°), 3 farklı kalıp açısında (60°, 90°, 120°) ve zımbanın bükme sonrası sac malzeme üzerinde 30 saniye kadar bekletilip bekletilmemesi durumuna göre 18 farklı parametrede ve her deneyi üçer kez tekrar etmek suretiyle toplamda 54 bükme yapılmıştır.

### 4.2.1. V-Bükme sonuçları

Normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış sac metal numuneler için V dip bükme sonrası elde edilen açı değerleri Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'deki gibidir.

**Çizelge 4.6.** Normalizasyon ısıl işlem uygulanmamış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası kalıp açalarına göre elde edilen açı değerleri

Normalizasyon Isıl İşlemi	Hadde doğrultusu	0°			45°			90°		
	Kalıp Açısı	60°	90°	120°	60°	90°	120°	60°	90°	120°
Zımbanın sac üzerinde bekleme süresi	-	58°40'	89°40'	119°50'	56°45'	88°25'	119°	55°30'	87°5'	118°10'
	-	58°45'	89°25'	119°55'	56°50'	88°25'	119°	55°30'	87°	118°15'
	-	58°45'	89°20'	120°	56°45'	88°25'	118°55'	55°30'	87°5'	118°15'
	30s	59°20'	90°	120°	57°	88°45'	119°15'	56°5'	87°40'	118°45'
	30s	59°20'	90°	120°	57°	88°40'	119°15'	56°15'	87°40'	118°45'
	30s	59°15'	90°	120°	57°	88°45'	119°20'	56°15'	87°45'	118°45'

V bükme işlemi sonrası elde edilen kalıp açıları ile bükme açılara ait değerler birbirini 180 dereceye tamamlar. Bu yüzden Çizelge 4.7’de bükme açısı değerleri 120°, 90°, 60° sırasına göre Çizelge 4.6’daki kalıp açılarını tamamlayacak şekilde gösterilmiştir.

**Çizelge 4.7.** Normalizasyon ısı işlemi uygulanmamış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açılara göre elde edilen açı değerleri

Normalizasyon Isıl İşlemi	Hadde doğrultusu	0°			45°			90°		
	Bükme Açısı	120°	90°	60°	120°	90°	60°	120°	90°	60°
	Zımbanın sac üzerinde bekleme süresi	-	121°20'	90°40'	60°10'	123°15'	91°35'	61°	124°30'	92°55'
	-	121°15'	90°35'	60°5'	123°10'	91°35'	61°	124°30'	93°	61°45'
	-	121°15'	90°40'	60°	123°15'	91°35'	61°5'	124°30'	92°55'	61°45'
	30s	120°40'	90°	60°	123°	91°15'	60°45'	123°55'	92°20'	61°15'
	30s	120°40'	90°	60°	123°	91°20'	60°45'	123°45'	92°20'	61°15'
	30s	120°45'	90°	60°	123°	91°15'	60°40'	123°45'	92°15'	61°15'

Çizelge 4.8’de, Çizelge 4.7’de her parametre için üçer kez tekrar edilmiş bükme deneylerinden elde edilen sonuçların aritmetik ortalamaları verilmiştir.

**Çizelge 4.8.** Normalizasyon ısı işlemi uygulanmış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açılara göre elde edilen ortalama açı değerleri [°]

Numunelere Uygulanan Isıl İşlem	Bükme Açısı	Hadde doğrultusu					
		0°		45°		90°	
		Zımbanın Sac Malzeme Üzerinde Bekleme Süresi					
		-	30 s	-	30 s	-	30 s
Normalizasyon Isıl İşlemi Uygulanmış	120°	121,28°	120,69°	123,22°	123°	124,50°	123,81°
	90°	90,64°	90°	91,58°	91,28°	92,95°	92,31°
	60°	60,08°	60°	61,03°	60,72°	61,78°	61,26°

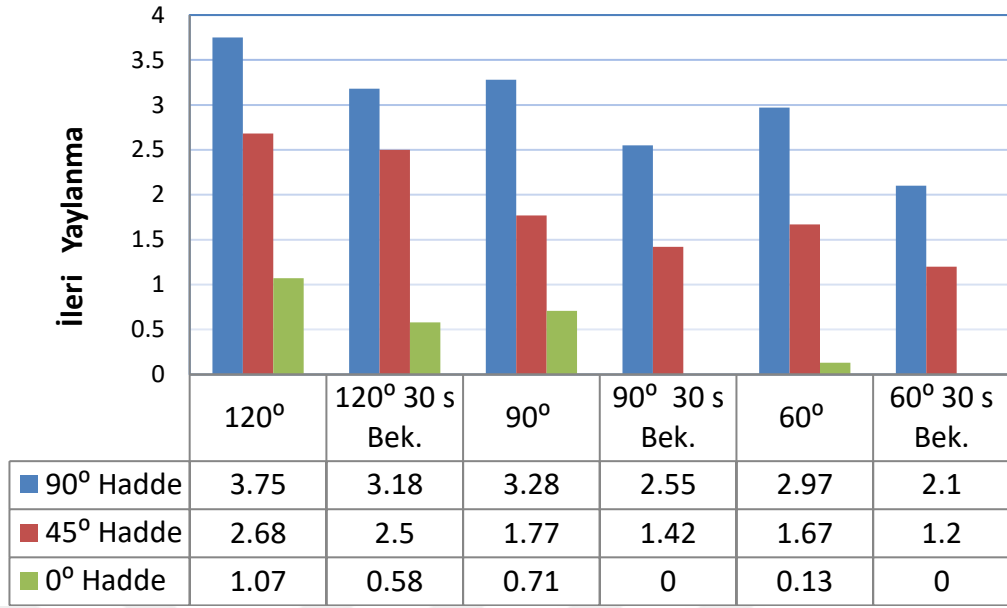


Çizelge 4.9'da ise Çizelge 4.8'de elde edilen açların ileri ve geri yaylanma değerlerinin yüzde karşılıkları verilmiştir.

**Çizelge 4.9.** Normalizasyon ısı işlemi uygulanmış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açlarına göre elde edilen ileri ve geri yaylanmaların yüzde değerleri [%]

Numunelere Uygulanan Isıl İşlem	Bükme Açısı	Hadde doğrultusu					
		0°		45°		90°	
		Zımbanın Sac Malzeme Üzerinde Bekleme Süresi					
		-	30 s	-	30 s	-	30 s
Normalizasyon Isıl İşlemi Uygulanmış	120°	1,07	0,58	2,68	2,5	3,75	3,18
	90°	0,71	0	1,77	1,42	3,28	2,55
	60°	0,13	0	1,67	1,2	2,97	2,1

Şekil 4.3'te normalizasyon ısı işlemi uygulanmış numunelerin hadde doğrultusu, kalıp açısı ve zımbanın sac numune üzerinde bekleme süresine göre gerçekleştirilen tüm bükme deneyleri sonrası elde edilen ileri ve geri yaylanma açılarının ortalama yüzde değerleri verilmiştir. Grafiğin daha rahat anlaşılabilmesi için sütun çizgileri 90°, 45°, 0° hadde doğrultusu ve 120°, 90°, 60° bükme açısı sırasına göre büyük değerden küçük değere doğru sıralanmıştır.



**Şekil 4.3.** Normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış sac numunelere ait; hadde doğrultusu, kalıp açısı ve zımbanın bekleme süresine göre ileri ve geri yaylanma değerleri [%]

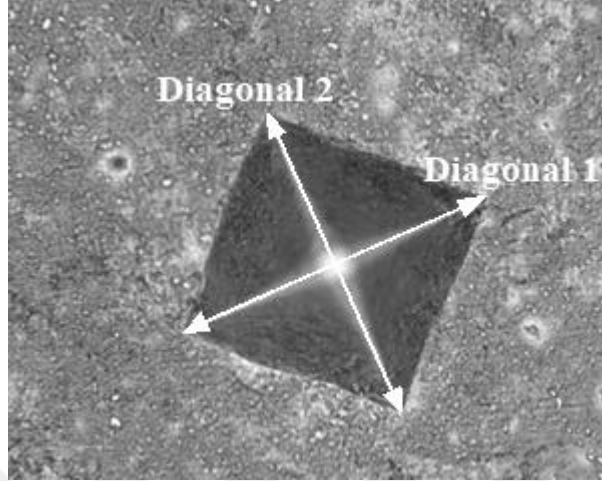
#### 4.2.2. Sertlik ölçümü

Elmas başlığın oluşturduğu üç farklı deformasyon izinin her biri üçer kez ölçülmüş ve çıkan değerlerin ortalaması Vickers cinsinden kaydedilmiştir (Çizelge 4.10).

