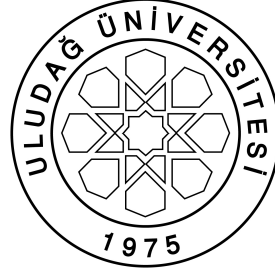


**YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİK SACLARIN  
YÜKSEK SICAKLIKTAKİ ŞEKİLLENDİRME  
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

**HANDE GÜLER**



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİK SACLARIN YÜKSEK SICAKLIKTAKİ  
ŞEKİLLENDİRME PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

**MAK. Y. MÜH. HANDE GÜLER**

Prof.Dr. Reşat ÖZCAN  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2013



## TEZ ONAYI

Hande GÜLER tarafından hazırlanan “Yüksek Mukavemetli Çelik Sacların Yüksek Sıcaklıktaki Şekillendirme Parametrelerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Reşat ÖZCAN

<b>Başkan :</b>	Prof. Dr. Reşat ÖZCAN Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği A.B.D.	İmza
<b>Üye :</b>	Prof. Dr. Ali BAYRAM Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği A.B.D.	İmza
<b>Üye :</b>	Prof. Dr. Recep EREN Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Tekstil Mühendisliği A.B.D.	İmza
<b>Üye :</b>	Doç. Dr. Ali DURMUŞ Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği A.B.D.	İmza
<b>Üye :</b>	Doç. Dr. Mustafa TOPARLI Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği A.B.D.	İmza

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**  
**Prof. Dr. Kadri ARSLAN**  
**Enstitü Müdürü**  
**../../....(Tarih)**

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**.././2013**

**Hande GÜLER**

## ÖZET

Doktora Tezi

### YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİK SAÇLARIN YÜKSEK SICAKLIKTAKİ ŞEKİLLENDİRME PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

**Hande GÜLER**

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Reşat ÖZCAN

Otomotiv endüstrisi, ürün ağırlığının azaltılması ve buna rağmen dayanımın değişmemesi veya artması konusuyla ilgili uzun yıllardan beri çalışmaktadır. Bu amaçla, farklı ürünlerin ve üretim yöntemlerinin araştırılması da kaçınılmaz olmuştur. Günümüzde ise, bor alaşımlı çelikler ve bu malzemelerin sıcak şekillendirilmesi işlemi, yurt dışında uygulanan önemli yöntemlerden biri olup bu konu hakkındaki araştırmalar hızla devam etmektedir. Şuan en yaygın olarak kullanılan sıcak şekillendirilebilir bor alaşımlı çelik ArcelorMittal firmasının ürettiği Usibor 1500 (22MnB5) dür. Bahsedilen malzeme ve sıcak şekillendirme yöntemiyle, çekme dayanımının yaklaşık olarak üç katına çıktığı görülmüştür. Ancak literatür araştırması yapıldığında, kullanılan sıcak şekillendirilebilir-bor alaşımlı malzemelerin serbest ağırlıklı düşürme (darbe), kırılma tokluğu ve yorulma deneyleri gibi çalışmalarının yeterli oranda bulunmadığı sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada, sıcak şekillendirilebilir bor alaşımlı çeliklerden ArcelorMittal firmasının ürettiği 1,7 mm kalınlıktaki Usibor 1500 ve Erdemir firmasının ürettiği 2,5 mm kalınlıktaki 30MnB5 malzemeleri kullanılmıştır. Öncelikle, bahsedilen malzemeler için optimum çekme dayanımının elde edileceği farklı soğuma ortamı, sıcaklık ve fırında bekletme süreleri kullanılarak çeşitli ısıl işlemler uygulanmış ve ayrıca uygulanan ısıl işlemler sonunda malzemedeki mikro yapı değişimleri ve sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın daha sonraki kısmında ise, optimum dayanımın elde edildiği parametrelerde, malzemelere ısıl işlemler uygulanarak serbest ağırlıklı düşürme, kırılma tokluğu ve yorulma deneyleri gerçekleştirilip, elde edilen sonuçlar malzemelerin ısıl işlem görmemiş halleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın son kısmında ise; Dynaform isimindeki sonlu elemanlar programı kullanılarak, malzemelerin sıcak şekillendirme simülasyonları yapılmıştır. Ancak, bu programda kullanılmak üzere, malzemelerin sıcak halde çekme deneyleri gerçekleştirilip elde edilen mekanik özellikler programa data olarak girilmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçların, taşıtların farklı bölgelerinde, farklı yükleme ve gerilmelere maruz kalan sıcak şekillendirilmiş bor alaşımlı parçaların dayanımları konusunda yardımcı olacağı düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Sıcak şekillendirme, Usibor 1500, 22MnB5, 30MnB5, Bor alaşımlı çelikler, Yüksek mukavemetli çelikler, Mekanik özellikler, Isıl işlem.

**2013, xiv+ 154 sayfa.**

## ABSTRACT

PhD Thesis

### INVESTIGATION OF FORMING PARAMETERS OF HIGH STRENGTH STEELS IN ELEVATED TEMPERATURES

**Hande GÜLER**

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. Reşat ÖZCAN

The automotive industry has been working on reducing the weight of the product and although remaining unchanged or increasing of strength for years. For this purpose, it was inevitable to examine the different products and production methods. Nowadays, the boron-alloyed steels and hot forming process of these materials are one of the important methods applied in abroad and research on this topic continues rapidly. Currently, the most widely used boron alloyed-hot formable steel is Usibor 1500 (22MnB5) produced by ArcelorMittal and the tensile strength is tripled approximately by mentioned material and the hot forming process. However, literature research was done about boron alloyed-hot formable steels; it was observed that there is not enough research about impact, fracture toughness, and fatigue tests of these materials.

In this study, Usibor 1500 steel with the thickness of 1,7 mm produced by ArcelorMittal and 30MnB5 steel with the thickness of 2,5 mm produced by Erdemir were used. Firstly, heat treatments were performed using different cooling media, temperature and holding time to acquire optimum tensile strength for the materials. In addition, the changes in microstructure and hardness of the materials were studied at the end of the heat treatments. In the next part of the study; impact, fracture toughness, and fatigue tests were performed after applying heat treatment in the parameters of optimum strength and the results obtained were compared with the as- delivered material.

In the last part of the study, hot stamping simulations were carried out using finite element program named Dynaform. However, hot tensile tests performed and mechanical properties obtained from the tests were used as data for Dynaform.

The obtained results from this study will lead further studies about the strength of the hot stamped boron products exposed to different loading and stresses in different parts of the vehicles.

**Key Words:** Hot stamping, Hot forming, Usibor 1500, 22MnB5, 30MnB5, Boron steels, High strength steels, Mechanical properties, Heat treatment.

**2013, xiv + 154 pages.**

## TEŞEKKÜR

Bana bu tez konusunda çalışma olanağı verip, her zaman ve her konuda destek olan, bilgi ve deneyimi ile çalışmalarımı yönlendiren değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Reşat ÖZCAN 'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmalarım sırasında benden hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen 2011/84 No' lu projede beraber çalıştığım Dr. Rukiye ERTAN' a gösterdiği yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamdaki deney cihazlarının 2011/84 No' lu proje kapsamında alınmasını destekleyen Uludağ Üniversitesi Rektörlüğü ve Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine ayrıca teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında, 2211- Yurt içi doktora burs programı kapsamında maddi desteğini esirgemeyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Numune temini ve kesimi esnasında bana yardımcı olan; BEYÇELİK firmasından Makine Mühendisi arkadaşım Korhan BENGÜR' e ve Sayın Makine Mühendisi Mücahit ARI' ya; ERMAKSAN firmasından Makine Mühendisi Rasim YALÇIN 'a; KURDOĞLU LAZER firmasından Mine ve Serkan KURDOĞLU' na; ALTINTEKNİK KALIP Ltd. Şti. firmasından, Murat ÖZ'e; KÖRÜSTAN BURSA SAC PRES SAN. TİC. firmasından Aytekin KOÇ'a; kimyasal analizlerin gerçekleştirilmesinde yardımcı olan DOĞRU DÖKÜM firmasından Serkan KEDİK' e ve ÇEMTAŞ firmasından İsmail İrfan AYHAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Serbest ağırlık düşürme deneyleri için; sayın hocalarım Prof. Dr. Onur SAYMAN' a, Doç. Dr. Bülent Murat İÇTEN' e, Yrd. Doç. Dr. Yusuf ARMAN' a ve değerli meslektaşım Araş. Gör. Volkan ARIKAN' a çok teşekkür ederim.

Tez esnasında karşılaştığım tüm sıkıntı ve problemleri aşmamda yardımcı olan ve bana büyük sabır gösteren sevgili annem Tevhide GÜLER ve sevgili babam Remzi GÜLER ' e en içten sevgi ve teşekkürlerimi sunarım ve ayrıca; Babam Remzi GÜLER' e teknik yardımlarından dolayı ve annem Tevhide GÜLER' in gösterdiği özveriden dolayı kendilerine çok teşekkür eder ve bu çalışmayı kendilerine adarım.

Hande GÜLER  
.../.../2013

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	4
2.1. Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Çelikler .....	4
2.1.1. Çok yüksek dayanımlı çelikler (UHSS): Ultra yüksek dayanımlı çelikler .....	5
2.2. Sacların Şekillendirilebilirliğini Etkileyen Özellikler .....	7
2.2.1. Uzama .....	8
2.2.2. Akma Uzaması .....	8
2.2.3. Anizotropi .....	10
2.2.4. Tane Büyüklüğü .....	10
2.2.5. Artık Gerilmeler .....	10
2.2.6. Geri Yaylanma .....	10
2.2.7. Buruşma .....	11
2.2.8. Kaplanmış Levha .....	11
2.3. Sac Şekillendirme İşlemleri .....	11
2.3.1. Kesme İşlemi .....	11
2.3.2. Bükme İşlemi .....	14
2.3.3. Gerdirme ( Gerdirmeli sıvama) İşlemi.....	16
2.3.4. Hidrolik Şekillendirme.....	16
2.3.5. Dönerli Sıvama (Spinning) İşlemi.....	18
2.3.6. Patlayıcı ile Şekillendirme İşlemi.....	19
2.3.7. Elektrohidrolik Şekillendirme İşlemi .....	20
2.3.8. Manyetik Sinyalle Şekillendirme İşlemi.....	21
2.3.9. Derin Çekme İşlemi.....	22
2.3. Sıcak Sac Şekillendirme İşlemi .....	23

2.3.1.	Sıcak sac şekillendirme yöntemleri .....	25
2.4.	22MnB5 (Usibor 1500) Çelik Malzeme .....	29
2.4.1.	22MnB5 (Usibor 1500) çelik malzeme ile ilgili yapılan çalışmalar .....	32
2.5.	30MnB5 Çelik Malzeme .....	48
2.5.1.	30MnB5 çelik malzeme ile ilgili yapılmış çalışmalar .....	50
3.	MATERYAL VE YÖNTEM .....	51
3.1.	Materyal .....	51
3.1.1.	Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) çelik malzeme .....	51
3.1.2.	30MnB5 çelik malzeme .....	53
3.2.	Yöntem .....	54
3.2.1.	Gerçekleştirilen ısıt işlemler .....	54
3.2.2.	Numune hazırlama işlemleri .....	56
3.2.3.	Mikro yapı incelemeleri .....	58
3.2.4.	Vickers sertlik ölçümleri .....	59
3.2.5.	Çekme deneyleri .....	61
3.2.6.	Sıcak çekme işlemleri .....	63
3.2.7.	Darbe deneyleri .....	65
3.2.8.	Yorulma deneyleri .....	70
3.2.9.	Sonlu Elemanlar Yöntemi Çalışmaları .....	75
4.	BULGULAR .....	77
4.1.	Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) Malzeme ile ilgili Bulgular .....	77
4.1.1.	Isıl İşlemler .....	77
4.1.2.	Sıcak Çekme Deneyleri .....	90
4.1.3.	Serbest Ağırlık Düşürme Deneyleri .....	93
4.1.4.	Charpy (Çentik darbe) Deneyleri .....	99
4.1.5.	Yorulma Deneyleri .....	101
4.1.6.	Sonlu Elemanlar Yöntemi Çalışmaları .....	104
4.2.	30MnB5 malzeme ile ilgili bulgular .....	108
4.2.1.	Isıl İşlemler .....	108
4.2.2.	Sıcak Çekme Deneyleri .....	123
4.2.3.	Serbest Ağırlık Düşürme Deneyleri .....	125
4.2.4.	Charpy (Çentik darbe) Deneyleri .....	131

4.2.5. Yorulma Deneyleri .....	133
4.2.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi Çalışmaları .....	135
5. SONUÇ .....	139
KAYNAKLAR.....	146



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
Ac1	Östenit dönüşümünün başlangıç sıcaklığı
Ac3	Tamamen Östenite dönüşümün başladığı sıcaklığı
Al	Alüminyum
Ax	x yönündeki tepki kuvveti
Ay	y yönündeki tepki kuvveti
B	Beynit
B	Bor
C	Karbon
Cr	Krom
F	Ferrit
F	Kuvvet
Fe	Demir
h	Sarkacın ağırlık merkezinin düşme yüksekliği
h1	Sarkacın ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği
HV	Vickers sertliği
I	Atalet momenti
J	Joule
L	Kiriş boyu
L	Sarkacın ağırlık merkezinin sarkacın salınım merkezine uzaklığı
M	Martenzit
M	Tepki momenti
m	Vurucu kütleinin ağırlığı
Mn	Mangan
N	Newton
Ni	Nikel
Ö	Östenit
P	Fosfor
P	Perlit
P	Tekil yük
S	Kükürt
Si	Silisyum-Silikon
Ti	Titanyum
V	Vanadyum
$\alpha$	Düşme açısı
$\beta$	Yükseliş açısıdır
$\dot{\epsilon}$	Şekil değiştirme hızı [ $s^{-1}$ ]
$\epsilon$	Şekil değiştirme
$\sigma$	Gerilme [MPa]

$\mu$

Sürtünme katsayısı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
CP	Kompleks Fazlı
DP	Çift Fazlı
FEM	Finite Element Methods (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
FLD	Forming Limit Diagram (Şekillendirme Sınır Diyagramı)
GMAW	Gaz Altı Metal Ark Kaynağı
HSLA	Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli
HSS	Yüksek Dayanımlı Çelikler
HF	Sıcak Şekillendirme
LSE	Lazer Nokta Ekstensometre
LSS	Düşük Dayanımlı Çelikler
Mf	Martenzit Bitiş Sıcaklığı
MS	Martensitik
Ms	Martenzit Başlama Sıcaklığı
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SMAW	Örtülü Elektrotla Metal Ark Kaynağı
TCR	Thermal Contact Resistance (Isıl Yüzey Direnci)
TRIP	Dönüşüm Plastisite
UHSS	Çok Yüksek (Ultra Yüksek) Dayanımlı Çelikler
ZSD	Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2. 1. Endüstride kullanılan çeliklerin sınıflandırılması .....	5
Şekil 2. 2. Bir otomobil gövdesindeki çok yüksek mukavemetli çelikten üretilmiş parçalar .....	6
Şekil 2. 3. Çekme halinde akma uzaması ve Luders bantları .....	9
Şekil 2. 4. Kalıp ve zımba ile gerçekleştirilen kesme işleminin şematik gösterimi .....	12
Şekil 2. 5. Kapalı kesme işlemi .....	13
Şekil 2. 6. Uç kesme işlemi .....	14
Şekil 2. 7. Bükme operasyonları a) Serbest bükme b) Kenar bükme c) Çift etkili bükme d) Ezerek bükme e) Döndürerek bükme .....	15
Şekil 2. 8. Gerdirme (Gerdirmeli sıvama) işleminin şematik gösterimi .....	16
Şekil 2. 9. Hidrolik sac şekillendirme .....	17
Şekil 2. 10. Dönerli sıvama işleminin şematik gösterimi .....	19
Şekil 2. 11. Patlayıcı ile şekillendirme işleminin şematik gösterimi .....	20
Şekil 2. 12. Elektrohidrolik Şekillendirme İşleminin Şematik Gösterimi .....	20
Şekil 2. 13. Manyetik Sinyalle Şekillendirme İşlemi a) Manyetik sinyalle şekillendirme işleminin şematik gösterimi b) Manyetik sinyalle şekillendirme ile oluşturulan alüminyum tüp .....	22
Şekil 2. 14. Derin Çekme İşleminin Şematik Gösterimi .....	23
Şekil 2. 15. Sıcak şekillendirme işleminin şematik gösterimi .....	24
Şekil 2. 16. Doğrudan ve dolaylı şekillendirmenin karşılaştırılması .....	25
Şekil 2. 17. Bor Alaşımli Çelik için Doğrudan Sıcak Şekillendirme İşleminin Şematik Gösterimi .....	26
Şekil 2. 18. Fırında Isıtma İşleminin Şematik Gösterimi .....	27
Şekil 2. 19. Elektrikli Isıtma İşleminin Şematik Gösterimi .....	28
Şekil 2. 20. Dolaylı Sıcak Şekillendirme İşleminin Şematik Gösterimi .....	29
Şekil 2. 21. Usibor 1500 ana malzeme ve kaplamasının optik mikroskop görüntüleri ..	29
Şekil 2. 22. Şekillendirme öncesi optik mikroskop ile çekilmiş mikro yapı örnekleri a) 1 mm sac kalınlığındaki malzeme b) 2,8 mm sac kalınlığındaki malzeme .....	30
Şekil 2. 23. Sıcak şekillendirme işlemi uygulanmış malzemelerin optik mikroskop ve SEM görüntüleri a) 950°C'de 10 dk. bekletilen 1 mm. lik sacın optik mikroskop görüntüsü b) 950°C'de 10 dk. bekletilen 1 mm. lik sacın SEM görüntüsü .....	31
Şekil 2. 24. Farklı sıcaklık ve şekil değişimi hızlarında elde edilen örnek $\sigma$ - $\epsilon$ grafikleri, a) 600-700-800°C sıcaklıklarında ve 0.5 s <sup>-1</sup> çekme hızı için grafik b) 600°C'de ve 0.1-0.5-1 s <sup>-1</sup> çekme hızları için grafik .....	32
Şekil 2. 25. Yüksek mukavemetli çelikler için örnek bir termo-mekanik çekme testi sistemi .....	33
Şekil 2. 26. Yüksek mukavemetli çelikler için örnek bir termo-mekanik çekme testi sistemi .....	34
Şekil 2. 27. Sıcak şekillendirme simülasyonunda kullanılan örnek bir model .....	35

Şekil 2. 28. Sıcak şekillendirme simülasyonunda kullanılan örnek bir model .....	36
Şekil 2. 29. Sıcak şekillendirme işleminde kullanılan örnek bir takım ve sac malzemeden oluşan sistem .....	37
Şekil 2. 30. Sıcak şekillendirme işleminin örnek bir deneysel düzeneği.....	38
Şekil 2. 31. 22MnB5 Malzemenin ZSD diyagramı .....	39
Şekil 2. 32. Bor alaşımlı malzemenin termo-mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan Gleeble test simülatörü .....	40
Şekil 2. 33. Bor alaşımlı malzeme için kademeli ısı işlem .....	41
Şekil 2. 34. 22MnB5 çeliğinin sürtünme özelliklerini incelemek amacıyla kullanılan tribosimülatör .....	44
Şekil 2. 35. 22MnB5 malzemenin ısı transferi katsayılarının belirlendiği örnek deneysel düzenekler .....	46
Şekil 2. 36. 22MnB5 malzemenin rezistansla ısıtma ve kesme işlemlerinin gerçekleştirildiği örnek bir sistem .....	47
Şekil 2. 37. 30MnB5 çelik malzemenin ısı işlem öncesi mikro yapısı.....	49
Şekil 3.1. 22MnB5 ısı işlem görmemiş malzemenin mikro yapısı .....	48
Şekil 3. 2. 30MnB5 ısı işlem görmemiş malzemenin mikro yapısı.....	54
Şekil 3. 3. Isıl işlem fırını.....	55
Şekil 3.4. Lazer işaretlemeli infrared termometre .....	56
Şekil 3.5 a) Kesme cihazı, b) Bakalite alma cihazı, c) Otomatik parlatma cihazı .....	58
Şekil 3.6. Optik metal mikroskobu .....	59
Şekil 3. 7. Vickers sertlik deneyinde kullanılan ucun şematik gösterimi .....	60
Şekil 3.8. Malzeme yüzeyinde oluşturulan Vickers izleri.....	60
Şekil 3.9. Mikro vickers sertlik ölçüm cihazı.....	61
Şekil 3. 10. Çalışmada kullanılan çekme cihazı.....	62
Şekil 3.11. Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin çekme işleminde kullanılan numune boyutları.....	63
Şekil 3.12. 30MnB5 malzemenin çekme işleminde kullanılan numune boyutları.....	63
Şekil 3.13. a) İndüksiyon ısıtma sistemi alt kısım, b) İndüksiyon ısıtma sistemi üst kısım .....	64
Şekil 3. 14. Sıcak çekme işleminde kullanılan çekme numunesi boyutları .....	65
Şekil 3. 15. Serbest düşen ağırlık darbe cihazı iç gösterim.....	67
Şekil 3. 16. Ağırlık düşürme deneyi numune boyutları .....	68
Şekil 3.17. Darbe enerjisi hesabı için gerekli boyutlar .....	69
Şekil 3.18. Charpy vurma deneyi numune boyutları .....	69
Şekil 3 19. Çalışmada kullanılan çentik darbe ve çentik numune hazırlama cihazı.....	70
Şekil 3. 20. Yorulma deneyi gerçekleştirilen cihaz .....	71
Şekil 3.21. Yorulma deneyi gerçekleştirilen cihazda genlik (çökme) ayarı .....	72
Şekil 3.22. Yorulma deney düzeneği .....	73
Şekil 3.23. Yorulma deneyi numune boyutları.....	75
Şekil 3.24. Sıcak Şekillendirme işleminde kullanılan modeldeki elemanlar a) Zimba b)Dişi c) Sac d) Sac Tutucu c) Modelin Montaj Hali.....	76

Şekil 4. 1. Havada soğutulmuş numunelerin mikro yapı görüntüleri (1000x) a) 700°C, b) 750°C, c) 800°C, d) 850°C, e) 900°C ve f) 950°C. ....	81
Şekil 4. 2. 22MnB5 Malzemenin ZSD diyagramı (Naderi ve ark. 2008).....	82
Şekil 4. 3. Havada Soğutma Sonucu Elde Edilen Mikro-Vickers Sertlik Değerleri .....	83
Şekil 4.4. Havada Soğutma Sonucu Elde Edilen Çekme Mukavemeti Değerleri .....	84
Şekil 4. 5. Suda soğutulmuş numunelerin mikro yapı görüntüleri (1000x) (a) 700°C, (b) 750°C, (c) 800°C, (d) 850°C, (e) 900°C ve (f) 950°C.....	88
Şekil 4.6. Suda Soğutma Sonucu Elde Edilen Mikro-Vickers Sertlik Değerleri .....	89
Şekil 4.7. Suda Soğutma Sonucu Elde Edilen Çekme Mukavemeti Değerleri.....	90
Şekil 4.8. Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin gerçekleştirilen sıcak çekme deneylerine bir örnek .....	91
Şekil 4.9. Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin yüksek sıcaklıklardaki $\sigma$ - $\epsilon$ grafikleri.....	92
Şekil 4. 10.Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin ortalama akma ve çekme gerilmeleri değerleri.....	92
Şekil 4.11. Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin ısıtma işlem görmüş ve görmemiş durumları için temas kuvveti ve enerji değerleri karşılaştırması .....	93
Şekil 4. 12. Isıtma işlem görmemiş Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin kuvvet –deplasman grafiği .....	95
Şekil 4.13. Isıtma işlem görmüş Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin kuvvet –deplasman grafiği .....	95
Şekil 4. 14. Isıtma işlem görmemiş Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin enerji –zaman grafiği .....	96
Şekil 4. 15. Isıtma işlem görmüş Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin enerji –zaman grafiği .....	97
Şekil 4.16. Isıtma işlem görmemiş Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzeme için vurucunun hız –deplasman grafiği.....	98
Şekil 4. 17. Isıtma işlem görmüş Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzeme için vurucunun hız –deplasman grafiği.....	98
Şekil 4.18. Çentik darbe işlemi uygulanan (a) ısıtma işlem görmemiş (b) ısıtma işlem görmüş Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) numuneler .....	99
Şekil 4. 19. Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin ısıtma işlem görmüş ve görmemiş durumları için kırılma enerjisi değerlerinin karşılaştırması.....	100
Şekil 4. 20. Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin ısıtma işlem görmemiş durumu için Wöhler eğrisi ( $\sigma$ -N).....	103
Şekil 4. 21. Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin ısıtma işlem görmüş durumu için Wöhler eğrisi ( $\sigma$ -N).....	103
Şekil 4. 22.Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin (a) Sıcak şekillendirme sonucu (b) Soğuk şekillendirme sonucu FLD diyagramı.....	105
Şekil 4.23. Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin (a) Sıcak şekillendirme sonucu (b) Soğuk şekillendirme sonucu kalınlık azalması dağılımı .....	106

Şekil 4. 24. Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin (a) Sıcak şekillendirme sonucu (b) Soğuk şekillendirme sonucu gerilme dağılımı .....	107
Şekil 4.25. 850°C de a) 5 dk b) 15 dk. c) 30 dk. tutma sürelerinde havada soğutma sonucunda elde edilen iç yapı resimleri .....	111
Şekil 4.26. 850 °C de a) 5 dk b) 15 dk. c) 30 dk. tutma sürelerinde havada soğutma sonucunda oluşturulan ZSD diyagramları.....	113
Şekil 4.27. 850°C de 5 -15 ve 30 dk. tutma sürelerinde havada soğutma sonucunda elde edilen çekme mukavemeti değerleri .....	113
Şekil 4.28. 850°C de 5 -15 ve 30 dk. tutma sürelerinde havada soğutma sonucunda elde edilen sertlik değerleri.....	114
Şekil 4.29. 850°C de a) 5 dk b) 15 dk. c) 30 dk. tutma sürelerinde suda soğutma sonucunda elde edilen iç yapı resimleri .....	116
Şekil 4.30. 850 °C de 5 -15 ve 30 dk. tutma sürelerinde suda soğutma sonucunda elde edilen sertlik ve çekme mukavemeti değerleri .....	116
Şekil 4.31. (a) 800°C, (b) 825°C (c) 840°C (d) 850°C de 15 dk. bekletme ve suda soğutma sonucunda elde edilen iç yapı resimleri .....	119
Şekil 4.32. 800°C, 825°C, 840°C, 850°C de 15 dk. bekletme ve suda soğutma sonucunda elde edilen sertlik ve çekme mukavemeti değerleri.....	119
Şekil 4.33. 850°, 860°C, 875°C ve 900°C de 15 dk. bekletme ve suda soğutma sonucunda elde edilen sertlik ve çekme mukavemeti değerleri .....	121
Şekil 4.34. (a) 860°C, (b) 875°C (c) 900°C de 15 dk. bekletme ve suda soğutma sonucunda elde edilen iç yapı resimleri .....	122
Şekil 4.35. 30MnB5 malzemenin gerçekleştirilen sıcak çekme deneylerine bir örnek. 123	123
Şekil 4.36. 30MnB5 malzemenin yüksek sıcaklıklardaki $\sigma$ - $\epsilon$ grafikleri .....	124
Şekil 4.37. Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin ortalama akma ve çekme gerilmeleri değerleri.....	125
Şekil 4.38. 30MnB5 malzemenin ısıtma işlem görmüş ve görmemiş durumları için temas kuvveti ve enerji değerleri karşılaştırması .....	126
Şekil 4.39. Isıtma işlem görmemiş 30MnB5 malzemenin kuvvet –deplasman grafiği.....	127
Şekil 4.40. Isıtma işlem görmüş 30MnB5 malzemenin kuvvet –deplasman grafiği.....	128
Şekil 4.41. Isıtma işlem görmemiş 30MnB5 malzemenin enerji –zaman grafiği.....	128
Şekil 4.42. Isıtma işlem görmüş 30MnB5 malzemenin enerji –zaman grafiği.....	129
Şekil 4.43. Isıtma işlem görmemiş 30MnB5 malzeme için vurucunun hız –deplasman grafiği.....	130
Şekil 4.44. Isıtma işlem görmüş 30MnB5 malzeme için vurucunun hız –deplasman grafiği .....	130
Şekil 4.45. Çentik darbe işlemi uygulanan (a) ısıtma işlem görmemiş (b) ısıtma işlem görmüş 30MnB5 numuneler .....	131
Şekil 4.46. 30MnB5 malzemenin ısıtma işlem görmüş ve görmemiş durumları için kırılma enerjisi değerlerinin karşılaştırması.....	132
Şekil 4.47. 30MnB5 malzemenin ısıtma işlem görmemiş durumu için Wöhler eğrisi .....	134
Şekil 4.48. 30MnB5 malzemenin ısıtma işlem görmüş durumu için Wöhler eğrisi .....	135

Şekil 4.49.30MnB5 malzemenin a) Sıcak şekillendirme sonucu (b) Soğuk şekillendirme sonucu FLD diyagramı.....	136
Şekil 4.50. 30MnB5 malzemenin şekillendirme (a) Sıcak şekillendirme sonucu (b) Soğuk şekillendirme sonucu kalınlık azalması dağılımı.....	137
Şekil 4.51.30MnB5 malzemenin şekillendirme (a) Sıcak şekillendirme sonucu (b) Soğuk şekillendirme sonucu gerilme dağılımı.....	138
Şekil 5.1. Havada soğutma işlemiyle elde edilen optimum çekme dayanımı değerleri.....	140
Şekil 5. 2. Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin suda ve havada soğutma sonucu elde edilen çekme dayanımı değerleri.....	141
Şekil 5. 3. 30MnB5 malzemenin suda ve havada soğutma sonucu elde edilen çekme dayanımı değerleri .....	142

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. Usibor 1500 malzemenin ve kaplamanın kimyasal kompozisyonu(%) .....	31
Çizelge 2.2. 30MnB5 malzemenin kimyasal kompozisyonu.....	49
Çizelge 3.1. Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin kimyasal analizi (% kütle).....	51
Çizelge 3.2. Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin mekanik özellikleri	52
Çizelge 3.3. 30MnB5 malzemenin kimyasal analizi (% kütle).....	53
Çizelge 3.4. 30MnB5 malzemenin mekanik özellikleri.....	53
Çizelge 4. 1. 22MnB5 (Usibor 1500) malzeme için gerçekleştirilen ısıt işlemler.....	77
Çizelge 4. 2. Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin ısıt işlem görmemiş durumu için emniyet katsayısı, gerilme ve sehım değerleri.....	101
Çizelge 4. 3. Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin ısıt işlem görmüş durumu için emniyet katsayısı, gerilme ve sehım değerleri.....	102
Çizelge 4. 4. 30MnB5 malzeme için gerçekleştirilen ısıt işlemler .....	109
Çizelge 4. 5. 30MnB5 malzemenin ısıt işlem görmemiş durumu için emniyet katsayısı, gerilme ve sehım değerleri .....	133
Çizelge 4. 6. 30MnB5 malzemenin ısıt işlem görmüş durumu için emniyet katsayısı, gerilme ve sehım değerleri .....	133



## 1. GİRİŞ

İnsanlar, yaşamlarını kolaylaştırıp daha konforlu bir hayat sürmek adına taşıtlara büyük bir önem göstermişlerdir. Bu önemin sonucu olarak; taşıtlar ve taşıt elemanları ile ilgili teknoloji büyük ölçüde ilerlemiştir.

Günümüzde, taşıt endüstrisindeki gelişmeler hızla ilerleyerek; araç ağırlığının azaltılması ve böylelikle yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının düşürülmesi konularına odaklanılmıştır. Bu konuda gerçekleştirilen en önemli adım ise; hafif fakat daha dayanıklı malzemelerin üretimi olmuştur. Üreticiler özellikle dayanımı yüksek, hafif, şekillendirilebilme kabiliyeti yüksek ve şekillendirme sonrası dayanımı subjektif iyi olan malzemeleri kullanmayı tercih etmektedirler. Bununla beraber, otomotiv endüstrisinde kullanılan sac malzemelerdeki mukavemet artışıyla beraber kalınlık azaltılması da araç ağırlığının azaltılmasında önemli bir alternatif olmuştur.