**Çizelge 4.10.** Normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış sac numune yüzeyinden alınan sertlik ölçüm değerleri

Ölçüm No	HV	Diagonal 1 [ $\mu\text{m}$ ]	Diagonal 2 [ $\mu\text{m}$ ]
A1	202,53	64,76	67,33
A2	206,25	67,58	66,51
A3	206,97	68,13	65,72
B1	206,25	64,59	63,43
B2	206,22	64,50	63,53
B3	205,70	64,40	63,78
C1	205,54	63,97	64,25
C2	204,80	64,14	64,29
C3	203,39	64,35	64,49
<b>Ortalamalar</b>	<b>205,29</b>	<b>65,16</b>	<b>64,85</b>

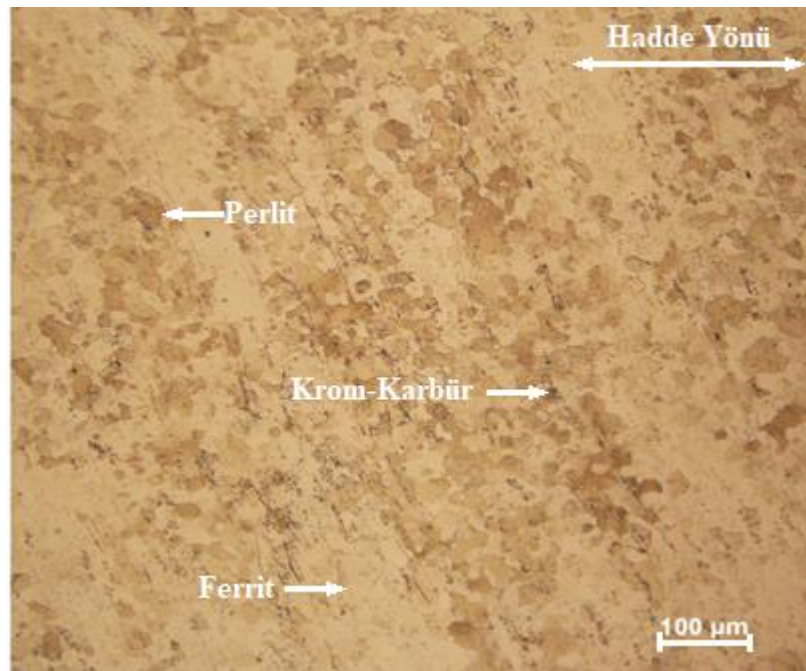
Isıl işlem görmemiş numune yüzeyinde yapılan sertlik ölçümünde elmas başlığın oluşturduğu deformasyon izi dijital olarak fotoğraflanmıştır (Resim 4.3).



**Resim 4.3.** Normalizasyon ısıl işlemi görmüş numune yüzeyinde yapılan sertlik ölçümünde elmas başlığın oluşturduğu deformasyon izi

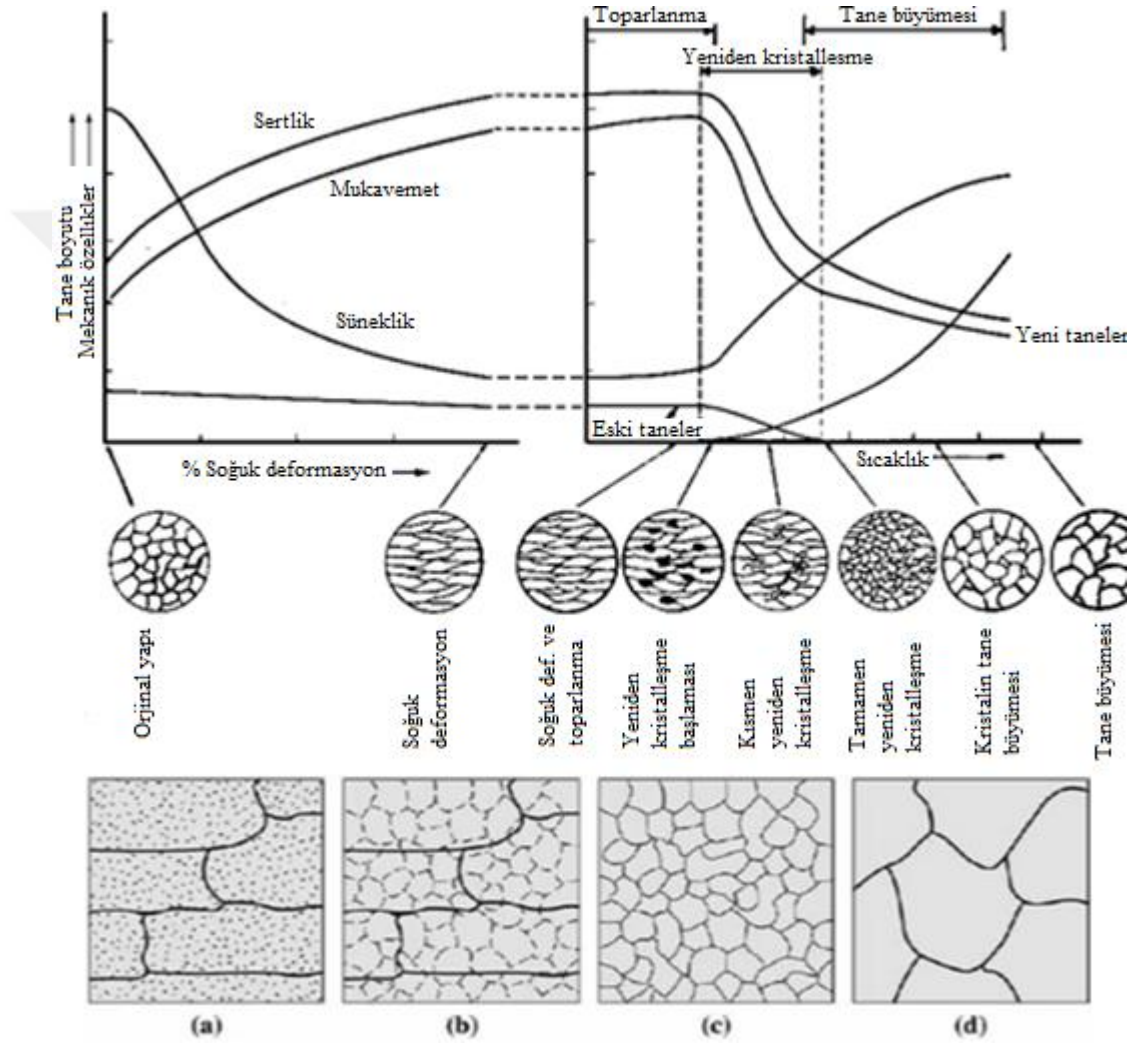
#### 4.2.3. Mikro yapı

AISI 430 sac metal malzemenin normalizasyon ısıl işlemine tabi tutulmuş numunesinden alınan mikro yapı görüntüleri Resim 4.4'te görülmektedir.



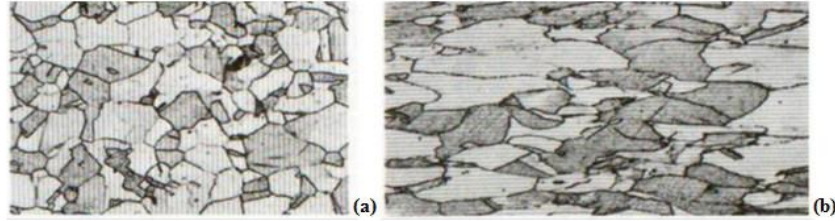
**Resim 4.4.** Normalizasyon ısıl işlemine tabi tutulmuş deney malzemesi mikro yapısı

Resim incelendiğinde açık renkli taneler ferrit fazını, koyu renkli taneler ise perlit yapısını göstermek üzere ısııl işlemden önceki ferritik yapının korunduğu ancak haddeleme işleminden sonra bir miktar yönelme ve uzama gösteren kaba tanelerin (Resim 4.2) normalizasyon ısııl işlemi sonrası yeniden toparlanıp ince taneli bir yapıya (Resim 4.4) dönüştüğü görülmektedir.



**Şekil 4.4.** Soğuk işlem oranının ve soğuk işlemden sonraki tavlama sıcaklığının mekanik özellik ve mikro yapıya etkisi a) Soğuk işlem görmüş b) Toparlanma sonrası c) Yeniden kristalleşme sonrası d) Tane büyümesi sonrası (Osmanoğlu, 2012)

Isıl işlem esnasında yüksek sıcaklıkta belirli bir süre için tutulan malzemenin soğuk işlemde kazandığı yapısı bozulur. Mikro yapıdaki bu değişim üç adımda gerçekleşir.



**Resim 4.5.** AISI 430 paslanmaz çeliğinin a) Soğuk deformasyon öncesi b) Soğuk deformasyon sonrası mikro yapıları (Osmanoğlu, 2012)

Bunlardan ilki toparlanma safhasıdır. Bu safhada soğuk işlenmiş malzemelerdeki (Resim 4.5) dislokasyonlar daha düşük enerjiye sahip oldukları yeni bir düzene girerler (Şekil 4.4a). Bu safhasında malzemenin mukavemet ve sertliğinde önemli bir değişim olmaz (Osmanoğlu, 2012). İkinci aşama olan yeniden kristalleşme safhasında dislokasyon içeren toparlanmış taneler kaybolur ve yerine yeni taneler çekirdeklenir (Şekil 4.4b). Çekirdeklenme genellikle hatalı bölgelerde, tane sınırlarında meydana gelir. Toparlanmış tanelerdeki dislokasyonlar yeni oluşan tanelerin sınırlarına kaçarlar. Böylece içlerinde dislokasyon miktarı çok az olan veya dislokasyon bulunmayan küçük yeni taneler oluşur (Şekil 4.4c). Yeniden kristalleşen taneler, tavlama sıcaklığında uzun süre tutulursa veya yeniden kristalleşme sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda tavlınırsa yayınma ile zamanla büyürler (Şekil 4.4d) (Kayalı ve Ensari, 2000).

Bunun dışında yapıda daha koyu renkli olarak tane sınırlarında ve ferritik matris içerisinde dağınık halde bulunan çökelmiş krom karbür ve nitrür tanecikleri de görülmektedir (Bkz. Resim 4.4). Bu çökelmeye ise yüksek sıcaklıkta uzun süre tutulan malzemede sementit yapının bozulup serbest kalan karbon atomlarının perlitik yapıyı terk ederek ferrit matris içine ve tane sınırlarına difüze olması ve ardından gerçekleştirilen durgun havada su verme işlemi neticesinde donarak buldukları yerde hapsolmesinin sebebiyet verdiği düşünülmektedir (Krysiak ve ark., 1993).

Düşük karbon içeriğinden dolayı AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğinde normalizasyon ısıl işlemi sonrası su verme uygulamasında martenzitik yapının oluşması söz konusu olamaz. Normalizasyon ısıl işlemi sonrası malzemenin sertliğinde görülen bir miktar artışın sebebinin yine bu krom karbür tanecikleri olduğu savunulabilir (Smith, 2000).

Ayrıca oluşan krom karbürün ağırlıkça %90'nını krom oluşturduğundan, tane sınırlarında ve matris içinde bulunan bu karbürler ferritik yapı içindeki krom miktarını aşırı derecede azaltır (Anık ve ark., 1993). Sonuç olarak ise korozif bir ortamda kalan malzemenin korozyon dayanımındaki düşme kaçınılmazdır.

### **4.3. Normalizasyon ve Menevişleme Isıl İşlemi Uygulanan Numuneler**

Bu gruptaki numunelere önce normalizasyon ardından ise menevişleme ısıl işlemi uygulanmıştır. Bu bağlamda fırına yerleştirilen 60 adet numune 875°C sıcaklığa kadar 8 saatte kademeli olarak çıkartılmış ve bu sıcaklıkta 5 dk kadar bekletildikten sonra durgun havada soğumaya bırakılmıştır. Oda sıcaklığına kadar soğuyan numuneler tekrar fırına alınmış ve 2 saatte 220°C sıcaklığa kademeli olarak çıkılmıştır. Bu sıcaklıkta 5 dk kadar bekleyen numuneler tekrar durgun hava ortamına alınmış ve oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır (Bkz. Şekil 3.3b).

Sac numunelere; 3 farklı hadde doğrultusunda (0°, 45°, 90°), 3 farklı kalıp açısında (60°, 90°, 120°) ve zımbanın bükme sonrası sac malzeme üzerinde 30 saniye kadar bekletilip bekletilmemesi durumuna göre 18 farklı parametrede ve her deneyi üçer kez tekrar etmek suretiyle toplamda 54 bükme yapılmıştır.

### 4.3.1. V-Bükme sonuçları

Normalizasyon ve menevişleme ısıl işlemi uygulanmış sac metal numuneler için V dip bükme sonrası elde edilen açı değerleri Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'deki gibidir.

**Çizelge 4.11.** Normalizasyon ve menevişleme ısıl işlemi uygulanmış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası kalıp açılarına göre elde edilen açı değerleri

Normalizasyon + Menevişleme Isıl İşlemi	Hadde doğrultusu	0°			45°			90°		
	Kalıp Açısı	60°	90°	120°	60°	90°	120°	60°	90°	120°
	Zımbanın sac üzerinde bekleme süresi	-	60°10'	90°20'	120°30'	60°10'	90°15'	120°25'	60°5'	90°15'
	-	60°10'	90°25'	120°35'	60°15'	90°15'	120°25'	60°5'	90°15'	120°20'
	-	60°15'	90°20'	120°30'	60°15'	90°20'	120°25'	60°10'	90°15'	120°20'
	30s	60°15'	90°15'	120°30'	60°	90°15'	120°50'	60°5'	90°	120°20'
	30s	60°10'	90°20'	120°30'	60°	90°15'	120°45'	60°5'	90°5'	120°20'
	30s	60°15'	90°20'	120°30'	60°5'	90°15'	120°45'	60°5'	90°5'	120°20'

V bükme işlemi sonrası elde edilen kalıp açıları ile bükme açılarına ait değerler birbirini 180 dereceye tamamlar. Bu yüzden Çizelge 4.12'de bükme açısı değerleri 120°, 90°, 60° sırasına göre Çizelge 4.11'deki kalıp açılarını tamamlayacak şekilde gösterilmiştir.

**Çizelge 4.12.** Normalizasyon ve menevişleme ısı işlemi uygulanmamış sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açılarına göre elde edilen açı değerleri

Normalizasyon + Menevişleme Isıl İşlemi	Hadde doğrultusu	0°			45°			90°		
	Bükme Açısı	120°	90°	60°	120°	90°	60°	120°	90°	60°
	Zımbanın sac üzerinde bekleme süresi	-	119°50'	89°40'	59°30'	119°50'	89°45'	59°35'	119°55'	89°45'
	-	119°50'	89°35'	59°25'	119°45'	89°45'	59°35'	119°55'	89°45'	59°40'
	-	119°45'	89°35'	59°30'	119°45'	89°40'	59°35'	119°50'	89°45'	59°40'
	30s	119°45'	89°45'	59°30'	120°	89°45'	59°50'	119°55'	90°	59°40'
	30s	119°50'	89°40'	59°30'	120°	89°45'	59°45'	119°55'	89°55'	59°40'
	30s	119°45'	89°40'	59°30'	119°55'	89°45'	59°45'	119°55'	89°55'	59°40'

Çizelge 4.13'de, Çizelge 4.12'de her parametre için üçer kez tekrar edilmiş bükme deneylerinden elde edilen sonuçların aritmetik ortalamaları verilmiştir.

**Çizelge 4.13.** Sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açılarına göre elde edilen ortalama açı değerleri [°]

Numunelere Uygulanan Isıl İşlem	Bükme Açısı	Hadde doğrultusu					
		0°		45°		90°	
		Zımbanın Sac Malzeme Üzerinde Bekleme Süresi					
		-	30 s	-	30 s	-	30 s
Normalizasyon ve Menevişleme Uygulanmış	120°	119,75°	119,78°	119,78°	119,97°	119,89°	119,92°
	90°	89,62°	89,69°	89,72°	89,75°	89,75°	89,94°
	60°	59,46°	59,50°	59,59°	59,78°	59,69°	59,72°

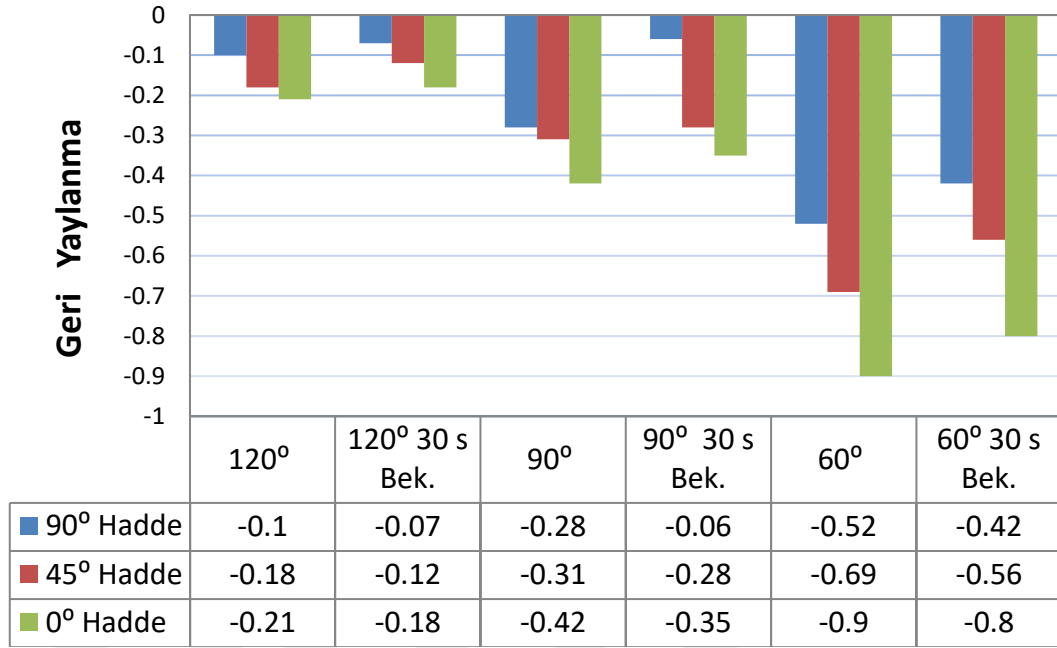


Çizelge 4.14'te ise Çizelge 4.13'de elde edilen açıların ileri ve geri yaylanma değerlerinin yüzde karşılıkları verilmiştir.

**Çizelge 4.14.** Sac metal numunelerin V dip bükme işlemi sonrası bükme açlarına göre elde edilen ileri ve geri yaylanmaların yüzde değerleri [%]

Numunelere Uygulanan Isıl İşlem	Bükme Açısı	Hadde doğrultusu					
		0°		45°		90°	
		Zımbanın Sac Malzeme Üzerinde Bekleme Süresi					
		-	30 s	-	30 s	-	30 s
Normalizasyon ve Menevişleme Uygulanmış	120°	-0,21	-0,18	-0,18	-0,12	-0,1	-0,07
	90°	-0,42	-0,35	-0,31	-0,28	-0,28	-0,06
	60°	-0,9	-0,8	-0,69	-0,56	-0,52	-0,47

Şekil 4.5'te grafikte normalizasyon ve menevişleme ısıl işlemleri uygulanmış numunelerin hadde doğrultusu, kalıp açısı ve zımbanın sac numune üzerinde bekleme süresine göre gerçekleştirilen tüm bükme deneyleri sonrası elde edilen ileri ve geri yaylanma açılarının ortalama yüzde değerleri verilmiştir. Grafiğin daha rahat anlaşılabilmesi için sütun çizgileri 90°, 45°, 0° hadde doğrultusu ve 120°, 90°, 60° bükme açısı sırasına göre büyük değerden küçük değere doğru sıralanmıştır.



**Şekil 4.5.** Normalizasyon ve menevişleme ısıl işlemi uygulanmış sac numunelere ait; hadde doğrultusu, kalıp açısı ve zımbanın bekleme süresine göre ileri ve geri yaylanma değerleri [%]

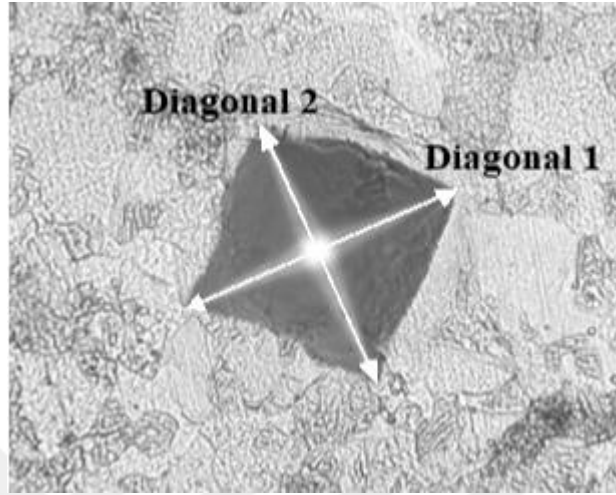
#### 4.3.2. Sertlik ölçümü

Elmas başlığın oluşturduğu üç farklı deformasyon izinin her biri üçer kez ölçülmüş ve çıkan değerlerin ortalaması Vickers cinsinden kaydedilmiştir (Çizelge 4.15).