Otomobillerde kullanılan sac parçalardaki kalınlık azaltılmasının araç ağırlığına olan etkisi; malzemede sağlanan mukavemet artırımı ile daha ince kalınlıktaki parçaların kullanılmasının mümkün hale gelmesi ile olmaktadır. Bu anlamda kalınlık azaltılması ile ağırlıkta yaklaşık %24 lük bir azalım sağlamak mümkün olmaktadır. Yeni nesil çeliklerin kullanımının artırılması için en uygun şekillendirme yönteminin belirlenmesi gerekmektedir. Bu alanda Ar-Ge çalışmaları büyük önem arz etmektedir (Öztürk ve ark 2009).

Son yıllarda otomotiv endüstrisinde yolcu güvenliğini, sürüş emniyetini arttırmak, yakıt tasarrufu sağlamak için ve diğer çevresel faktörlerden dolayı araçların karoser kısmı hafifletilmek istenmektedir. Özellikle enerji ve petrol krizlerinin yaşandığı zamanlarda bu konu ön plana çıkmaktadır. Yine enerji krizlerinin çıktığı 1980'li yıllardan sonra HSLA çeliklerinden geliştirilen çift fazlı çelikler üretimde büyük yer almıştır. Benzer bir şekilde 1990'lı yıllarda meydana gelen krizler nedeniyle TRIP çeliği geliştirilmiştir (Hayat 2010). Bir diğer önemli konu ise; günümüzde yaygınlaşarak ilerleyen bor alaşımlı çeliklerin kullanımı ve bu çeliklerin sıcak şekillendirme prosesiyle şekillendirilmesi işlemidir.

Otomotiv endüstrisinde kullanılan çok yüksek dayanımlı çelikler genel olarak DP (çift fazlı), TRIP (dönüşüm plastisite), CP (kompleks fazlı), MS (martensitik) ve HF (sıcak şekillendirme) çelikleri gibi gruplara ayrılmaktadır. Bunların içerisinde DP, TRIP, CP ve MS çelikleri oda sıcaklığında şekillendirilmek üzere geliştirilmiştir. Bunların dışındaki HF-sıcak şekillendirme çelikleri ise östenit sıcaklığının üstüne çıkarıldıktan sonra kalıp altında soğutularak sertleştirilmesi için geliştirilmiştir. Yüksek dayanımlı çelik sacların oda sıcaklığında şekillendirilebilirliği düşüktür ve geri yaylanma problemlerinin çözümü geleneksel çeliklere kıyasla zordur. Ayrıca geleneksel şekil verme yöntemleri uygulanarak bu malzemelerle karmaşık geometri parçalar elde edilmesi mümkün değildir. Yüksek ve çok yüksek dayanımlı çelik sacların büyük miktarlarda şekil değişimlerinin gerçekleştirilebilmesi için yüksek sıcaklıklara çıkılması gerekmektedir. Yüksek sıcaklık şartları ise; malzemenin akma dayanımını düşürüp, sünekliliği arttırdığı için deformasyonu kolaylaştırır. Ayrıca sıcaklık etkisiyle malzeme dayanımı düşmekte olduğundan bununla birlikte şekillendirmek için gerekli olan pres kuvvetleri de düşmektedir (Kurumahmut 2009).

Sıcak şekillendirme prosesi, özellikle ultra yüksek dayanımlı karmaşık geometrilerin üretiminde kullanılan bir şekillendirme yöntemidir. Bu yöntem, 1975 yılında İsveç'te faaliyet gösteren HardTech firması tarafından geliştirilerek patenti alınmıştır. HardTech bu yöntemi, ziraat-tarım araç ve ekipmanlarının üretimi amacıyla geliştirmiştir. Firma, 1980 yılında SAAB, Jaguar ve Rover firmalarıyla anlaşma imzalayarak sıcak şekillendirme yöntemini otomotiv sanayinde kullanmaya başlamıştır (Önal ve Güler 2012).

Otomotiv üreticisi pek çok firma, son zamanlarda sıcak şekillendirme çelikleri ve sıcak şekillendirme prosesi üzerine yoğunlaşmış en uygun şekillendirme şartlarının belirlenmesi adına çeşitli Ar-Ge çalışmaları yürütmekte ve seri üretim için çalışmalarda bulunmaktadır. Dünya çapında en yaygın kullanılan sıcak şekillendirilebilir malzeme 22MnB5 veya Al-Si kaplamalı 22MnB5 olan Usibor 1500' dür.

Buna ek olarak; 20MnB5, 27MnCrB5, 30MnB5, 33MnCrB5, 38MnB5 gibi çelikler de sıcak şekillendirilebilir ve su verilebilen bor alaşımli çelikler olarak anılmaktadır (Hu ve ark 2012).

2010 yılı itibariyle, dünya genelinde yaklaşık 110 adet sıcak şekillendirme hattı aktif olarak parça imalatı gerçekleştirmektedir. 1990 lı yıllarda araçlarda sıcak şekillendirilme yöntemiyle üretilen dört adet parça bulunmaktayken, bu sayı günümüzde 20-30 adedi bulmuştur (Önal ve Güler 2012).

Bu doktora tez çalışmasının amacı; ülkemizde kullanımı yeni olan Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) ve 30MnB5 bor alaşımli sıcak şekillendirilebilir malzemelerin yüksek sıcaklık altındaki mekanik özelliklerinin belirlenmesidir. Bu bağlamda; ArcelorMittal firmasının ürettiği 1,7 mm kalınlığındaki Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzeme Beyçelik firmasından ve 2,5 mm kalınlığındaki Erdemir firmasının ürettiği 30MnB5 çelik malzeme yine aynı firmadan temin edilmiştir. Öncelikle, malzemelerin optimum mekanik özelliklerinin elde edildiği ısıl işlem koşulları (ısıtma sıcaklığı, fırında bekletme süresi, soğutma ortamı) belirlenmiştir. Araştırılan koşulların her biri için çekme deneyleri, sertlik ölçümleri ve metalografik muayeneler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra en iyi dayanımın elde edildiği koşullar ve malzemelerin ham hallerinin karşılaştırılması adına; serbest ağırlık düşürme, çentik darbe ve yorulma deneyleri uygulanmıştır. Bu çalışmanın en etkili kısmı ise; bahsedilen bu deneyler ile ilgili literatürde pek fazla yayın olmaması ve özellikle 30MnB5 malzeme ile ilgili çalışmaya rastlanmamasıdır. Çalışmada ayrıca, malzemelerin sıcak halde çekme deneyleri de gerçekleştirilip dayanım değerleri belirlenmiştir. İlk defa, indüksiyon ısıtma sisteminin çekme cihazına sonradan eklenmesiyle deneyler uygulanmıştır. Çalışmanın en son kısmında ise, uygulanan sıcak çekme deneylerinde elde edilen veriler Dynaform isimindeki sonlu elemanlar programına girilerek, prototip bir kalıbın sıcak şekillendirilmesi gerçekleştirilmiştir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Çelikler

Otomotiv endüstrisinde kullanılan çeliklerin sınıflandırılması metalürjik ve mekanik özellikler- çekme dayanımına bağlı olarak farklı şekillerde gerçekleştirilmektedir.

Metalürjik açıdan ele alındıklarında;

- Düşük mukavemetli çelikler,
- Geleneksel yüksek mukavemetli çelikler
- Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli (HSLA Steels)
- Çok yüksek mukavemetli çelikler (UHSS) şeklinde bir sınıflandırma yapılırken

Mekanik özellikler- çekme dayanımına bağlı olarak bir sınıflandırma yapıldığında;

- **Düşük dayanımlı çelikler (LSS):** Çekme dayanımı  $<270$  MPa

- **Yüksek dayanımlı çelikler (HSS):** Çekme dayanımı 270-700 MPa şeklindedir.

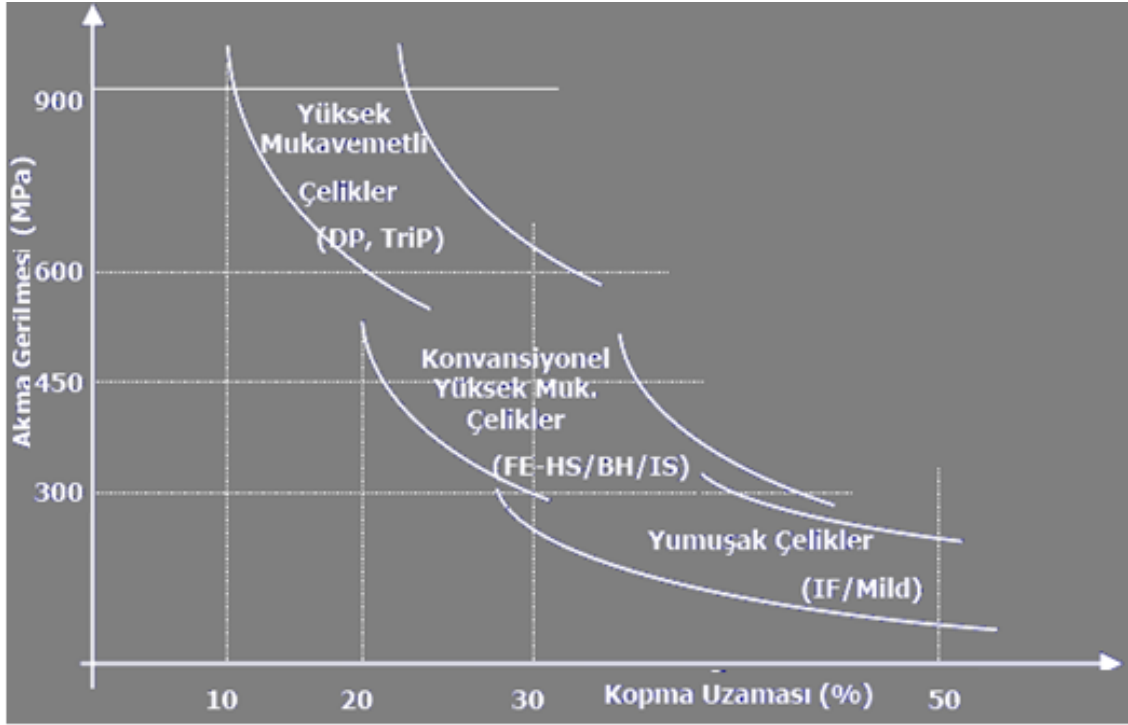
Şekil 2. 1' de Endüstride kullanılan çeliklerin sınıflandırılması örnek olarak verilmiştir.

-**Çok yüksek (Ultra yüksek) dayanımlı çelikler (UHSS):** Çekme dayanımı  $>700$  MPa olan çelikler olmak üzere 3 grupta incelenirler (Akerstrom 2006).

Özellikle otomotiv sektöründe kullanılan çift fazlı (DP) ve TRIP çeliklerin bir kısmı yüksek dayanımlı çelikler sınıfına girerken, bir kısmı ise çok yüksek dayanımlı çelikler grubunda yer almaktadır.

DP çelikler yumuşak ferrit ve sert martenzit yapıya sahip iken, TRIP çelikler ise ferrit matrisleri boyunca tutulmuş östenit ve küçük miktarda beynitik yapıya sahiptir. Bu malzemelerin mukavemet özelliklerinin yanı sıra, şekillendirilebilme kabiliyetleri de büyük önem taşımaktadır. Çünkü parçaların üretimi sürecinden tasarlanan geometrilerin malzemeler tarafından kabul edilebilir ölçülerde olması gerekmektedir. Ancak bu malzemelerde en büyük sorun, çok büyük oranda geri esneme problemlerinin ortaya çıkmasıdır. Bu durum özellikle montaj esnasında büyük problemler yaratmaktadır. Tüm

bu sebeplerden ötürü, bahsedilen çeliklerin kullanımı önemli ölçüde sınırlanmaktadır (Öztürk ve ark. 2009).



Şekil 2. 1. Endüstride kullanılan çeliklerin sınıflandırılması (Fırat 2006)

### Çok yüksek dayanımlı çelikler (UHSS): Ultra yüksek dayanımlı çelikler

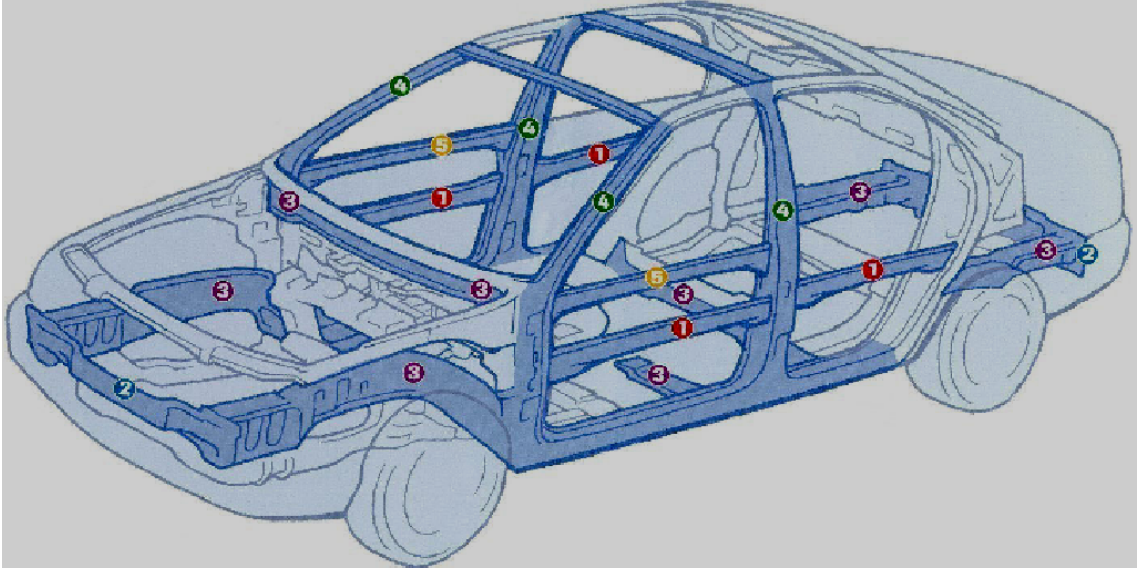
Günümüzde otomotiv endüstrisinde, yakıt tasarrufu ve araç ağırlığının azaltılması konuları önemli bir yer teşkil etmekte ve yeni üretim yöntemleri ile yeni malzemelerin kullanımıyla ilgili araştırmalar da gün geçtikçe artmaktadır.

Bir önceki bölümde belirtildiği gibi, mekanik sınıflandırma ele alındığında, çekme dayanımı 700MPa' dan büyük olan çelikler Ultra Yüksek Mukavemetli Çelikler olarak adlandırılmakta ve Şekil 2.2' de belirtildiği gibi araçların pek çok önemli parçasında kullanılmaktadır.

1.Kapı takviye sacı

2.Tampon takviye sacı

- 3.Çapraz ve yan paneller
- 4.A/B kolonu takviye sac
- 5.Dirsek şasi takviye sacı



**Şekil 2. 2.**Bir otomobil gövdesindeki çok yüksek mukavemetli çelikten üretilmiş parçalar (Akerstrom 2006)

Yine aynı sınıflandırmaya göre; ultra yüksek mukavemetli çeliklerden özellikle çift fazlı (DP) ve TRIP çeliklerin otomotiv endüstrisinde kullanımının arttığı dikkat çekmektedir. Bu malzemelerin kullanımıyla herhangi bir mukavemet kaybı olmaksızın yakıt tasarrufu ve araç ağırlığında azaltılmanın sağlandığı gözlemlenmiştir. Ancak bu çeliklerde, özellikle geri yaylanma problemiyle karşılaşmakta ve bu durumun önüne geçilebilmesi amacıyla endüstride “Sıcak Şekillendirme Çelikleri- (HF)” kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan ‘Sıcak Şekillendirme Çeliği’, 22MnB5 (Usibor 1500) dir. Bir diğer kullanılan, sıcak şekillendirme çeliği ise 30MnB5 malzemedir. Bu malzemelere, bor alaşımli (borlu) çelikler adı da verilmektedir.