**Çizelge 4.15.** Normalizasyon ve menevişleme ısıl işlemi uygulanmış sac numunenin yüzeyinden alınan sertlik ölçüm değerleri

Ölçüm No	HV	Diagonal 1 [ $\mu\text{m}$ ]	Diagonal 2 [ $\mu\text{m}$ ]
A1	150,31	78,88	78,18
A2	149,74	79,07	78,29
A3	149,76	78,91	78,44
B1	149,67	79,38	78,02
B2	149,14	77,87	79,28
B3	148,46	78,68	77,27
C1	148,99	76,76	77,92
C2	150,23	77,46	76,60
C3	150,02	77,46	76,7
<b>Ortalamalar</b>	<b>149,60</b>	<b>78,27</b>	<b>77,86</b>

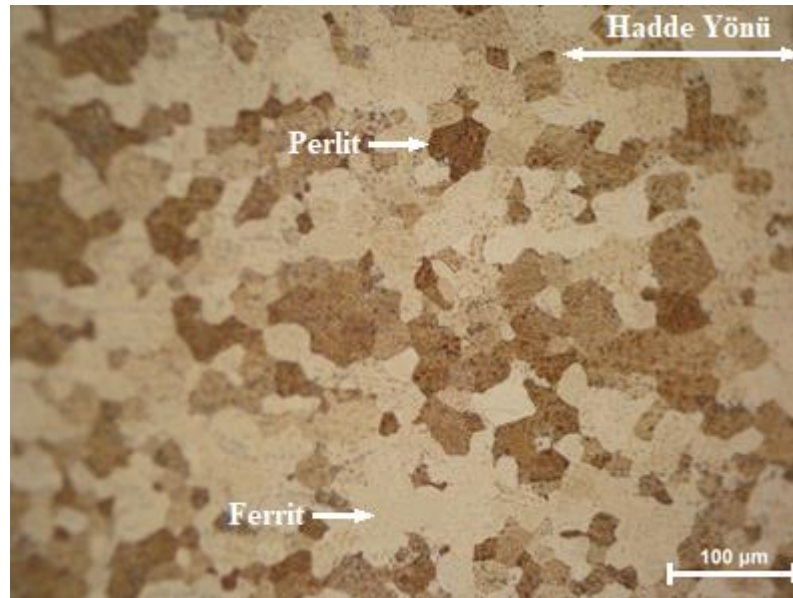
Isıl işlem görmemiş numune yüzeyinde yapılan sertlik ölçümünde elmas başlığın oluşturduğu deformasyon izi dijital olarak fotoğraflanmıştır (Resim 4.6).



**Resim 4.6.** Normalizasyon ve menevişleme ısıl işlemi görmüş numune yüzeyinde yapılan sertlik ölçümünde elmas başlığın oluşturduğu deformasyon izi

#### 4.3.3. Mikro yapı

AISI 430 sac malzemenin normalizasyon ve ardından menevişleme ısıl işlemine tabi tutulmuş numunesinden alınan mikro yapı görüntüleri Resim 4.7'de görülmektedir.



**Resim 4.7.** Normalizasyon ve Menevişleme ısıl işlemine tabi tutulmuş deney malzemesi mikro yapısı

Resim incelendiğinde açık renkli taneler ferrit fazını, koyu renkli taneler ise perlit yapısını göstermek üzere normalizasyon ve menevişleme ısı işlemlerinden sonra ferritik yapının korunduğu ancak tane sınırlarında ve ferritik matris içinde dağınık halde bulunan krom karbür taneciklerinin (Bkz. Resim 4.4) kaybolduğu (Bkz. Resim 4.5) görünmektedir.

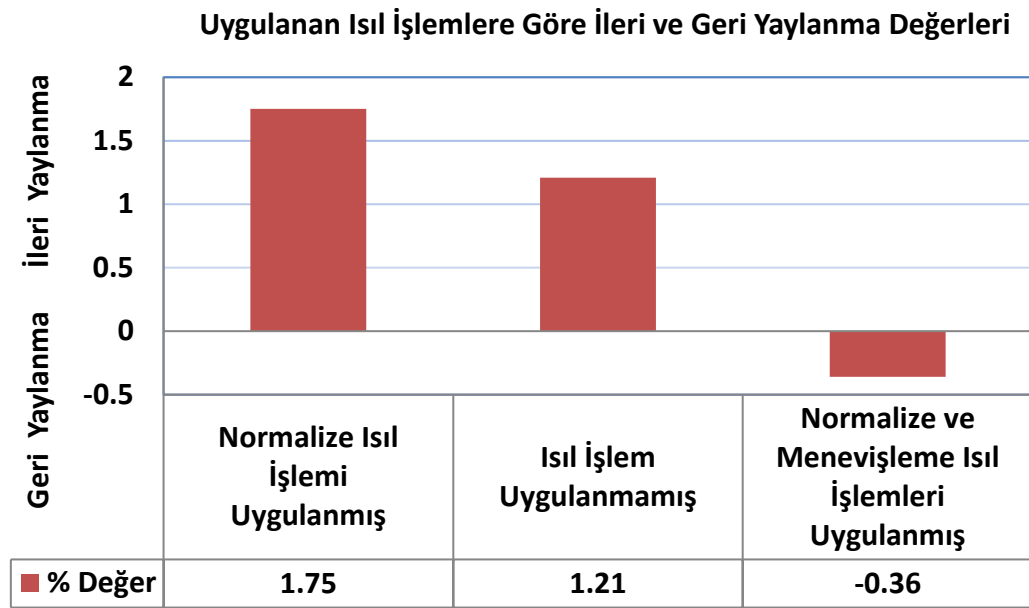
Bunun sebebinin ise normalizasyon ısı işlemi sonrası durgun havada su verme ile tane sınırlarında ve matris içinde hapsolan krom karbür taneciklerini oluşturan karbon atomlarının menevişleme ısı işlemi ile tekrar perlitik yapı içindeki sementit yapıya dönmesi olduğunu düşünülmektedir (Novikov, 2012).

Hem krom karbür çökmesi içermeyen hem de soğuk şekil vermenin etkilerinin bertaraf edildiği bu yapının sertlik değeri ise ısı işlem uygulanmamış numuneden daha düşük olduğu görülmektedir.

Karbür çökmesi içermeyen bu yapıya sahip çelik numunenin korozyon dayanımını tekrar kazandığı sonucuna varılabilir.

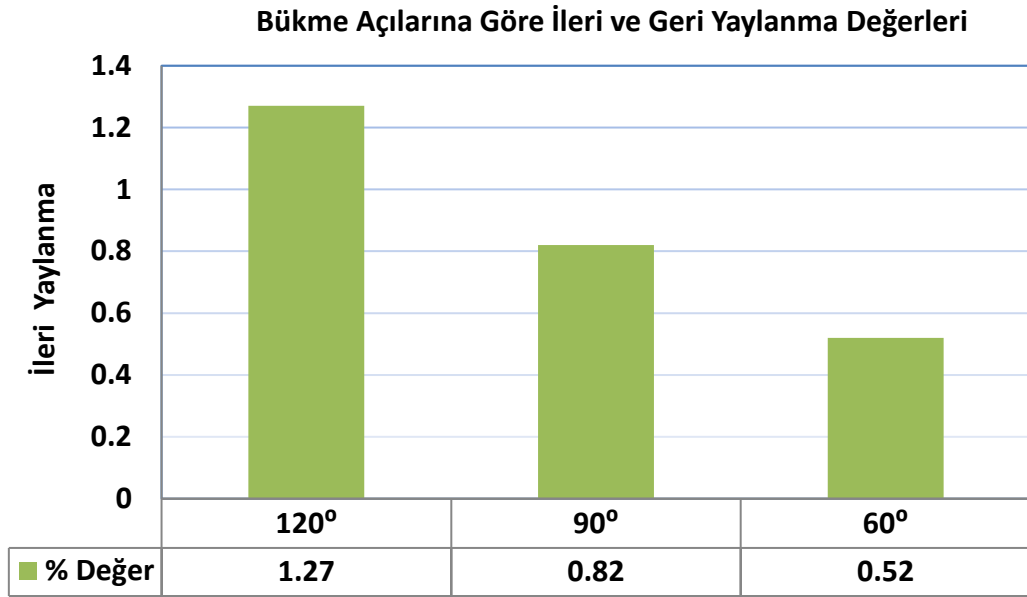
#### 4.4. Parametrelere Göre İleri ve Geri Yaylanma Sonuçları

Bu bölümde, gerçekleştirilen deneylerden elde edilen tüm sonuçların; ısıtma işlem durumları, bükme açıları, hadde doğrultuları ve zımba bekleme süresi parametrelerine göre elde edilen ileri ve geri yaylanma değerlerinin yüzde ortalamaları verilmiştir.