Bor’ un, alaşım elementi olarak katıldığı çelikte sertleşme kabiliyeti üzerinde olumlu etkisi bulunduğu bilinmektedir. Özellikle bu durum, %0.65’e kadar karbon içeren çeliklerde daha önem arz etmektedir (Er 2011).

Üretilen borlu çeliklerin çoğu Mn ve Cr ile alaşımlandırılmaktadır. Ancak, bazı hallerde Ni ve Mo içermektedir. Genellikle C oranı % 0,10 ile % 0,45 arasında değişen çeliklere ve düşük alaşımlı çeliklere bor ilave edilmektedir (Çarboğa 2012).

Borlu çelikler, uygulanan ısıl işlemler sonucunda yüksek sertlik değerlerine ulaştıkları için, sürtünmeye ve aşınmaya karşı çok iyi direnç gösterirler ve bu nedenle; ziraat aletleri, toprak işleyen aktif uçlar ve madencilik ekipmanları gibi ağır çalışma koşullarındaki uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Bunun dışında ise özellikle son yıllarda otomotiv üreticileri tarafından, yapısal parçalarda hafiflik elde etmek ve darbelere maruz kalabilecek yerlerde sürücü ve yolcu güvenliğini arttırmak amacıyla da kullanılmaya başladıkları bilinmektedir. Otomotiv sektöründe yüksek dayanımlı borlu çelik olarak kullanılan malzeme 22MnB5 olup, bu malzemenin sıcak şekillendirme işleminin ön plana çıktığı görülmektedir (Er 2011).

Borlu çeliklerde kullanılan Mn elementi, çeliğin mukavemetini arttıran ve aynı zamanda kritik soğuma hızını düşüren bir elementtir (Eren 2005). Ayrıca Mn, paslanmaya, aşınmaya ve az oranda ısı etkilerine karşı dayanıklılığı iyileştirir ve çeliğin dövülebilme ve kaynak edilebilme özelliklerine de olumlu etki eder (Koç 2007).

Tez kapsamında incelenen Ultra Yüksek Dayanımlı Çelik malzemelerden 22MnB5 (Usibor 1500) ve 30MnB5 malzemelerinin mekanik ve metalurjik özellikleri daha sonraki bölümlerde verilecektir.

## **2.2. Sacların Şekillendirilebilirliğini Etkileyen Özellikler**

Sacların şekillendirilebilirliği, levha metallerin teknolojik ve ekonomik önemlerinden dolayı sürekli olarak büyük ilgi çekmektedir. Tüm levha şekillendirme işlemleri, temel olarak gerilme ve eğilme proseslerinden oluşur. Ancak bazı unsurlar tüm şekillendirme operasyonunu önemli bir şekilde etkilerler. Bu faktörler; uzama, akma uzaması, anizotropi, tane büyüklüğü, kalıntı gerilmeler, geri yaylanma ve buruşmadır ve bu

faktörler levha metallerin tüm şekil verme işlemlerinde önemli bir yere sahiptir (Kalpakjian ve Schmid 2003).

### **2.2.1. Uzama**

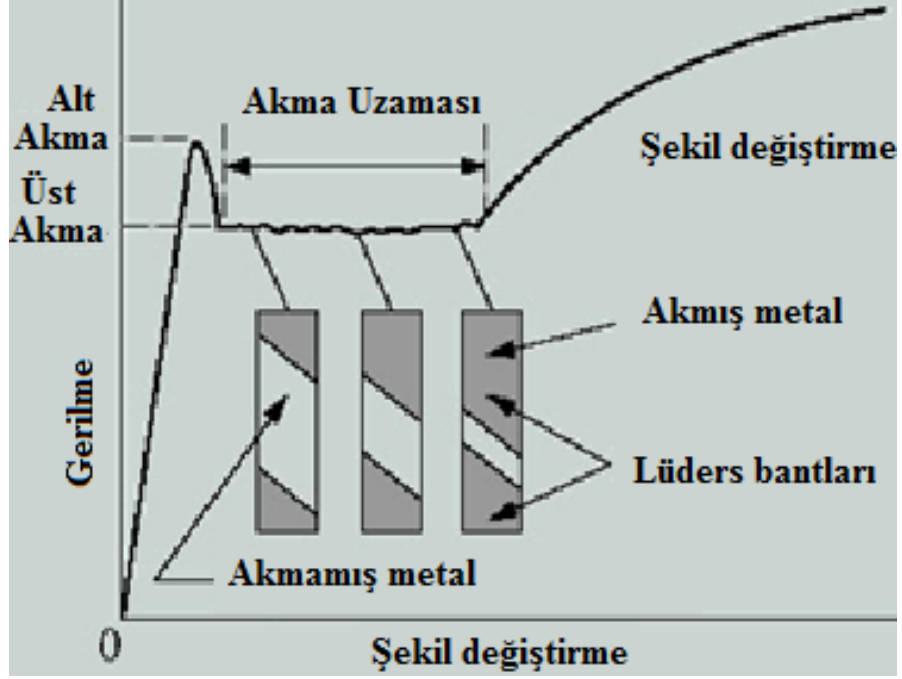
Levha şekillendirme işlemlerinde basit tek eksenli gerilme hali nadir olarak oluşmasına rağmen basit çekme deneyleri, sacların şekillendirme davranışlarını anlamada yardımcı olurlar. Çekme deneyi uygulanan malzeme, çekme kuvvetinin en büyük değerini alana kadar üniform olarak şekil değiştirir. Ancak, en büyük kuvvete ulaşılmca kesit daralması (büzülme) başlar ve üniform uzamayı, nonüniform uzama takip eder. Bu durum kopma gerçekleşene kadar devam eder. Sac levha, şekillendirme boyunca gerilmeye maruz kalır ve şekillendirilme esnasındaki, üniform uzamanın yüksek olması yüksek şekillendirilebilme kabiliyeti için arzu edilebilir bir durumdur.

Gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme davranışı  $\sigma = K \cdot \epsilon^n$  ile ifade edilen plastik şekil verilecek bir sacın pekleşme üstelinin yüksek olması faydalıdır. Çünkü büyük n değeri, yüksek üniform uzamayı işaret eder ki, bu durum şekillendirme için istenen bir durumdur. Burada bahsedilen, K=mukavemet katsayısı n= pekleşme üsteli dir (Kalpakjian ve Schmid 2003).

### **2.2.2. Akma Uzaması**

Belirgin akma gösteren malzemelerde, gerilme üst akma sınırından alt akma sınırına düştükten sonra, alt akma sınırı boyunca gerilme yeniden yükselmeye başlayana kadar oluşan uzamaya akma uzaması denir.





**Şekil 2. 3.** Çekme halinde akma uzaması ve luders bantları (Kalpakjian ve Schmid, 2003)

Üst akma sınırında, gerilme yığılması olan bir noktada, malzemede plastik şekil değişimine uğramış bir bant oluşur. Gözle görülebilen bu bandın oluşmasıyla birlikte gerilme alt akma sınırına düşer ve akma uzaması boyunca bant deney numunesi üzerinde yayılır. Çoğunlukla, çeşitli noktalarda gerilme yığılması olduğu için oluşan bant sayısı da birden çoktur. Genel olarak çekme doğrultusu ile yaklaşık 45° açı yapan bu bantlara Luders-Hartman bantları denir (Şekil 2.3).

Luders-Hartman bantları, malzemenin yüzey kalitesini görsel açıdan bozdukları için yapıda istenmezler. Bu problemi önlemenin yolu olarak, malzemelerin belirgin akma göstermesi önlenmeli veya sac soğuk haddelenerek kalınlığı % 0,5-1,5 arasına düşürülmelidir. Bu işleme temper haddelenmesi denir (Çapan 2003).

Akma uzamasının büyüklüğü, şekil değiştirme oranına ve levhanın tane büyüklüğüne bağlıdır. Yüksek şekil değişimi oranlarında, uzama genellikle yükselmektedir. Ayrıca tane büyüklüğü azalınca da akma uzaması artmaktadır (Kalpakjian ve Schmid 2003).

### **2.2.3. Anizotropi**

Anizotropi; malzemelerin farklı yönlerde farklı özellikler göstermesi demektir ve sadece levha düzleminde değil, aynı zamanda kalınlık doğrultusunda da olabilir. Bu durum sacların derin çekilmesi işleminde önemli bir kavramdır (Kalpakjian ve Schmid 2003).

### **2.2.4. Tane Büyüklüğü**

Levha metallerde tane büyüklüğü; malzemenin mekanik özellikleri ve deformasyona uğramış parçanın yüzey görünümü üzerindeki etkisinden ötürü önemli bir kavramdır. Genel olarak plastik şekil verilecek saclarda ASTM tane büyüklüğü numarasının 7 veya daha ince taneli olması tercih edilir(Çapan 2003). ASTM tane büyüklüğü numarasının 7 olması, 100 büyütmede inç karedeki tane sayısının ortalama olarak 64 adet ve ortalama tane çapının 0,032 mm olması manasındadır (<http://mf.omu.edu.tr/malzeme> 2012). Büyük tane, daha kaba ve pürüzlü bir yüzey oluşumuna (portakal kabuğu görünümü) neden olur. Bu nedenle, sac şekillendirmede ince taneli malzemeler seçilir (Çapan 2003).

### **2.2.5. Artık Gerilmeler**

Sacların şekillendirilmesi esnasında üniform olmayan şekil değişimi nedeniyle malzemede artık gerilmeler doğabilir. Dengeleri bozulduğunda artık gerilmeler parçanın çarpılmasına yol açar. Yüzeydeki artık çekme gerilmeleri eğer giderilmezse, gerilmeli korozyon çatlmasına neden olabilir (Çapan 2003).

### **2.2.6. Geri Yaylanma**

Levha metallere, ince oldukları için özellikle bükme ve derin çekme işlemlerinde geri yaylanmaya maruz kalırlar. Eğilme şekillendirmelerinde ve eğilme yarıçapının kalınlığa oranı yüksek olan saclarda da (örneğin otomobil parçalarında) geri yaylanma durumu gözlenebilmektedir (Kalpakjian ve Schmid 2003).

### **2.2.7. Buruşma**

Levha şekillendirmede malzemeler genel olarak çekme gerilmelerine maruz kalmasına rağmen, şekillendirme işlemi levha düzleminde oluşan bası gerilmeleriyle de gerçekleşebilir. Bu duruma, derin çekme işleminde kenar buruşması örnek verilebilir. Kalıplar ve levha yüzeyi arasında, düzgün olamayan bir biçimde dağıtılmış yağlayıcı madde de buruşma başlangıcına yardımcı olur. Buruşma eğilimi;

a) levhanın desteksiz veya sınırlandırılmamış boy veya yüzey alanı

b) kalınlık azalışı

c) levhanın kalınlığının üniform olmamasına bağlı olarak artmaktadır (Kalpakjian ve Schmid 2003).

### **2.2.8. Kaplanmış Levha**

Levha metaller, özellikle çelik, pek çok organik kaplama, film, ince tabakalarla kaplanabilirler. Bu tür kaplamalar özellikle, görsel açıdan uygulanmakla beraber aynı zamanda korozyon direncine de yardımcı olurlar. Örneğin çinko, çelik levhalarda, korozyon önleyici olarak, otomotiv endüstrisinde kullanılırlar (Kalpakjian ve Schmid 2003).

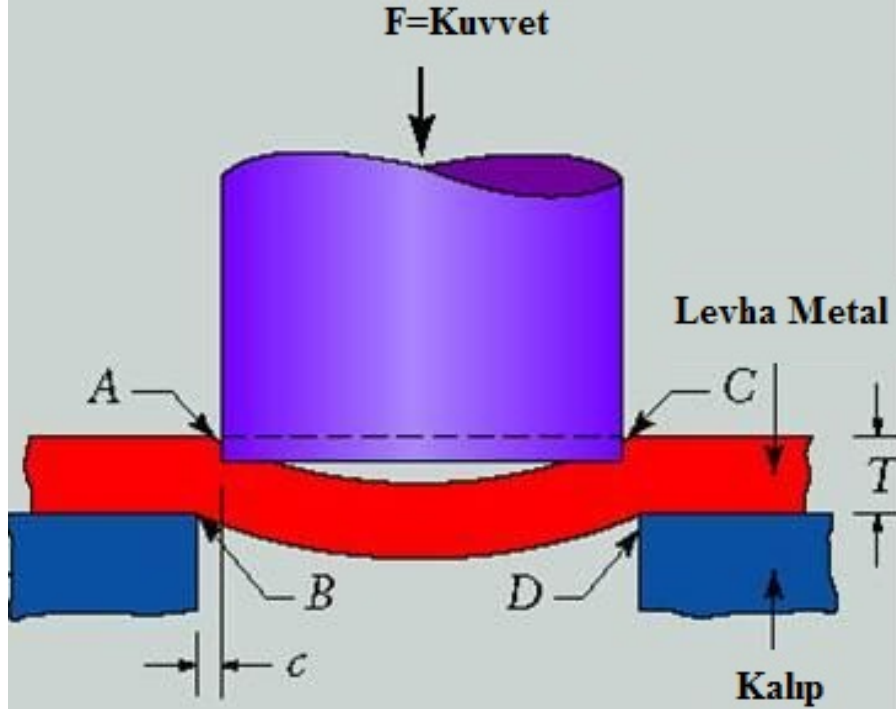
## **2.3.Sac Şekillendirme İşlemleri**

Çalışmanın bu kısmında, bazı önemli levha metal şekillendirme işlemleri ve özellikleri verilmiştir.

### **2.3.1. Kesme İşlemi**

Kesme, levha halindeki yarı ürünün bir hat boyunca veya planlanan biçimde birbirinden ayırma işlemidir (Şekil 2.4). Kesme işleminde sac parça deformasyon oluşana kadar kayma gerilmesine maruz kalır. Kayma gerilmeleri genellikle zımba ve kalıp arasında oluşur. Kesme sonucu oluşan parçalar; hurda kısım ve şekillendirmeden sonra kullanılacak olan parçadan ibarettir. Kesme prosesindeki ana değişkenler; zımba

kuvveti, zımbanın hızı, yağlama, levhanın kenar konumu, zımba ve kalıp malzemeleri, zımba ve kalıbın köşe yarıçapı ve zımba ve kalıp arasındaki açıklıktır (Kalpakjian ve Schmid 2003).

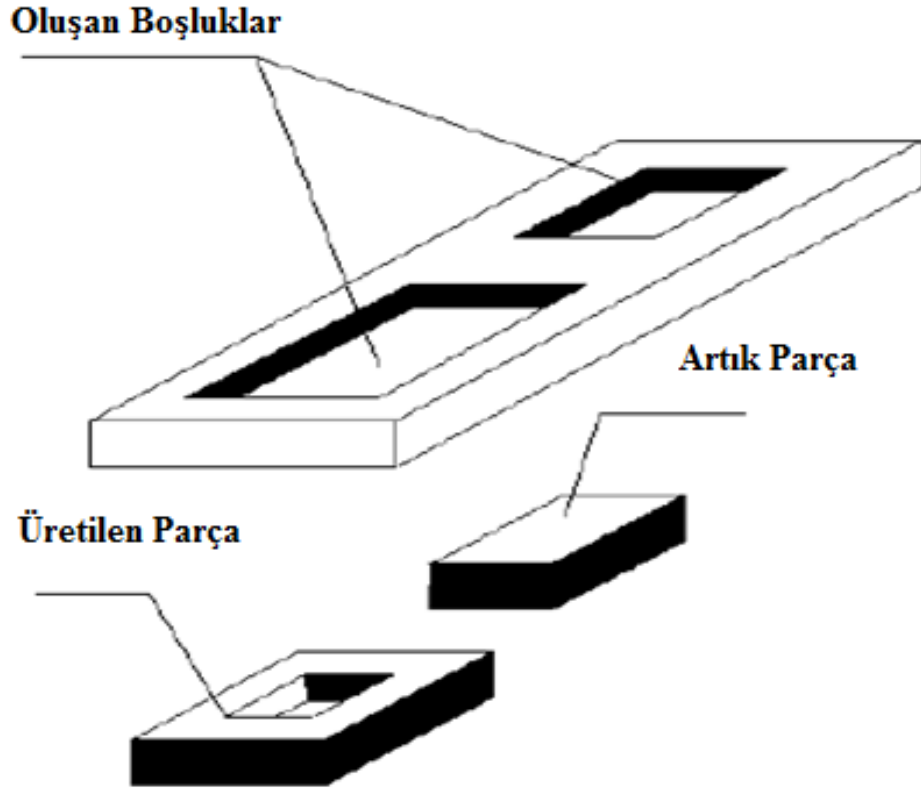


Şekil 2. 4. Kalıp ve zımba ile gerçekleştirilen kesme işleminin şematik gösterimi (Kalpakjian ve Schmid 2003)

Kesme işlemi; uç kesme ve kapalı (klasik) kesme olmak üzere iki yöntemle gerçekleştirilmektedir.

### 2.3.1.1.Kapalı Kesme

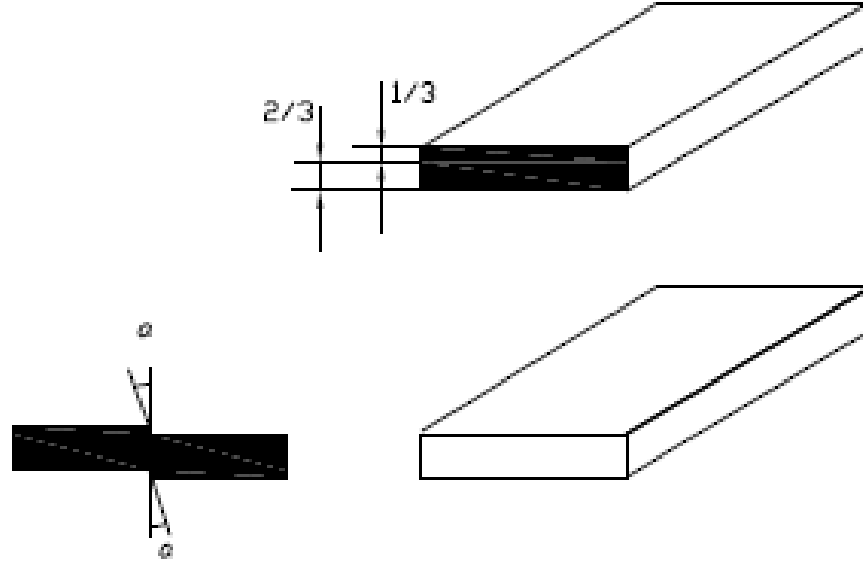
Malzeme şeridinde veya belirli boyutta bulunan yarı mamul parça üzerinde değişik biçimlerde boşluk oluşturarak üretim sağlanıyorsa bu tür kesmeye kapalı kesme denir (Sertkaya 2010). Kapalı kesme işleminin şematik gösterimi Şekil 2.5' te verilmiştir.



Şekil 2. 5. Kapalı kesme işlemi (Sertkaya 2010)

### 2.3.1.2. Uç Kesme

Levha halindeki yarı mamul ayarlanan boyda ve biçimde birbirinden fire vermeyecek şekilde ayrılıyorsa bu tür kesmeye uç kesme denir. Bu uygulama genelde giyotin makasla, el veya kollu makasla yapılır. Ayrıca bu kesme yöntemi, kalıplarda birbirini tamamlayan simetrik parçaların üretilmesinde yani ardışık kesme kalıplarında görülebilir (Sertkaya 2010). Uç kesme işleminin şematik gösterimi Şekil 2.6'da verilmiştir.



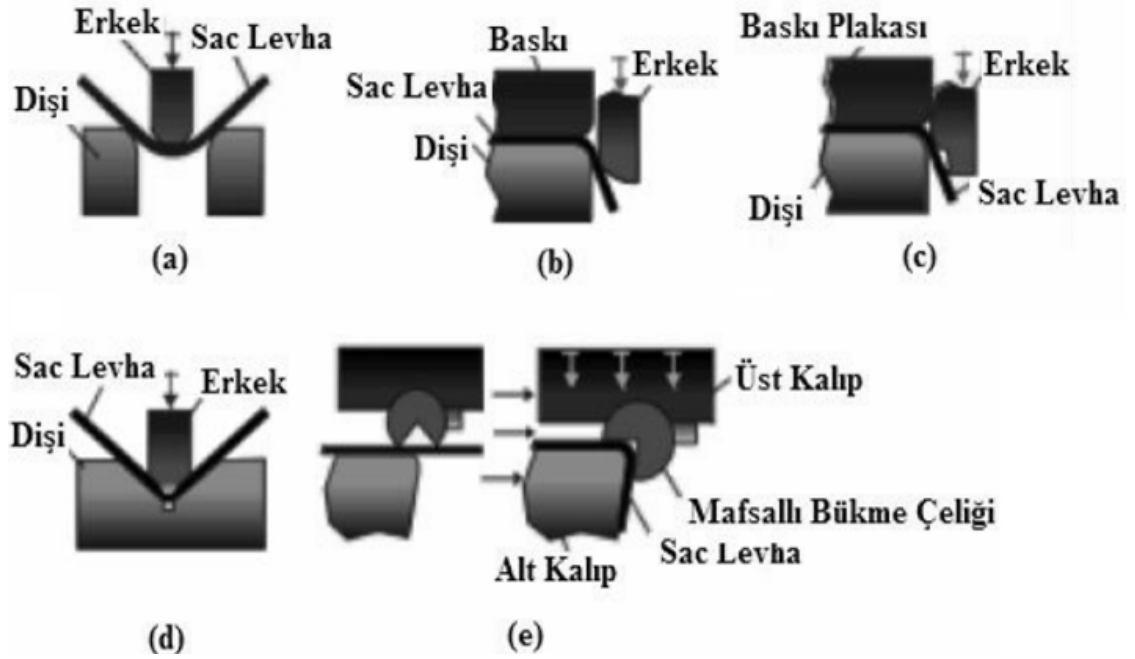
Şekil 2. 6. Uç kesme işlemi (Sertkaya 2010)

### 2.3.2. Bükme İşlemi

Bükme işlemi; levha malzemenin plastik deformasyon yoluyla kavisli bir şekil alması prosesidir.

Sadece kenar, kıvrım ve oluk oluşturma gibi şekillendirme işlemlerinde değil ayrıca, parçanın atalet momentini artırarak sertlik verilmesinde uygulanır. Örneğin; uzun şerit halinde bulunan düz sac levha, V şekli verilmiş haline göre daha düşük rijitliğe sahiptir (Kalpakjian ve Schmid 2003).

Bükme işlemi, en yaygın kullanılan sac metal şekillendirme yöntemlerinden birisi olup sac parçanın sekline, malzeme özellikleri ve üretim adedi gibi değişkenlere bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir.



**Şekil 2. 7.** Bükme operasyonları a) Serbest bükme b) Kenar bükme c) Çift etkili bükme d) Ezerek bükme e) Döndürerek bükme (Yenice 2006)

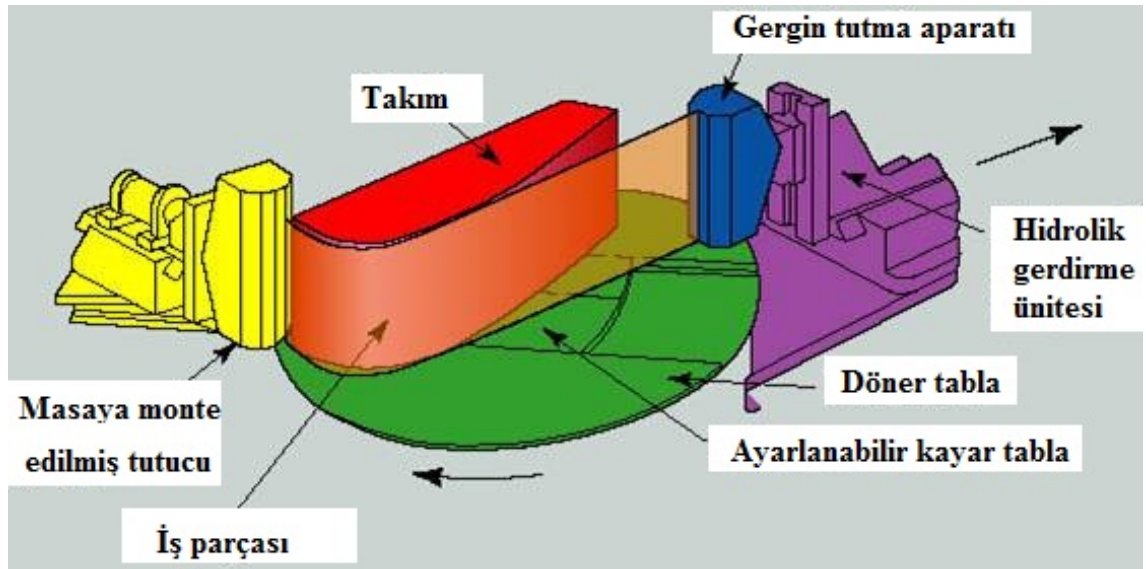
Serbest bükmede parçanın şeklini, erkek kalıp hareket mesafesi ve dişi kalıp açıklığı belirler. Bu sistemde, dişi kalıp sabit, erkek kalıp ise hareketlidir (Şekil 2.7 a). Kenar bükme bir form verme operasyonudur ve parçanın bir kenarı doğru boyunca aşağı doğru bükülür (Şekil 2.7 b). Diğer kenar ise baskı plakası altında, pot kuvveti ile tutulur.

Bükme operasyonlarında geri yaylanma etkisini azaltmak ve bükme açısını kontrol edebilmek için kullanılan en yaygın yöntemler çift etkili bükme, ezerek bükme ve döndürerek bükmedir. Çift etkili bükme, arka arkaya etki eden iki serbest bükme gibi düşünülebilmektedir (Şekil 2.7 c). Geri yaylanmayı azaltmada etkili bir yöntemdir. Ezerek bükme operasyonunda ise, dişi ve erkek kalıbın bükmeyi gerçekleştiren bölgeleri bası gerilmesi altında parçayı bir miktar ezer (Şekil 2.7 d). Ayrıca, geri yaylanmayı azaltmakla birlikte ezme işleminden dolayı daha fazla kuvvet gerektirir. Döndürerek bükme işleminde kullanılan döner bükme çeliği, parçayı tutar ve aynı zamanda da bükür (Şekil 2.7 e). Döner bükme, çeliği parçaya bir baskı plakası gibi basar, sıkıca tutarak 90°den daha fazla bükür, böylece geri yaylanma da telifi edilebilir.

Bu operasyon 90°'den küçük açılardaki parçaları bükerek oluşturma işleminde daha etkili olarak kullanılır ve erkek kalıp kuvvetini de azaltır (Yenice 2006).

### 2.3.3. Gerdirme ( gerdirmeli sıvama) İşlemi

Bu işlemde, levha metal kenarlarından sıkıştırılır ve yukarı, aşağı ya da yana hareket eden bir kalıp veya şekil bloğunun üzerine gerilir. Gerdirme işlemi, uçak kanatlarının panellerinin, otomobil kapı panellerinin ve pencere çerçevelerinin üretimde uygulanmaktadır. Bu proses genellikle düşük hacim üretimlerinde kullanılmasına rağmen, birden fazla kullanım alanına sahiptir ve ekonomiktir (Kalpakjian ve Schmid 2003). Gerdirme (Gerdirmeli sıvama) işleminin şematik gösterimi Şekil 2.8' de verilmiştir.



Şekil 2. 8. Gerdirme (Gerdirmeli sıvama) işleminin şematik gösterimi (Kalpakjian ve Schmid 2003)

### 2.3.4. Hidrolik Şekillendirme

Hidrolik şekillendirme temel olarak metal sac veya tüp malzemenin akışkan bir ortam (su, viskoz polimerik malzeme vs.) vasıtasıyla kapalı bir kaptaki şekillendirilmesidir (Ağyel ve Yaşar 2009).

Hidrolik şekillendirme;

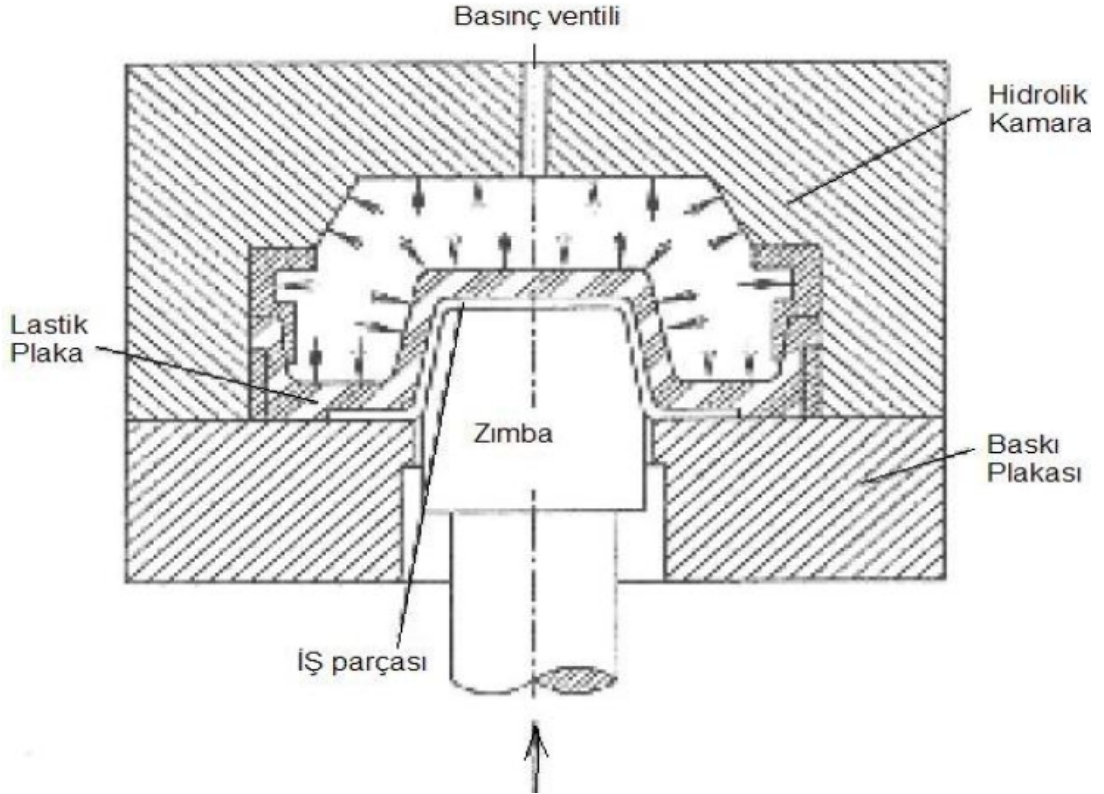


a. Hidrolik sac şekillendirme.

b. Tüp hidrolik şekillendirme.

c. Hidromekanik derin çekme olarak 3 ana grup altında toplanabilir (Ağyel 2009).

Bu uygulama için kullanılan temel ekipmanlar Şekil 2.9’ da gösterilmiştir. İşlem esnasında şekillendirilecek sac, baskı tablası üzerine konulur ve zimba sacı lastik plakaya doğru iter. Sacın hidrolik kamara üzerine itelenmesi hidrolik basıncın artmasına sebep olur. Kamaradaki artan basınç, sacın zimba üzerine sıvanmasını sağlar. Zımbanın hidrolik kamara içine ilerlemesi ile orantılı olarak artan hidrolik basınç, basınç ventili vasıtasıyla istenilen seviyede tutulur. Sac istenilen şekli aldıktan sonra basınç boşaltılır ve parça çıkarılır. Bu teknoloji özellikle havacılık sanayinde büyük boyutlu parçalarının imalatında, az adetli üretimlerde ve prototip hazırlamada kullanılmaktadır (Ağyel 2009).