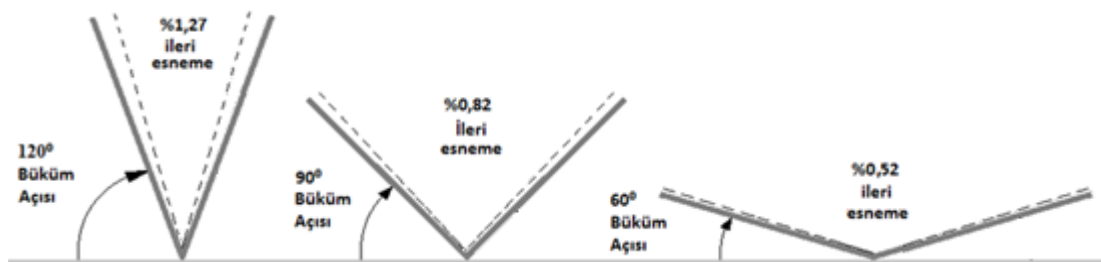
**Şekil 4.6.** Sac numunelerin uygulanan ısıtma işlem durumlarına göre bükme açısı, hadde doğrultusu ve zımba bekleme süresi üzerinden ortalama ileri ve geri yaylanma değerleri

Şekil 4.6’da her ısıtma işlem durumuna ait; bükme açıları, hadde doğrultuları ve zımba bekleme süresi parametrelerine göre elde edilen ileri ve geri yaylanma değerlerinin yüzde ortalamaları verilmiştir. Grafiğin daha rahat anlaşılabilmesi için sütun çizgileri ısıtma işlem durumuna göre büyük değerden küçük değere doğru sıralanmıştır.

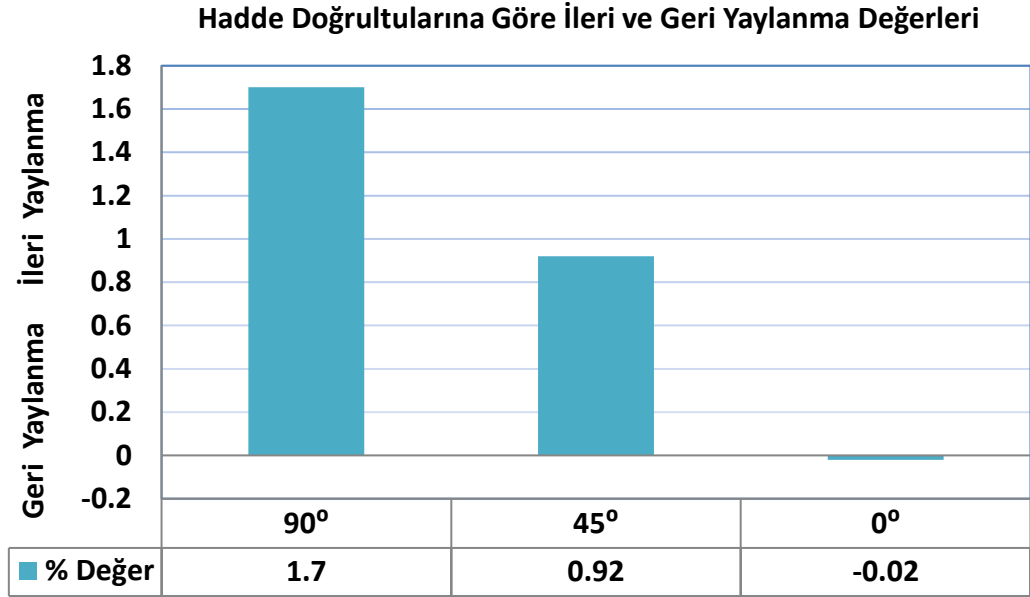


**Şekil 4.7.** Sac numunelerin bükme açılarına göre ısıl işlem, hadde doğrultusu ve zımba bekleme süresi üzerinden ortalama ileri ve geri yaylanma değerleri

Şekil 4.7’de her bükme açısına ait; ısıl işlemler, hadde doğrultuları ve zımba bekleme süresi parametrelerine göre elde edilen ileri ve geri yaylanma değerlerinin yüzde ortalamaları verilmiştir. Grafiğin daha rahat anlaşılabilmesi için sütun çizgileri bükme açılarına göre büyük değerden küçük değere doğru sıralanmıştır. Şekil 4.8’de sac numuneler üzerindeki bükme açılarına göre elde edilen ileri yaylanma değerleri görülmektedir.

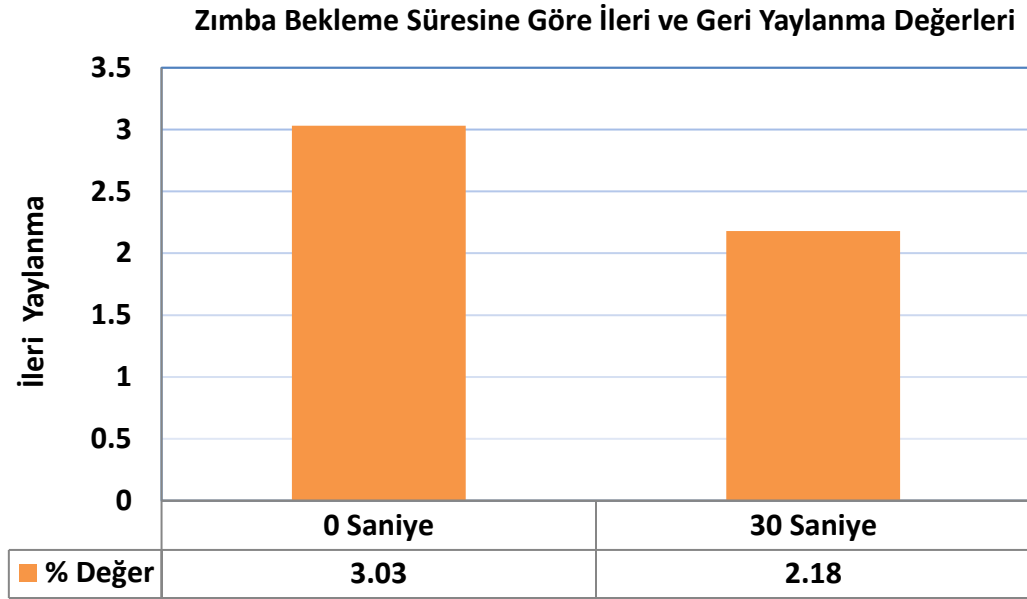


**Şekil 4.8.** Bükme açılarına göre elde edilen ileri yaylanma değerleri



**Şekil 4.9.** Sac numunelerin hadde doğrultularına göre ısı işlem, bükme açısı ve zımba bekleme süresi üzerinden ortalama ileri ve geri yaylanma değerleri

Şekil 4.9'da her hadde doğrultusuna ait; ısı işlemler, bükme açıları ve zımba bekleme süresi parametrelerine göre elde edilen ileri ve geri yaylanma değerlerinin yüzde ortalamaları verilmiştir. Grafiğin daha rahat anlaşılabilmesi için sütun çizgileri hadde doğrultularına göre büyük değerden küçük değere doğru sıralanmıştır.



**Şekil 4.10.** Sac numunelerin zimba bekleme süresine göre ısıtılma işlemi, bükme açısı ve hadde doğrultusu üzerinden ortalama ileri ve geri yaylanma değerleri

Şekil 4.10'da zimbanın sac malzeme üzerin 30 saniye kadar bekleyip beklememesi durumuna ait; ısıtılma işlemleri, bükme açıları ve hadde doğrultuları parametrelerine göre elde edilen ileri ve geri yaylanma değerlerinin yüzde ortalamaları verilmiştir. Grafiğin daha rahat anlaşılabilmesi için sütun çizgileri zimbanın bekleme süresine göre büyük değerden küçük değere doğru sıralanmıştır.



## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, uygulanan ısı işlemler, bükme açıları, hadde doğrultuları ve zımbanın sac malzeme üzerinde bekletilip bekletilmemesi parametrelerine göre bükme deneylerinden elde edilen sonuçlar; daha önce verilen çizelgeler ve grafikler yardımı ile değerlendirilmiş, çapraz karşılaştırmalar da yapılarak yorumlanmıştır.

Şekil 4.6'da sac numunelere uygulanan ısı işlem durumlarına göre ileri ve geri yaylanma değerlerini gösteren grafik incelendiğinde normalizasyon ısı işlemi gören numunelerin %1,75'lik bir ileri yaylanma değeri ile en fazla olduğu görülmektedir. Isıl işlem uygulanmamış numunelerin yaylanma değerleri ise %1,21 ile ileri yönde olmuştur. Hem normalizasyon hem de menevişleme ısı işlemi gören numunelerin ise %0,36 ile geri yönde esnediği söylenebilir.

Bükme işlemine maruz kalan sac malzemelerde deformasyona uğrayan kısmın iç yüzeyinde basma, dış yüzeyinde ise çekme gerilmeleri meydana gelmektedir (Özdemir, 2010). Basma gerilmesinin çekme gerilmesinden büyük olduğu durumlarda malzemede geri yaylanma, çekme gerilmesinin basma gerilmesinden büyük olduğu durumlarda ise ileri yaylanma meydana gelmektedir.

Plastik deformasyona maruz kalan malzemelerin elastik şekil değişimi sırasında depoladığı enerjiyi, şekil değişimine neden olan kuvvet üzerinden kalktığında geri vermesi durumuna rezilyans denilmektedir (Hosford ve Caddell, 2007). Rezilyans enerjisi geri verilirken bu durum sac malzeme üzerinde malzemenin karakteristiğine ve mikro yapısına bağlı olarak ileri veya geri yaylanma şeklinde kendini göstermektedir.

Gerçekleştirilen deneylerde ilk grup olan ısı işlem uygulanmamış numuneler incelendiğinde mikro yapının, hadde sonrası uzayan ferrit ve perlit tanelerinden oluştuğu görülmektedir (Bkz. Resim 4.2). Hadde sonrası taneler arasında depolanan iç gerilmelerin ve bükme sonrası oluşan rezilyans enerjisinin, yük üzerinden kalktıktan sonra sac malzemede ileri yönde yaylanma olarak nüksetmiştir.

Deformasyon bölgesindeki çekme gerilmelerinin basma gerilmelerinden yüksek olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu ileri yaylanma değeri farklı bükme açıları ve hadde doğrultularında farklı değerlerde ortaya çıkmaktadır.

Deneyleerde ikinci grup sac numunelere uygulanan normalizasyon ısııl işleme neticesinde ferritik mikro yapının bozulmamasına karşın, hadde sonrası uzamış tanelerin toparlanması ve homojen bir yapıya dönüşmesi (Bkz. Resim 4.4) malzemenin ileri yönde olan yaylanmasını artırmıştır. Isıl işlem uygulanmayan numunelerde görülen hadde sonrası uzamış taneler (Bkz. Resim 4.2) yaylanma miktarını sınırlarken normalizasyon ısııl işlemi görmüş numunelerdeki küresel homojen taneler (Bkz. Resim 4.4) bükme sonrası daha fazla rezilyans enerjisi biriktirdiği ve yük üzerinden kalktıktan sonra daha fazla ileri yaylanma yaptığı; ayrıca bu tanelerin deformasyona bağlı taneler arası bantlaşmaya daha meyilli olduğu ve bunun ileri yönde olan yaylanma miktarını artırdığı tespit edilmiştir.

Bunun dışında normalizasyon ısııl işlemi sonrası serbest kalan karbon atomlarının tane sınırlarına ve ferritik matrise difüze olması ve ardından gerçekleştirilen durgun havada su verme ile buldukları yerde donmaları neticesinde artan sertlik (Bkz. Çizelge 4.10) ve düşen süneklik de yaylanma üzerinde etkili olmuştur. Artan sertlik ile ileri yaylanma miktarında da bir miktar artış gözlemlenmiştir.

Hem normalizasyon hem de menevişleme ısııl işlemi uygulanan üçüncü grup deney numunelerinin tamamında ise geri yaylanma tespit edilmiştir. Normalizasyon ısııl işlemi sonrası homojen ve küresel tane yapısına (Bkz. Resim 4.4) kavuşan ve sertliklerinde artış gözlemlenen (Bkz. Çizelge 4.10) numuneler, menevişleme ısııl işlemi sonrası önceki mikro yapılarını korumuş (Bkz. Resim 4.7) buna karşın krom karbür taneciklerinin tekrar perlitik yapıya dönmeleri ile sertliklerinde düşüş görülmüştür (Bkz. Çizelge 4.15).

Bu malzemelerde deformasyon bölgesinin iç yüzeyinde oluşan basma gerilmeleri, dış yüzeydeki çekme gerilmelerinden büyük olmuş ve sonucunda geri yaylanma meydana gelmiştir. Bu gruptaki geri yaylanma miktarı, ısııl işlem görmemiş ve

normalizasyon ısı işlemine maruz bırakılmış numunelerdeki ileri yaylanma miktarlarından oran olarak daha az olduğu gözlemlenmiştir.

Sac malzeme içerisinde bükme esnasında biriken rezilyans enerjisi yük üzerinden kalktıktan sonra geri yaylanma olarak nüksetmiştir. Bu duruma malzemenin tane yapısının ve sertlik değerinin rol oynadığı düşünülmektedir. Normalizasyon ve menevişleme ısı işlemleri uygulanan numunelerin mikro yapısı, ısı işlemsizlerden farklı olarak homojen ve küresel tanelere sahiptir. Normalizasyon ısı işlemi görmüş malzemelerden farklı olarak ise yapısındaki karbür çökelmelerinin olmaması ve bunun neticesinde düşen sertlik ve artar süneklik miktarıdır.

Şekil 4.7'de sac numunelerin bükme açılara göre ileri ve geri yaylanma değerlerini gösteren grafik incelendiğinde 120 derece bükme açısında ortalama %1,27; 90 derece bükme açısında %0,82 ve 60 derece bükme açısında ise %0,52'lik bir yaylanmanın olduğu ve tüm bükme açılarında ortalama olarak numunelerin ileri yönde yaylanma yaptıkları görülmektedir. 120 derece bükülen numuneler en fazla, 60 derece bükülenler ise en az ileri yaylanma göstermiştir (Bkz. Şekil 4.8). Bu durumun sac malzemenin maruz kaldığı plastik deformasyon miktarıyla ilgili olduğu düşünülmektedir.

120 derece bükülen numuneler plastik deformasyona daha fazla maruz kalmakta dolayısıyla daha fazla rezilyans enerjisi depolamaktadır. Yük üzerlerinden kalktıktan sonra ise bu enerjiyi geri vermekte ve ileri yönde yaylanma gerçekleşmektedir.

Örneğin; 120 derecelik bükme sonrası ölçülen açının  $125^{\circ}$  olması durumunda elde edilen ileri yaylanmanın değeri %4,16 olurken, 60 derecelik bükme sonrası ölçülen açının  $65^{\circ}$  olması durumunda elde edilen ileri yaylanmanın değeri %7,69 olmaktadır. Bu iki durumda gerçekleşen 5 derecelik ileri yaylanma değeri aynı şeyi ifade etmemektedir.

Sac malzemelerin V-bükme işlemlerinde gerçekleşen yaylanma miktarı artan deformasyonla doğru orantılı olarak değişmektedir. Bükme sonrası elde edilecek

geometrinin arzu edilenden farklı olması durumu büyük bükme açılarının kullanıldığı bükme işlemlerinde kaçınılmazdır. Yaylanma miktarlarının istenilen en az düzeyde tutulması ve ideal bükme açısının elde edilmesi için sac parçalara yaylanma miktarıyla orantılı olarak aşırı bükme işlemi uygulanabilir. Böylece arzu edilmeyen bükme açıları telafi edilebilir.

Şekil 4.9'da sac numunelerin hadde doğrultularına göre ileri ve geri yaylanma değerlerini gösteren grafik incelendiğinde 90° hadde doğrultusunda ortalama %1,7'lik ve 45° hadde doğrultusunda ortalama %0,92'lik bir ileri yaylanma değeri kaydedilirken, 0° hadde doğrultusunda ise %0,02'lik bir geri yaylanmanın olduğu görülmektedir.

90° hadde doğrultusunda taneler bükme düzlemine paralel doğrultuda uzamıştır. Uzayan taneler yapıyı anizotropik hale getirmekte ve oluşan dislokasyonlar sonucu yapıya sertlik kazandırmaktadır. Haddeye paralel doğrultuda yapılan bükme işlemlerinde ileri yaylanmanın daha fazla ortaya çıkmasındaki en önemli etken bükme sonrası malzeme üzerinde tane yönelmesinden kaynaklanan mikro çatlaklardır (Bkz. Şekil 2.12).

Oluşan çatlamlar ve deformasyon sonucu yapıda biriken rezilyans enerjisi sebebiyle numuneler ileri yönde yaylanma gerçekleştirmekte ve tekrar toparlanma gerçekleştirememektedir.

0° hadde doğrultusunda yapılan bükme işlemlerinde geri yaylanmanın meydana gelmesindeki etken ise yine tane yönelmesidir. Hadde doğrultusuna dik yönelen taneler bükme işlemi sonrası malzemeye yay özelliği kazandırmakta ve böylece sac metal bir miktar geri yönde yaylanma gerçekleştirmektedir. Ayrıca mikro yapıda çatlamların daha az olması bu durumu desteklemektedir (Bkz. Şekil 2.12). Geri yaylanma değerinin haddeye paralel doğrultuda yapılan bükme göre daha düşük çıkmasındaki sebebin yine çatlak oluşumunun gerçekleşmemesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Zira yapıdaki bu çatlaklar sacın yay özelliğini büyük oranda yitirmesine neden olmaktadır.

45° hadde doğrultusunda yapılan bükmelerden elde edilen değerler ise bu iki durumun ortalaması gibidir. Tane yönelmesinden kaynaklanan mikro çatlakların burada da etkili olduğu düşünülmele beraber, tanelerin hala yay özelliğini koruduğu bu yüzden ileri yaylanma miktarının sınırlı kaldığı ve 90° hadde doğrultusuna göre daha az oranda yaylanmanın gerçekleştiği savunulabilir.

Sonuçlar incelendiğinde 0° hadde doğrultusunda yapılan bükme işleminin ortalama olarak yaylanma miktarını önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Gerek mikro çatlakların önlenmesi gerekse malzemenin mekanik özelliklerinin korunumu için V-bükme işlemlerinde 0° hadde doğrultusuna dik bükme yöntemi tercih edilmelidir. Burada dikkat edilmesi gereken hadde doğrultusuna dik bükmenin, sac plakadan hadde doğrultusuna paralel 0° kesim ile elde edilen sac numunelere uygulandığıdır.

Şekil 4.10'da sac numunelerin zımba bekleme süresine göre ileri ve geri yaylanma değerlerini gösteren grafik incelendiğinde zımbanın bükme sonrası sac metal malzeme üzerinde beklemeden doğrudan kalktığı durumların ortalama değeri %3,03 çıkarken, 30 saniye bekledikten sonra kalktığı durumların ortalama değeri ise %2,18 olmaktadır.

Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.5 incelendiğinde tüm parametrelerde zımbanın bükme sonrası sac metal malzeme üzerinde beklemesinin ileri ve geri yaylanmayı azalttığı görülmektedir. İleri yaylanmanın olduğu durumlarda pozitif değerler azalmakta iken, geri yaylanmanın olduğu durumlarda ise negatif değerler artarak sıfıra yaklaşmaktadır.

İleri ve geri yaylanma değerlerindeki bu azalmanın, zımbanın sac malzemenin deformasyon bölgesinde beklemesi ve sıkıştırma kuvveti oluşturması neticesinde mikro yapı içindeki kayma düzlemlerini harekete geçirmesinden ve sacın iç bölgesinde meydana gelen basma ve dış bölgesinde meydana gelen çekme gerilmeleri arasındaki farkı azaltmasından kaynaklandığı düşünülmelektedir.