Şekil 2. 9. Hidrolik sac şekillendirme (Ağyel 2009)

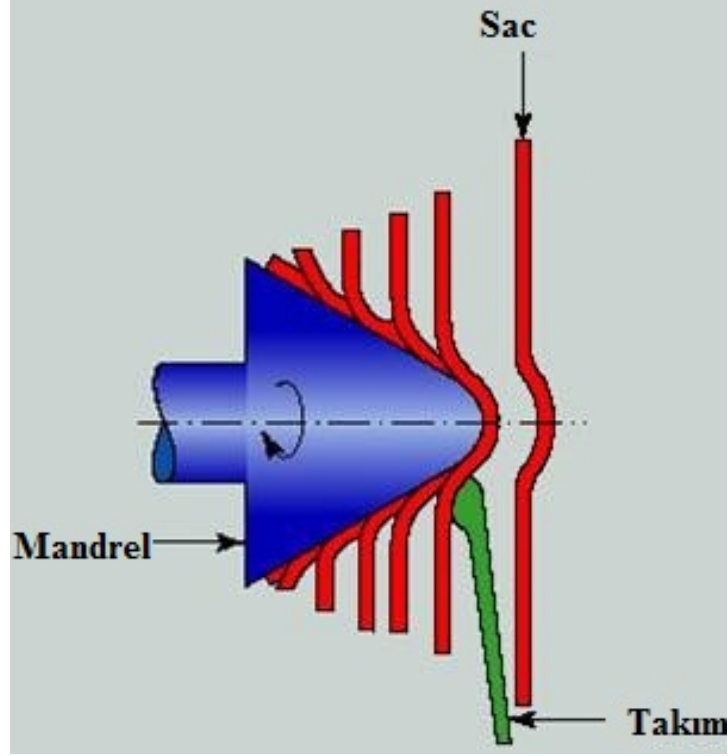
### 2.3.5. Dönerli Sıvama (Spinning) İşlemi

Bu proses, aksel simetrik parçaların, dönel bir mil üzerinde, rijit takımlar veya silindirler vasıtasıyla şekillendirilmesini içermektedir. 3 çeşit dönerli sıvama yöntemi bulunmaktadır:

- a) Geleneksel (manuel)
- b) Kayma sıvama
- c) Boru Sıvama

Geleneksel (manuel) dönerli sıvama işleminde; sac plak dönen mile karşı tutulurken, rijit takım, mil üzerinde dönen levha metali şekillendirir. Takım ya elle ya da hidrolik bir mekanizma ile harekete geçirilir. Ayrıca bu yöntem; diğer yöntemlerle üretimi zor ve ekonomik olmayan konik veya eğrisel şekillendirme işlemlerinde kullanılır (Şekil 2.10).

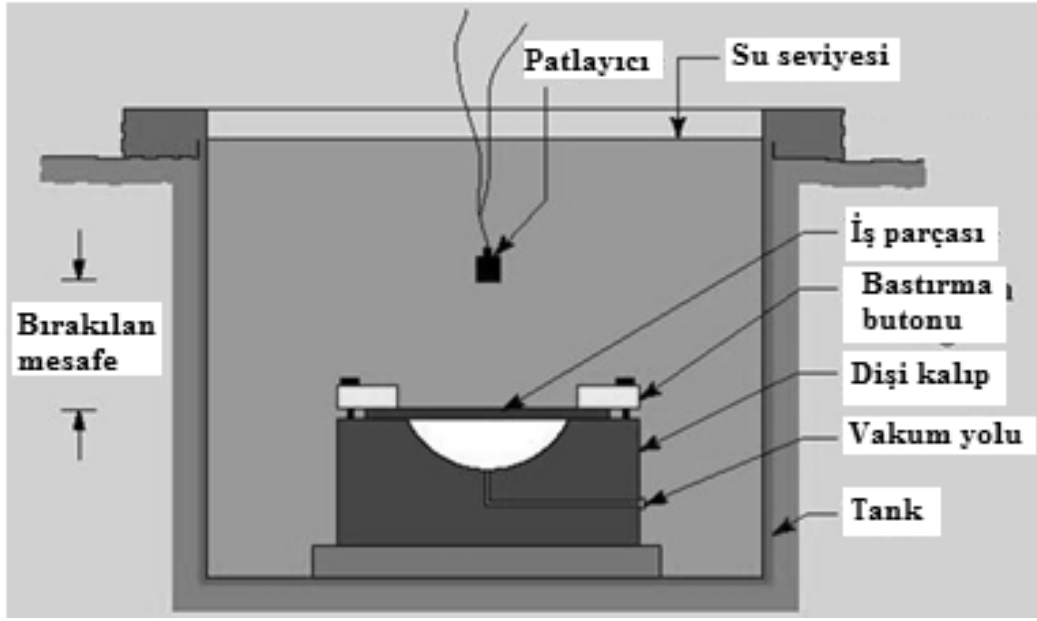
Kaymalı döner sıvama işleminde; parçanın çapının sabit kalması sayesinde, aksel veya eğrisel şekillendirmelerin oluşturulmasında kullanılır. Geleneksel (manuel) dönerli sıvama işlemindeki kalınlık azaltılmasına göre daha kontrollü bir işlem gerçekleştirilmektedir. İşlem esnasında kullanılan özel aletlerle malzeme akışı gerçekleştirilir ve bunlar malzemeyi, rijit milin akseline paralel yönde hareket ettirir. Boru sıvama işleminde; takımlar vasıtasıyla, silindir üzerinde dönen borunun kalınlığının azaltılması gerçekleştirilir. Bu operasyon dıştan veya içten olacak şekilde gerçekleştirilebilir. Hacim değişmezliğinden dolayı metal yan yüzeylerindeki kalınlık azaltılmasıyla, borunun uzaması sağlanır. Takımın silindir boyunca hareketi kontrol edilerek, çeşitli iç veya dış profiller elde edilir. Bu yöntem özellikle; basınç kazanları, otomotiv parçaları, roket ve füze parçaları üretiminde kullanılır (Kalpakjian ve Schmid 2003).



**Şekil 2. 10.** Dönerli sıvama işleminin şematik gösterimi (Kalpakjian ve Schmid 2003)

### 2.3.6. Patlayıcı ile Şekillendirme İşlemi

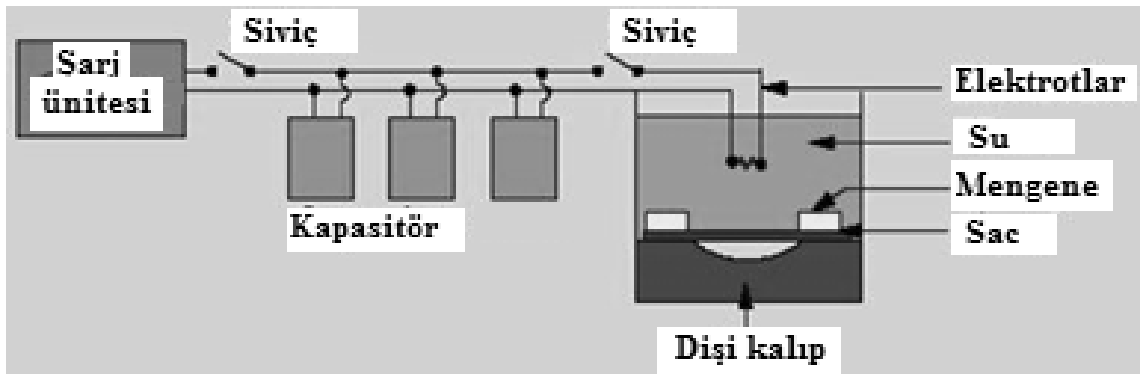
Bu yöntemde, iş parçası, bir kalıp üstüne sıkıştırılarak sabitlenir. Kalıp boşluğundaki hava, bir vakum sistemiyle boşaltılır. Daha sonra tüm sistem, su ile dolu bir tankın içine yerleştirilir. Levha yüzeyinden belirli bir uzaklıkta patlayıcının yerleştirilmesi yapıldıktan sonra, patlayıcı patlatılır. Bu patlama bir şok dalgası oluşturur ve bu dalganın oluşturduğu basınç, metali kalıp boşluğuna itecek kadar yeterli bir seviyededir (Kalpakjian ve Schmid 2003). Şekil 2.11’de en yaygın karşılaşılan patlayıcı ile şekillendirme prosesi görülmektedir.



Şekil 2. 11. Patlayıcı ile şekillendirme işleminin şematik gösterimi (Kalpakjian ve Schmid 2003)

### 2.3.7. Elektrohidrolik Şekillendirme İşlemi

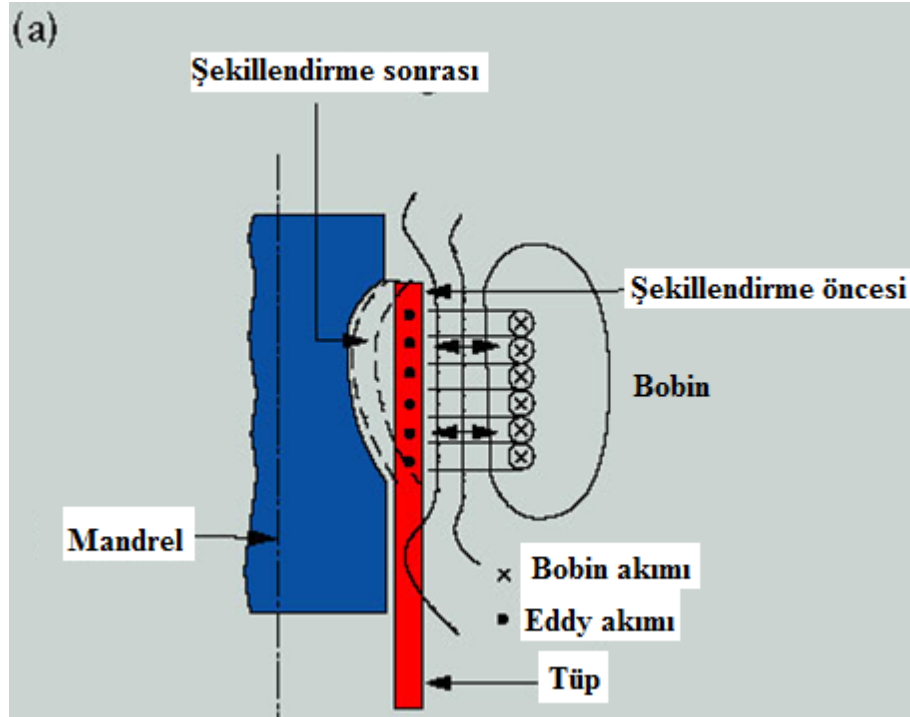
İnce bir kablo ile bağlantısı olan iki elektrottan çıkan kıvılcım, enerji kaynağıdır ve bu enerji, kondenserler içindeki doğru akımla şarj edilir. Enerjinin elektrotların içinden boşaltılması, levhayı şekillendirecek kadar kuvvetli olan bir şok dalgası üretir (Şekil 2.12). Bu proses, patlayıcı ile şekillendirme işlemine benzerdir. Ancak; daha düşük enerjiden yararlanması, daha küçük iş parçalarında uygulanması ve daha güvenli olması gibi farklılıklar göstermektedir (Kalpakjian ve Schmid 2003).

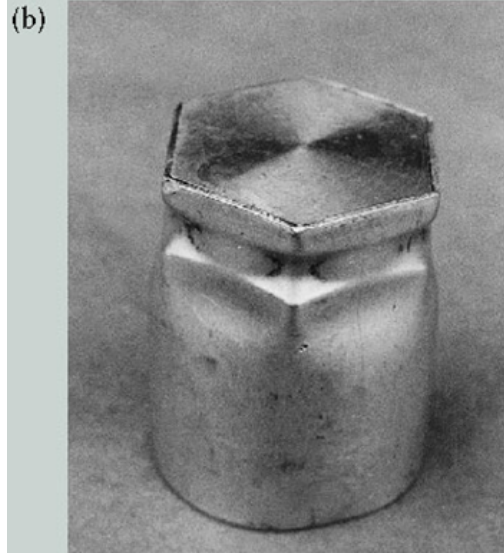


Şekil 2.12. Elektrohidrolik Şekillendirme İşleminin Şematik Gösterimi (Kalpakjian ve Schmid, 2003)

### 2.3.8. Manyetik Sinyalle Şekillendirme İşlemi

Bu üretim şeklinde; bir kapasitör deposunda depolanan enerji, bobin içinden boşaltılır. Yaygın uygulanan bir örneği Şekil 2.13' te görülmektedir. Halka şeklindeki bobin, boru şeklindeki iş parçasının tekrar şekillendirilmesi için üzerine yerleştirilir. Şekillendirme kuvvetleri, birbirine karşı direnen iki manyetik alan vasıtasıyla oluşmaktadır. Bobin ve şekillendirilecek olan boru arasında bir geri itme kuvveti doğar ve şekillendirilen borunun kalıbın içine çökmesini sağlar. Sistemde oluşan daha yüksek elektriksel iletkenlik, daha yüksek manyetik kuvvetlere neden olur. Bu yöntemde, şekillendirilecek metalin özel manyetik özelliklere sahip olmasına gerek yoktur. Ayrıca; ince cidarlı boruların, çubuk veya kablo üzerine basılmasında ve kabartma işlemlerinde uygulanabilir (Kalpakjian ve Schmid 2003).





**Şekil 2. 13.** Manyetik Sinyalle Şekillendirme İşlemi a) Manyetik sinyalle şekillendirme işleminin şematik gösterimi b) Manyetik sinyalle şekillendirme ile oluşturulan alüminyum tüp (Kalpakjian ve Schmid 2003)

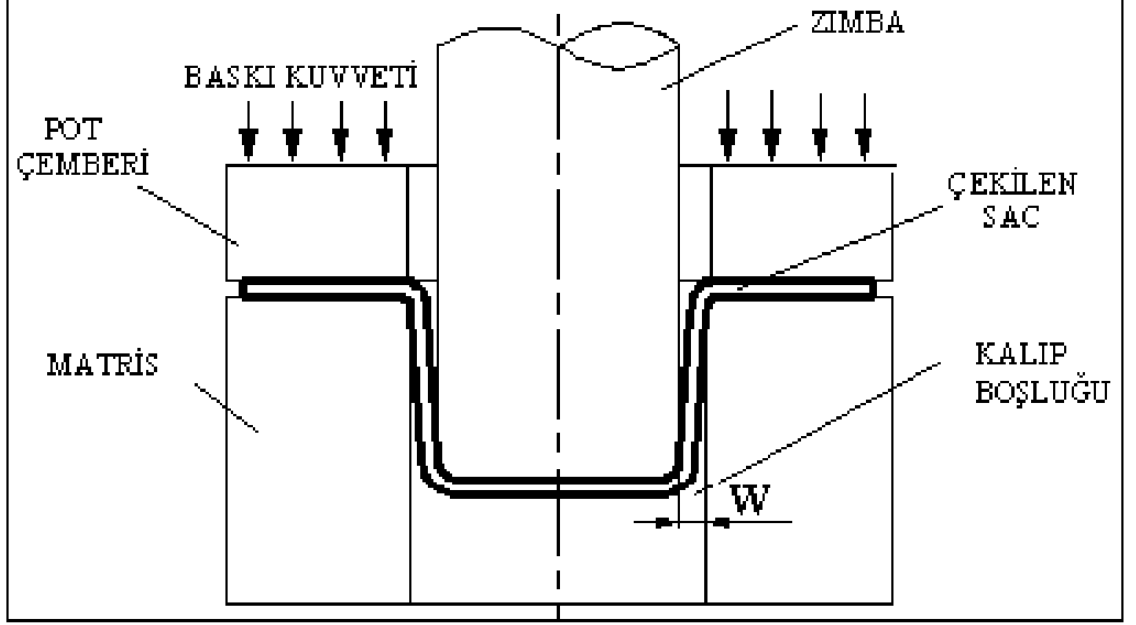
### 2.3.9. Derin Çekme İşlemi

İki boyutlu, düzlemsel geometriye sahip iş parçasının çekme kalıbı denilen elemanlar yardımıyla ve bir zımba vasıtasıyla preste çökertilmesi ya da bir başka deyişle, iş parçasının çekme kalıbı içine sıvanması sonucunda belirli derinlik ve profillere sahip üç boyutlu parçalar elde edilmesi işlemine pres tekniğinde çekme adı verilir. Çekme yardımıyla elde edilmesi ön görülen derin kaplar birden fazla operasyon ile de oluşturulabilirler. Bu, birbirini takip eden çok sayıda çekme işleminden oluşan imal usulü ise derin çekme adını almaktadır (Sertkaya 2010).

Derin çekme, sac levhalardan kap şeklinde parçalar elde etmede kullanılan en önemli yöntemlerden birisidir. Bu yöntemde dairesel, kare veya kompleks biçimli parçalar üretilebilir. Görünüşleri basit gibi görünse de bu parçaların derin çekme yöntemiyle şekillendirilmesi oldukça karmaşık bir işlemdir (Gavas 2005).

Derin çekme işleminde, kalıbın biçimi, malzemenin mekanik özellikleri, taslak malzemenin geometrisi ve büyüklüğü, kalıp-malzeme-baskı plakası arasındaki sürtünme ve yağlama şartları, baskı plakası kuvvetinin baskı plakası boşluğuna oranı gibi faktörler derin çekme işlemini etkiler ve istenilen çekme yüksekliğine ulaşmasını

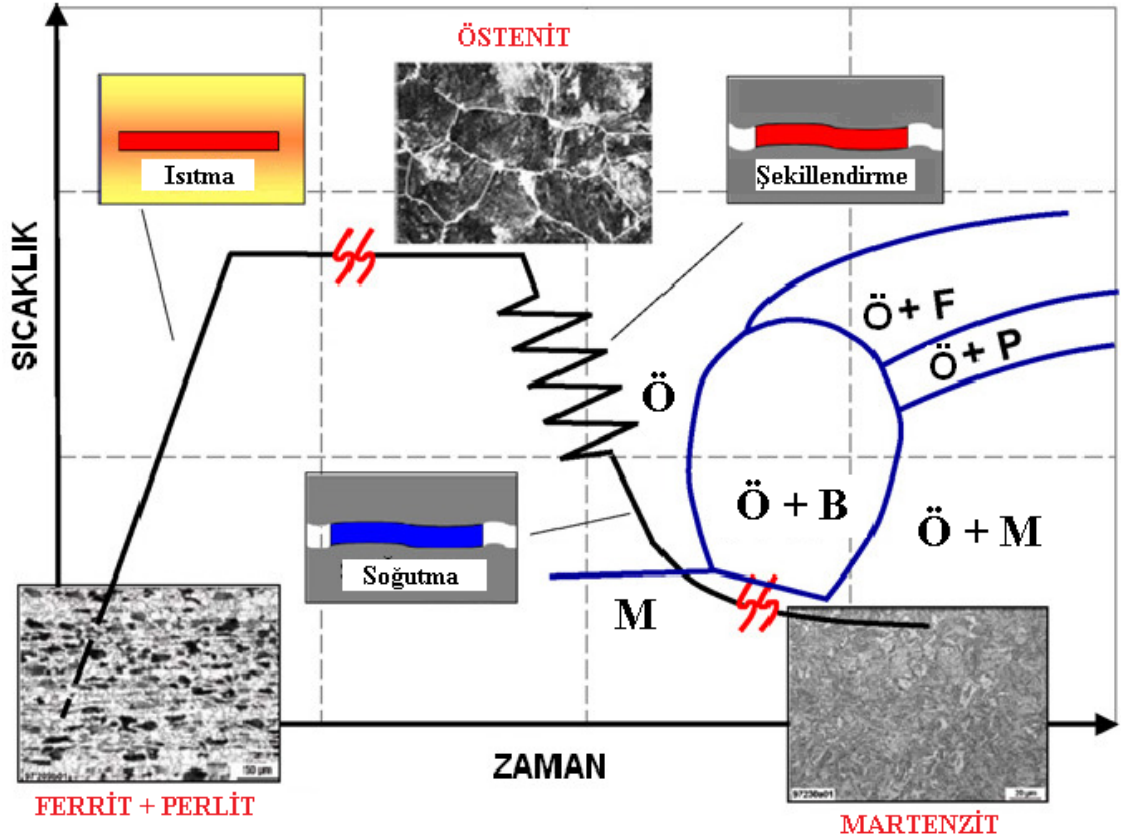
engeller (Gavas 2005). Derin çekme işleminin şematik gösterimi Şekil 2.14'te verilmiştir.



Şekil 2. 14. Derin Çekme İşleminin Şematik Gösterimi (Karalı 2007)

### 2.3.Sıcak Sac Şekillendirme İşlemi

Sıcak şekillendirme prosesi, östenitleme ve sertleştirme aşamalarından oluşan bir şekillendirme işlemidir. Malzemeye,  $900^{\circ}\text{C}$  den yüksek sıcaklıkta 5 dk. süre boyunca östenitleme işlemi uygulanır ve daha sonra soğutma kanalına sahip olan kalıplarda,  $30^{\circ}\text{C/s}$  den yüksek soğutma hızıyla soğutulması amacıyla kalıplara transfer edilir. Eğer soğutma hızı;  $30^{\circ}\text{C/s}$  den düşük olduğunda beynit, ferrit ve perlit gibi yapılar elde edilir (Bardelcık ve ark. 2010). Ancak bu durum istenmemektedir. Şekil 2.15 'de sıcak şekillendirme işleminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.15. Sıcak şekillendirme işleminin şematik gösterimi (Bariani ve ark. 2008)

Çarpışma özelliği iyi olan-hafif sacların elde edilmesi için yüksek mukavemetli çeliklerin soğuk şekillendirme işlemi gerçekleştirilmekte veya bor alaşımlı çeliklerin sıcak şekillendirme işlemi yapılmaktadır. Sıcak şekillendirme işlemi sürecinde, malzemenin çekme mukavemeti 1500 MPa' ın üzerinde bir değere ulaşır ve aynı zamanda malzeme büyük miktarda enerjiyi absorbe ederek küçük derecede deformasyonlara uğrar (Steinbeiss ve ark. 2007).

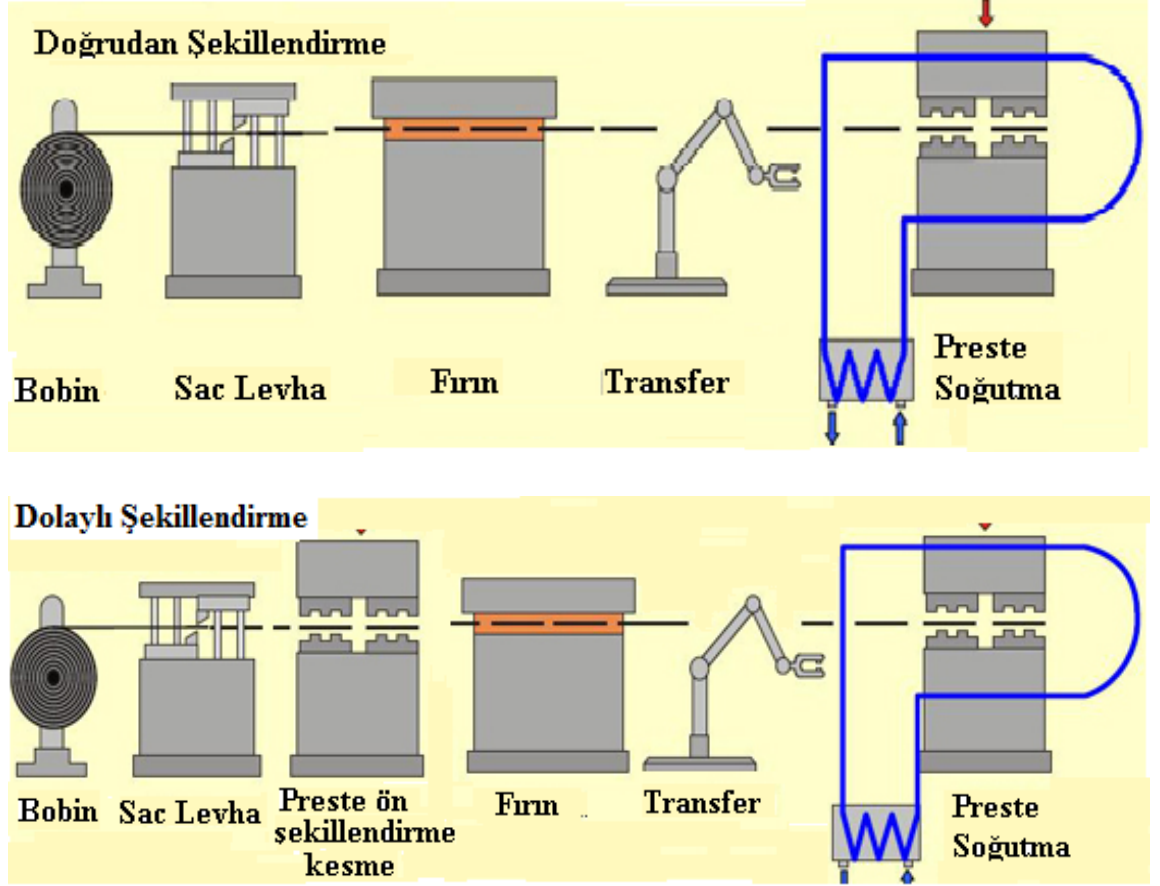
Bor alaşımlı çeliklerin sıcak şekillendirme işlemi soğuk şekillendirme işlemiyle karşılaştırıldığında bu işlemin avantajları aşağıdaki gibidir.

- Çok yüksek mukavemet ve yüksek süneklik
- Ağırlık azalması için çok yüksek potansiyele sahip olma
- İyi boyutsal doğruluk (minimum geri yaylanma)
- Kompleks geometrilerin üretimine olanak sağlama
- Mükemmel çarpışma davranışı (Steinbeiss ve ark. 2007).



### 2.3.1. Sıcak sac şekillendirme yöntemleri

Sıcak şekillendirme işleminde pek çok ısıtma yöntemi kullanılmakla birlikte, bu işlem doğrudan ve dolaylı olmak üzere 2 farklı yolla gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.16). Doğrudan sıcak şekillendirme; fırında ısıtma (geleneksel) ve elektrikle ısıtma olmak üzere 2 yöntemle elde edilmektedir.



Şekil 2.16. Doğrudan ve dolaylı şekillendirmenin karşılaştırılması  
(<http://www.fandmmag.com>, 2010)

Geleneksel (konvansiyonel) ısıl iyileştirme metodunda, sıcak şekillendirme işleminde büyük ocaklar kullanılır ve sac levha radyasyon ve konveksiyon yoluyla ısıtılır. Ocaklar ise; gaz veya elektrik yoluyla ısıtılır. Saclar ocağa getirilir ve östenit sıcaklığına kadar ısıtma işlemi, fırının içinden geçen yürüyen aksamlarla olur. Malzemeye Al-Si kaplama yapılırsa 12K/s ısıtma hızı gereklidir. Böylece, Al-Si tabakanın erimesi ve Fe' in Al-Si

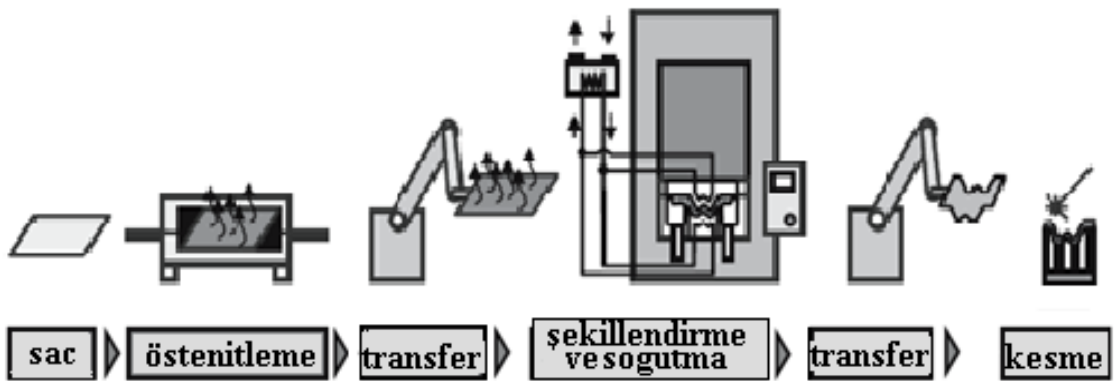
tabakaya difüzyon etmesi artmış olur. Östenitleme sıcaklığı olarak 1223 K ve ısıtma süresi olarak da 145 s seçilmelidir.

İletimle ısıtma da, ısınan parça bir güç kaynağı serisine bağlanır. İletimle ısıtmada verimli olan taraf sacın geometrisine bağlı olan ısıtmadır ve genellikle; boru, rod, tel ve bant gibi parçaların üretiminde kullanılır. Bununla beraber, bu teknoloji sac şekillendirme işleminde malzemelerin özelliklerini tanımlama da kullanılır ve yüksek ısıtma hızları elde edilir.

İndüksiyonla ısıtma, iletimle ısıtmaya benzer olarak malzemelerin özelliklerini tanımlamayı sağlar ve malzemenin yüksek ısıtma hızlarında tane kabalaşmasını önler (<http://www.fandmmag.com>, 2010).

### 2.3.1.1. Doğrudan sıcak sac şekillendirme işlemi

Doğrudan sıcak şekillendirme işlemi, basit parçalar için uygun olan ve daha çok kaplamalı bor alaşımları için kullanılan bir işlemdir. Bor alaşımlı malzemenin 4-10 dakika arası 900-950°C sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra, direkt olarak aynı hat üzerinde preste şekillendirmesi ile gerçekleşmektedir. Daha sonra şekillendirilmiş parça, kapalı kalıp içerisinde 20 -30 °C/s soğutma hızıyla soğutulur (Şekil 2.17). Son ürün, 1400-1600 MPa arasında çekme mukavemetine ve 1000-1200 MPa arasında akma mukavemetine sahip olan yaklaşık 150°C deki yüksek mukavemetli malzemedir (<http://www.fandmmag.com>, 2010).



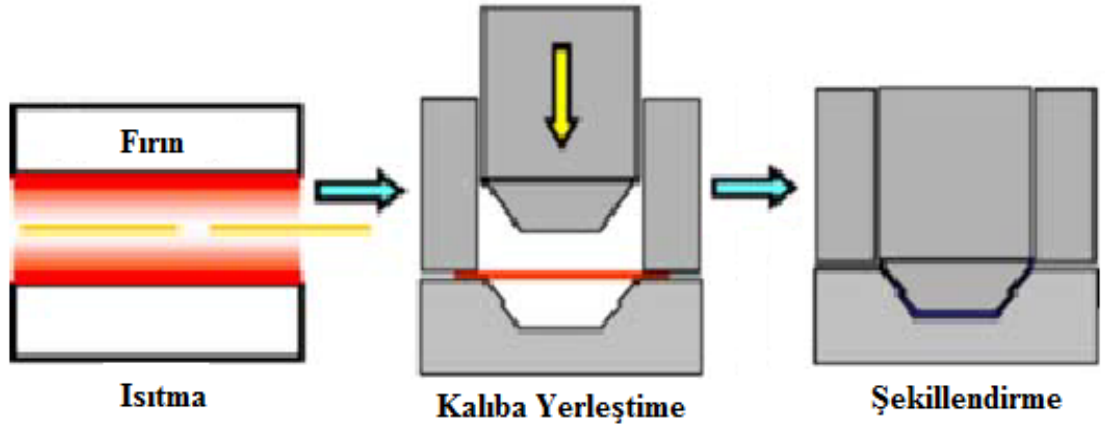
Şekil 2.17. Bor Alaşımlı Çelik için Doğrudan Sıcak Şekillendirme İşleminin Şematik Gösterimi (Steinbeiss ve ark. 2007)

### 2.3.1.1.1. Fırında ısıtma tekniği ile şekillendirme

Fırında ısıtma tekniği ile şekillendirme işlemi, bor alaşımli çelik malzemenin 900-950°C arasında olan östenitleme sıcaklığının üzerine çıkarılarak ısıtılması ve daha sonra sac levhanın presteki kalıplara transfer edilerek şekillendirilip soğutulmasıdır (Şekil 2.18).

Bu yöntemin dezavantajı; sacın fırın ile kalıplar arasındaki transferi esnasında yaklaşık 100°C lik hızlı sıcaklık azalmasıdır. Bu durumdan dolayı, sac levhanın yüksek sıcaklıklara ısıtılması gerekmektedir (Mori ve ark. 2005). Ancak, yüksek sıcaklıklara ısıtma, yüksek enerji sarfiyatına neden olmaktadır.

Bu yöntemin diğer bir dezavantajı ise, ısınan malzemenin kalıba transferi esnasında oksidasyona uğramasıdır (Mori ve ark. 2005).