Zımbanın sac malzeme üzerinde bükme sonrası belirli bir süre kadar bekletilmesi ileri ve geri yaylanma miktarını azaltarak istenilen geometrinin elde edilmesine pozitif katkı sağladığından dolayı V-bükme ile sac şekillendirme işlemlerinde tercih edilmelidir. Bekleme süresinin artırılmasıyla yaylanma miktarının daha da azalacağı düşünülmektedir. Ancak zımbanın malzeme üzerinde bekletilmesi yaylanmayı azaltmasına rağmen, bükme zamanını arttırdığından, üretim maliyetlerinin de artması söz konusudur. Bu nedenle uygulaması yapılırken tüm koşullar göz önünde bulundurulmalıdır.

Elde edilen sonuçlarda dikkat geçen bir başka nokta ise belirli parametrelerde arzu edilen açı ile bükme işlemi sonrası elde edilen açının aynı olması yani sac malzemelerin herhangi bir yaylanma eğilimi göstermemesidir. Şekil 4.2 incelendiğinde ısıtma işlemi uygulanmamış  $0^{\circ}$  hadde doğrultusunda  $90^{\circ}$  bükme işlemi gerçekleştirilen sac malzemelerin, zımbanın sac malzeme üzerinde hem 30 saniye kadar bekletilip hem de bekletilmemesi durumuna göre %0 oranında yaylanma gösterdiği görülmektedir. Yine Şekil 4.4'te normalizasyon ısıtma işlemi uygulanan  $0^{\circ}$  hadde doğrultusunda  $90^{\circ}$  ve  $60^{\circ}$  bükme işlemi gerçekleştirilen sac malzemelerin, zımbanın sac malzeme üzerinde 30 saniye kadar bekletilmesi durumuna göre %0 oranında yaylanma gösterdiği görülmektedir.

Burada arzu edilen geometrilerin elde edilmesinde sac malzemelerin  $0^{\circ}$  hadde doğrultusunda bükülmeleri ve zımbanın sac malzeme üzerinde 30 saniye kadar beklemesi en etkili parametreler olmuştur. Ancak V-bükme ile imal edilecek parçaların geometrileri ve kullanım alanlarına göre maruz bırakılacakları ısıtma işlem durumları farklılık göstereceği için  $90^{\circ}$  ve  $60^{\circ}$  bükme açılarında elde edilen bu değerlere her zaman ulaşamayabilir. Bu durumda arzu edilen değerler için farklı telafi yöntemleri uygulanmalıdır.

Verilen tüm grafikler incelendiğinde aslında ileri ve geri yaylanmanın ters mantıklı olduğu, belirli parametrelerde ileri yaylanma gösteren bir malzemenin geri yaylanmaya meylinin düşük, geri yaylanma gösteren bir malzemenin ise ileri yaylanmaya meylinin daha düşük olduğunu görülmektedir.

AISI 430 ferritik paslanmaz çelik malzemenin farklı parametreler altında gerçekleştirilen V dip bükme işlemleri sonucu elde edilen ileri ve geri yaylanma değerlerini incelemek için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Uygulanan ısıtma işlemi, hadde doğrultusu, bükme açısı ve zımbanın sac malzeme üzerinde bekletilmesi gibi farklı parametrelerin bükme sonrası gerçekleşen ileri ve geri yaylanma miktarlarını önemli oranda etkilediği tespit edilmiştir.
2. Normalizasyon ısıtma işlemi uygulanan numunelerde hadde sonrası gerçekleşen tane yönelmesinin giderilip küresel ve homojen taneler elde edildiği ancak durgun havada su verme sonrası tane sınırlarında ve ferritik matriste çökelen krom karbür tanelerinin yapıda donduğu ve sertliği artırdığı gözlemlenmiştir.
3. Normalizasyon ısıtma işlemi ve durgun havada su verme ardından uygulanan menevişleme ısıtma işlemi neticesinde ferritik yapının aynen korunduğu ancak yapıda difüze olan krom karbürlerin tekrar perlitik yapıya dönmeleri ile sertlikte azalma meydana geldiği görülmüştür.
4. Normalizasyon ısıtma işlemi uygulanan numunelerde ileri yaylanmanın ısıtma işlemi görmemiş numunelere göre daha fazla olduğu, buna karşın hem normalizasyon hem de menevişleme ısıtma işlemine maruz kalan numunelerin geri yönde yaylanma yaptığı tespit edilmiştir.
5. 90° hadde doğrultusunda yapılan bükme deneylerinde malzemelerin ileri yönde esnediği, 0° hadde doğrultusunda yapılan bükme deneylerinde ise malzemelerin geri yönde esnediği tespit edilmiştir. 45° hadde doğrultusunda ise ileri yaylanma gerçekleşmekle beraber 90° hadde doğrultusuna göre daha azdır.

6. Tüm bükme açılarında malzemelerin ortalama olarak ileri yönde esnediği tespit edilmesine ek olarak en fazla ileri yaylanmanın 120° bükme açısında, en az ileri yaylanmanın ise 60° bükme açısında gerçekleştiği görülmüştür.
7. İleri ve geri yaylanmanın ters mantık ile yürüdüğü, ileri yaylanma gösteren bir malzeme geri yaylanmaya daha az meyilli iken geri yaylanma gösteren bir malzemenin ileri yaylanmaya daha az meyilli olduğu düşünülmektedir.

Elde edilen sonuçlar ışığında, bundan sonra yapılacak çalışmalar için öneriler aşağıda verilmiştir.

1. Farklı ısı işleme durumları için aynı malzeme üzerinde farklı veya aynı parametreler ile bükme deneyleri yapılabilir.
2. Farklı veya daha fazla bükme açısı ile bükme deneyleri yapılarak aradaki boşluklar doldurulabilir ve bir tablo elde edilebilir.
3. Bekleme süresi artırılarak bunun ileri ve geri yaylanma üzerine olan etkisi araştırılabilir.
4. Farklı bir çelik türü ile yapılan aynı bükme deneyleri sonrası çıkan sonuçlar değerlendirilip karşılaştırılabilir.
5. Farklı özelliklerdeki sac malzemeler üzerinde farklı parametreler ile yapılan bükme deneyleri sonlu elemanlar analizi yöntemi ile desteklenip yorumlanabilir.



## KAYNAKLAR

- Anonim, 2006. Megep, Makine Teknolojisi, Bükme Kalıpları, M.E.B., Ankara, 3-40
- Anonim, 2009. Sheet Metal Forming, <http://www.custompartnet.com/wu/sheet-metal-forming> (10.02.2018)
- Anonim, 2010. Çeliğe Alaşım Elementlerinin Etkileri <http://www.turkercecik.com/en/default.asp?turker=aece&pg2=Ala%FE%25> (03.12.2017)
- Anonim, 2012, Yeniden kristalleşme, <http://www.bodycote.com/tr-TR/services/heat-treatment/annealing-normalising/recrystallisation.aspx> (10.12.2017)
- Anonim, 2013. Fe-C Faz Diyagramı ve Özellikleri, <https://furkanozkan92.wordpress.com/2013/03/12/fe-c-faz-diyagrami-ve-ozellikleri/> (10.12.2017)
- Anonim, 2015. Alaşım Elementlerinin Çeliklere Etkileri, <http://www.atacelik.com/etkileri.html> (03.12.2017)
- Anık, S., Anık, E.S., Vural, M., 1993. 1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı, Cilt 1, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Aran, A., 2003. Paslanmaz Çelik Üretimi Kullanımı Standartları, 3. Baskı, Sarıtaş Teknik Yayın, İstanbul.
- Aran, A., Temel, M. A., 2004. Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller, Sarıtaş Teknik Yayın, İstanbul, 86 s.
- Arslan, B., 2007. Geri Esnemenin Sac Parçaların Biçim Tamlığı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi Ve Sonlu Elemanlar Yöntemi Uygulamaları İle Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 45-55.
- Aydın, T., 2002. Paslanmaz Çeliklerin MIG Kaynağında Kullanılan Gazlar ve Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul, 1, 5-86.
- Bakhshi, J., Rahmani, B., Daezade, V., Gorji, A., 2008. The study of springback of CK67 steel sheet in V-die and U-die bending processes, Faculty of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Materials and Design, Iran, 1-10.
- Bond, A. P., 1969. Mechanisms of intergranular corrosion in ferritic stainless steels, Transactions Of AIME, V. 245 (8), 2127-2134.

- Callister, W.D., 2003. *Materials Science and Engineering An Introduction*, John Wiley & Sons Inc., 111 River Street, Hoboken, New Jersey.
- Castro, R., Tricot, R., 1962. Etudes des transformations isothermes dans les aciers inoxydables semi-ferritiques a 17% de chrome, *Memories Scientifiques De La Revue De Metallurgie*, Part 1, (59), 571-586; Part 2, (59), 587-596.
- Castro, R.J., De Cadenet, J.J., 1974. *Welding metallurgy of stainless steel and heatresisting steels*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Can, A.Ç., 2010. *Tasarımcı Mühendisler İçin Malzeme Bilgisi*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 8-231.
- 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.
- 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 MaterialsProcessing Technology*, 148, 15-24.
- Chen, P., Koç, M., 2007. Simulation of Springback Variation in Forming of Advanced High Strength Steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 190, 189-198.
- Çalgılı, U., 2009. AISI 304-430 Paslanmaz-AISI 1010 Çelik Çiftlerinin Lazer Yöntemi ile Kaynağında Birleşme Özelliklerinin İncelenmesi, *Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ*.
- Çapan, L., 1999. *Metallere Plastik Şekil Verme*, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, 13-90.
- Çelik, E., 2006. Martenzitik Paslanmaz Çelik Ve Ferritik Paslanmaz Çeliğin Kendileriyle ve Birbirleriyle Sürtünme Karıştırma Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 3-5.
- Çiftçi, İ., 2005. Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesici takım kaplamasının ve kesme hızının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20 (2), 205-209.
- Dallas, J., 2003. *Thermal Analysis Techniques*, ASM Handbook Online, 21, 973-976.
- Demo, J. J., 1977. Structure and constitution of wrought ferritic stainless steels, *InHandbook Of Stainless Steels*, D. Peckner And I. M. Bernstein, Eds., McGraw-Hill, Newyork.

- Dongye, F., Hodgson, P., 2006. Experimental and Numerical Studies of Springback in Air VBending Process for Cold Rolled TRIP Steels, Nuclear Engineering and Design, Article In Press, 236 (18), 1847-1851.
- Erişkin, Y., 1986. Uygulamalı Sac Metal Kalıp Konstrüksiyonu, Gazi Üniversitesi Eğitim Fakültesi Yayınları, Ankara, 73-126.
- Folkhard, E., Verlag, S., 1987. Welding Metallurgy of Stainless Steels, New York, (1), 8, 76-78.
- Gan, W., Wagoner, R. H., 2004. Die design method for sheet springback, International Journal of Mechanical Sciences, 46, 1097-1113.
- 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.
- Groover, M. P., 2007. Fundamentals of Modern Manufacturing Shearing And Bending, John Wiley and Sons, USA, 17-20.
- Gooch, T., 1992. Welding behaviour and weldability of superaustenitic stainless steels, 8th Annual North American Welding Research Conference, TWI, Cambridge UK, 1-3.
- Gürü, M. ve Yalçın, H., 2012. Malzeme Bilgisi 3. Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara, 175-190.
- Gültekin, N., 1985. Kaynak Tekniği, Yıldız Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 2-27. Gural, A., 2010. Isıl İşlem Ders Notları, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Ankara, 3-30.
- Hayden, H.W., Flooren, S., 1950. The influence of martensite and ferrite on the properties of two-phase stainless steels having microduplex microstructures, Metallurgical Transactions, V. 1, 1955-1959.
- Hosford, W., Caddell, R.M., 2007. Metal Forming (Third Edition), Cambridge University Press, United States of America, 17-40.
- Işıқтаş, A., 2011. Farklı Kalınlıklardaki DKP ve Paslanmaz Sacların Farklı Açılarda Yapılan V-Bükme İşlemindeki Geri Yaylanmalarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, 50-57.
- Köse, S., Sakin, R., 2010. AISI-1040 ve AISI -P20 Çeliklerde Alaşım Oranları ve Mikro Yapının Sertleşme Kapiliyetine Etkisi, Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir, 170-182.
- Kuş, R., 2007. Düşük Karbonlu Çelik Tel Takviyeli Kır Dökme Demir Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, 30-40.

- Lange, K., 1985. Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill, New York, USA, 29-36.
- Livatyalı, H., Altan, T., 2001. Prediction and Elimination of Springback in Straight Flanging using Computer Aided Design Methods. Journal of Materials, Processing Technology, 117, 262-268.
- Kaluç, E., Tülbentçi K., 1995. Paslanmaz Çelikler ve Kaynaklanabilirliği, Kaynak Teknolojisi Araştırma Eğitim ve Uygulama Merkezi, Kocaeli Üniversitesi, 239 s.
- Kazan, R., Fırat, M., Tiryaki, A. E., 2009. Prediction of springback in wipe-die bending process of sheet metal using neural network, Materials and Design, 30, 418-423.
- Kayalı, E. S., Ensari, C., 2000. Metallerde Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Korkut, M.H., 1997. Ferritik paslanmaz çeliklerin mikroyapısı ve aşınması üzerine karbür yapıcı elementlerin etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Krysiak, K F., Grubb, J.F., Campbell, R.D., 1993. Selection of wrought ferritic stainless steels, ASM Metals Handbook, (6), 443-454.
- Krauss, G., 2005. Steels, ASM International, Materials Park, Ohio.
- Marcincowski, M.J., Fisher, R.M., Szirmae, A., 1964. Effect of 500 °C aging on the deformation behavior of an iron-chromium alloy, Trans. AIME, V. 230, 676-689.
- Mohandas, T., Ridley, G.M., Naveed, M., 1999. A comparative evaluation of gastungsten and shield metal arc welds of a ferritic stainless steel, Journal Of Materials Processing Technology, (94), 133-140.
- Nichol, T.J., Davis, J.A., 1978. Intergranular corrosion testing and sensitization of two highchromium ferritic stainless steels, in intergranular corrosion of stainless alloys, ASTM STP 656, R. F. Steigerwald, Ed., American Society For Testing And Materials, West Conshohocken, PA, pp. 179-196.
- Noble, D. N., 1993. Selection of wrought duplex stainless steels, ASM Metals Handbook, 6, 471-479.
- Novikov, I. I., 2012. Metallerin Isıl İşlem Teorisi, Nobel Yayıncılık, Ankara, 20-264.
- Odabaş, C., 1998. Östenitik Çeliklerin Genel Özellikleri, Metal ve Kaynak, (87), 60-65.
- Odabaş, C., 2004. Paslanmaz Çelikler, Askaynak Yayını, İstanbul, 1, 13-14.

- Osmanoğlu, T., 2012. AISI 304 ve 430 Kalite Paslanmaz eliklerin Mikroyapılarına Mekanik zelliklerine ve Korozyon Davranışlarına Soğuk Deformasyonun Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- t, R., 2012. V Bükme Kalıplarında Alüminyum Alaşımlı Sacların Şekillendirilmesi ve Geri Esneme Miktarlarının Tespiti, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- zatalbař, Y., 2008. Mekanik Metalurji-II Ders Notları, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Ankara, 31-35.
- zdamar K., 1999. Paket Programları ile İstatistiksel Veri Analizi (2. Baskı), Kaan Kitabevi, Eskiřehir, 200-265.
- zdemir, M., 2015. 1.5415 (16Mo3) Sac Malzemelerin Geri-İleri Esneme Miktarı ve Deformasyon İlişkisinin Deneysel ve Matematiksel Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- zdemir, M., Dilipak, H., Gkmeře, H. ve Yılmaz, V., 2014. Farklı Isıl İşlemlerin 16Mo3 (1.5415) Sac Malzemenin İleri-Geri Esneme Miktarına Etkisinin Deneysel ve Mikroyapısal Olarak İncelenmesi, Uluslararası Mühendislik ve Bilim Alanında Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, 148-155.
- zdemir, M., 2011. The Experimental Investigation of Spring-back of S235JR Sheet Metals within Bending Die, Yüksek Lisans Tezi, Institute of Science and Technology, Gazi University, Ankara, 60-75.
- zdemir, A., 2010. Sac Metal rnlerde Geri Esneme Miktarının Deneysel ve Sonlu Elemanlarla Tespiti Yapay Sınır Ağlarıyla Tahmini, Yüksek Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Rajan, T.V., Sharma, C.P. and Sharma, A., 2012. Heat treatment Principles and Techniques (Second Edition), PHI Learning Private Limited, Sonapat, 49-80.
- Salman S., Glsoy, ., 2004. Metalografi Bilimi, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 83 s.
- Şahin ., 2013. Sac Levhaların V Bkme Sonucu Geri Yaylanma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Schey, J. E., 1987. Introduction to Manufacturing Processes, McGraw-Hill, New York, 13-18.
- 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.

- Smith, J. J. and Farrar, R. A., 1993. Influence of microstructure and composition on mechanical properties of some AISI series weld metals, *International Materials Reviews*, (38), 1.
- Smith, W.F., 2000. Paslanmaz çelikler, Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri, Bölüm 5, Cilt 1., Çeviri: Erdoğan, M., Ankara, 169-214.
- Suchy, I., 2006. *Handbook of Die Design* 2nd Ed., McGraw-Hill Book Company, USA, 86-88.
- Tekarslan Ö., Şeker, U., Gerger, N., 2006. Bükme Kalıplarında 0,75 Mm Kalınlığındaki Çelik Sac Malzemenin Geri Esneme Miktarlarının Belirlenmesi, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13 (1), 15-22.
- Teker, T., 2010. AISI 430/AISI 1040 Çelik Çiftinin Anahtar Deliği Plazma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 30 s.
- Tekiner, Z., 2004. An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending die, *Journal of Materials Processing Technology*, 45 (4), 109-117.
- Thipprakmas, S., 2011. Finite Element Analysis on The Coined-Bead Mechanism During The V Bending Process, *Materials and Design*, 32, 4909-4917.
- Topbaş, M.A., 1998. Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı. Prestij Yayıncılık, İstanbul, 28-80.
- Toros, S., Ece, E. R., Öztürk, F. ve Alkan, M., 2009. 5754-O Al-Mg Alaşımında Ön Gerilmenin Geri Esnemeye Etkisinin Deneysel Ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6 (3): 1-9.
- Uzun, İ., Erişkin, Y., 1997. Sac Metal Kalıpcılığı, *Milli Eğitim Yayınları*, Ankara, 253-286.
- Yenice, M., 2006. Bükme ile Şekillendirilen Saclarda Geri Yaylanma Davranışının İncelenmesi, *Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 26-31.
- Wang, J., Verma, S., Alexander, R., and Gau, J. T., 2008. Springback Control of Sheet Metal Air Bending Process, *Journal of Manufacturing Processes*, Article in Press, 10, 21-27.
- Williams, R.O., 1958. Further studies of the iron-chromium system, *Trans. AIME*, 212, 497.
- Woodhead, J.R., Wright, R.N., 1977. Fe-Cr-Mn micro-duplex ferritic martensitic stainless steels, *Metallurgical Transactions*, PA. 1977-2007.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ARSLAN, Sinan  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 14.09.1991 – Ankara  
Medeni hali : Bekâr  
Telefon : 0 (505) 802 98 98  
e-mail : [snrslnx@hotmail.com](mailto:snrslnx@hotmail.com)

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Hitit Üniversitesi Makine Müh. Bölümü	2014
Lise	Kırklareli Babaeski Anadolu Lisesi	2009

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016 - 2016	SMH Medikal Teknolojileri İmlt. San. ve Tic. Ltd. Şti.	Makine Müh.

### Yabancı Dil

İngilizce (YÖKDİL: 87,5)