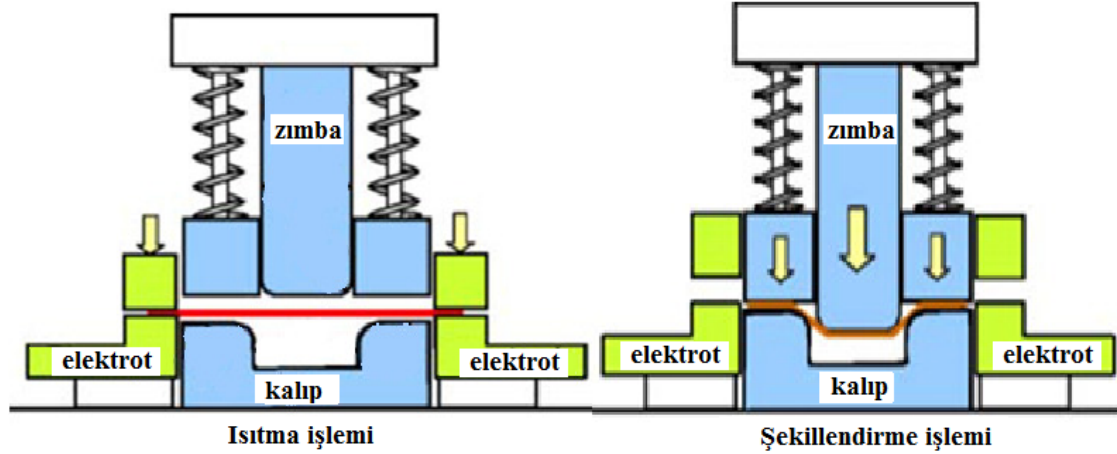


Şekil 2.18. Fırında ısıtma işleminin şematik gösterimi (Mori ve ark. 2005)

### 2.3.1.1.2. Elektrikle ısıtma tekniği ile şekillendirme

Elektrikle ısıtma yöntemi; preste bulunan kalıbın içerisine, şekillendirilecek metali ısıtmak amacıyla elektriksel dirençler yerleştirilerek gerçekleştirilir. Bu işleme, Joule ısıtması da denilmektedir. Rezistansla ısıtma sistemi presle senkronize halinde çalışmaktadır, aynı zamanda yüksek enerji verimliliği sağlayıp ve yoğunlaştırma aleti

barındırmaktadır. Elektrikle ısıtma işlemi, elektrotlar vasıtasıyla yapılır ve ardından sıcaklıkta düşüş olmadan hemen şekillendirme yapılır (Şekil 2.19). Isıtma sonundan şekillendirme başlangıcına kadar geçen süre 0,2 s dir ve elektrikleendirme için levha malzeme ile elektrot arasında uygulanan basınç 7,4 MPa dır (Mori ve ark. 2005).

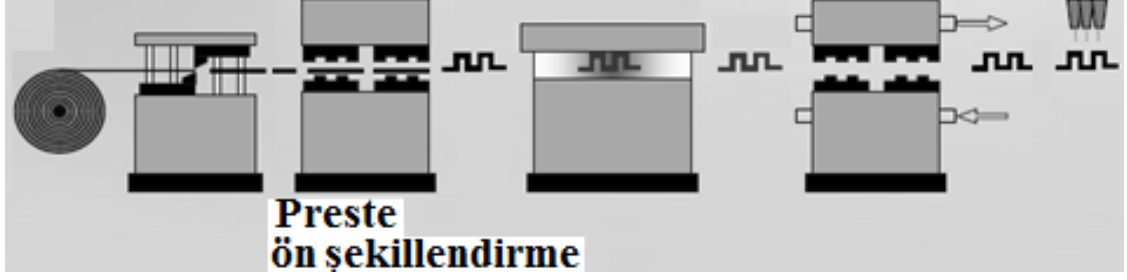


Şekil 2.19. Elektrikli Isıtma İşleminin Şematik Gösterimi (Mori ve ark. 2005)

### 2.3.1.2. Dolaylı sıcak şekillendirme işlemi

Dolaylı sıcak şekillendirme işlemi, kompleks parçalar için kullanılan ve sıcak şekillendirme aşamasından önce sacın soğuk olarak şekillendirildiği bir yöntemdir (Steinbeiss ve ark. 2007).

Sacın ön soğuk şekillendirme işlemi bittikten sonra, doğrudan şekillendirmede olduğu gibi malzeme fırında östenitleme sıcaklığının üzerine ısıtılır. Bu aşamadan sonra malzeme, şekillendirme işlemi için prese nakledilir ve kalıplarda şekillendirme işlemi tamamlanır. En son aşama olan kalıp içerisinde soğutma işleminden sonra, malzeme kesme işlemi ile son ürüne ulaşılır (Şekil 2.20).



**Şekil 2.20.** Dolaylı Sıcak Şekillendirme İşleminin Şematik Gösterimi  
(<http://mdl.webteem.co.kr>, 2012)

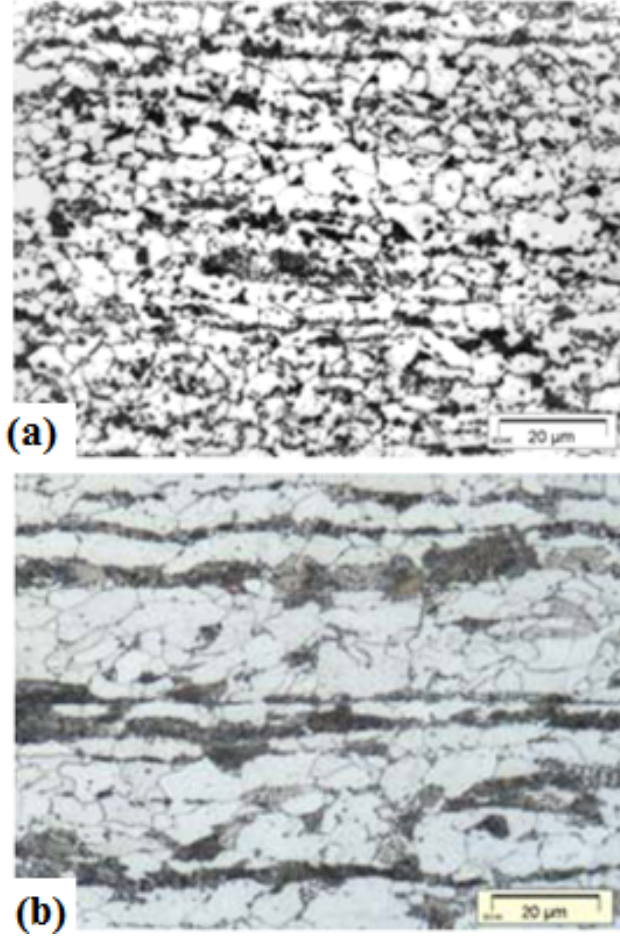
#### 2.4.22MnB5 (Usibor 1500) Çelik Malzeme

Sıcak şekillendirme işleminde yaygın olarak kullanılan malzeme Usibor 1500 dür. Bu malzeme, 22MnB5 çelik malzeme üzerine Al-Si koruma tabakası kaplanarak elde edilen yüksek mukavemetli bir çeliktir. Şekil 2.21’ da, şekillendirme sonrası, ana malzeme ve kaplamanın optik görüntüleri görülmektedir.



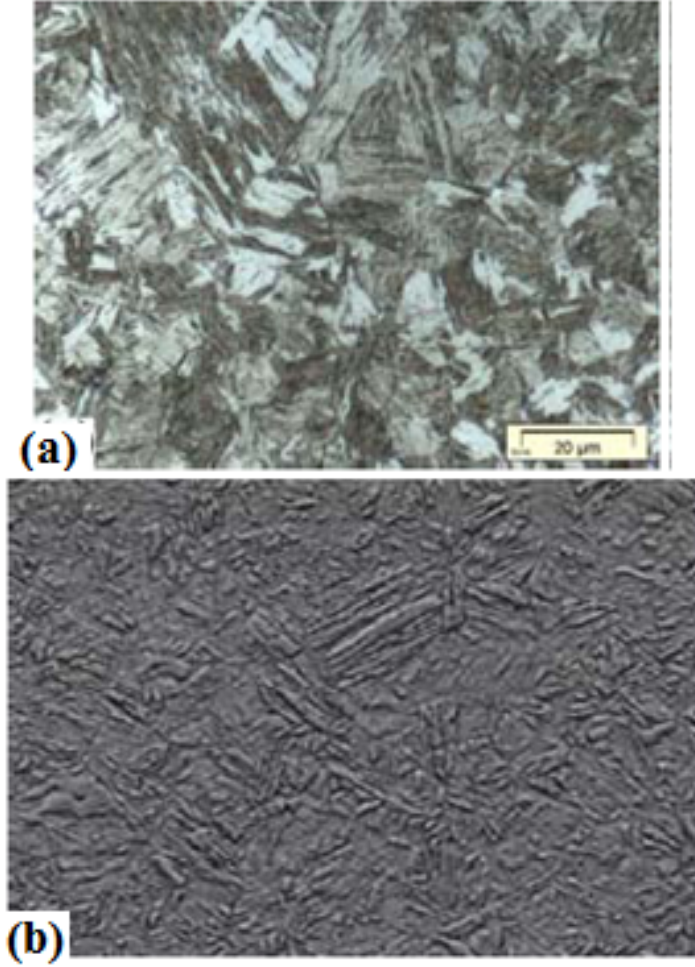
**Şekil 2.21.** Usibor 1500 ana malzeme ve kaplamanın optik mikroskop görüntüleri  
(<http://www.arcelormittal.com>, 2012)

Başlangıçta, malzemenin çekme mukavemeti yaklaşık olarak 600 MPa ve mikro yapısı ferritik-perlitik iken (Şekil 2.22), sıcak şekillendirme işlemi sonrası yaklaşık olarak 1500 MPa dır ve mikro yapı ise martenzittir (Şekil 2.23). Bu süreçte, soğutma hızı büyük önem teşkil etmektedir. Kritik soğuma hızının üzerindeki hızlarda soğuma işlemi gerçekleştirilmelidir ve böylece istenen yapı olan martenzit elde edilir (Naderi ve ark. 2007).



**Şekil 2.22.** Şekillendirme öncesi optik mikroskop ile çekilmiş mikro yapı örnekleri a) 1 mm sac kalınlığındaki malzeme b) 2,8 mm sac kalınlığındaki malzeme (Naderi ve ark. 2007)





**Şekil 2. 23.** Sıcak şekillendirme işlemi uygulanmış malzemelerin optik mikroskop ve SEM görüntüleri a) 950oC’de 10 dk. bekletilen 1 mm. lik sacın optik mikroskop görüntüsü b) 950oC’de 10 dk. bekletilen 1 mm. lik sacın SEM görüntüsü (Naderi ve ark. 2007)

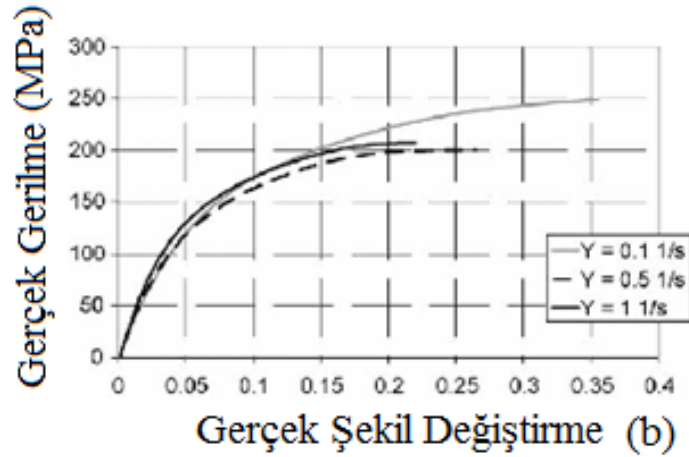
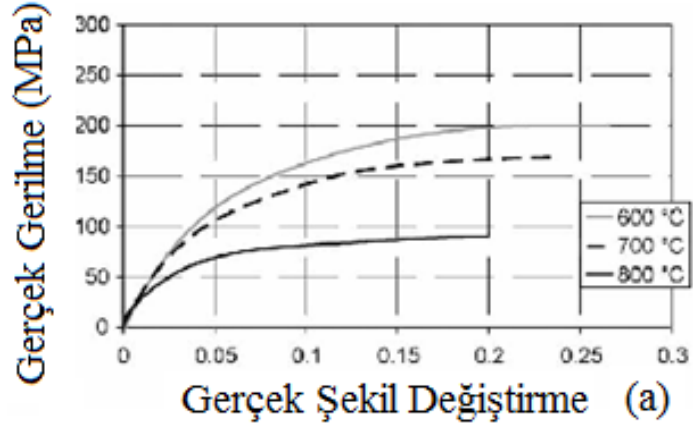
22MnB5 malzemenin kimyasal bileşime bakıldığında, % 0.2 civarında karbon ihtiva ettiği görülmektedir. Bunun dışında; mangan, bor, silisyum, krom, kurşun, titanyum ve azot gibi elementler de malzeme içeriğinde bulunmaktadır. Çizelge 2.1’ de malzemenin ve kaplamanın kimyasal kompozisyonu gösterilmektedir (Jong ve ark. 2011).

**Çizelge 2.1.** Usibor 1500 malzemenin ve kaplamanın kimyasal kompozisyonu(%)(Jong ve ark. 2011)

	Kimyasal Kompozisyon (%)									Kaplama (%)	
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ti	Al	B	Al	Si
USIBOR 1500	0.23	0.24	1.19	0.0006	0.0015	0.18	0.04	0.03	0.0023	90	10

#### 2.4.1. 22MnB5 (Usibor 1500) çelik malzeme ile ilgili yapılan çalışmalar

Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda, 22MnB5 malzemesinin sıcak şekillendirilme işlemi ve mekanik-metalurjik özellikleri ile ilgili çeşitli kaynaklara rastlanmıştır. Turetta ve ark. (2006) yaptıkları çalışmada 22MnB5 malzemenin ZSD (**Zaman-sıcaklık-dönüşüm**) eğrilerini elde etmek için farklı sıcaklık ve şekil değişimi hızlarında çekme testleri gerçekleştirmiştir. Böylece, malzemenin yüksek sıcaklıklarda akış eğrileri adı da verilen  $\sigma$ - $\epsilon$  grafikleri elde edilmiştir. Şekil 2.24' de, bahsedilen çalışmada elde edilen gerilme- şekil değişirme grafiklerine örnekler verilmiştir.

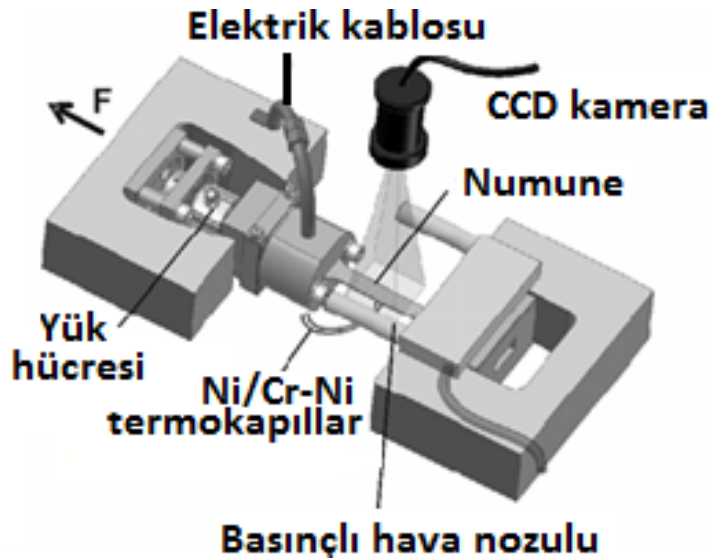


**Şekil 2.24.** Farklı sıcaklık ve şekil değişimi hızlarında elde edilen örnek  $\sigma$ - $\epsilon$  grafikleri, a) 600-700-800°C sıcaklıklarında ve  $0,5 \text{ s}^{-1}$  çekme hızı için grafik b) 600°C'de ve  $0,1$ - $0,5$ - $1 \text{ s}^{-1}$  çekme hızları için grafik (Turetta ve ark. 2006)



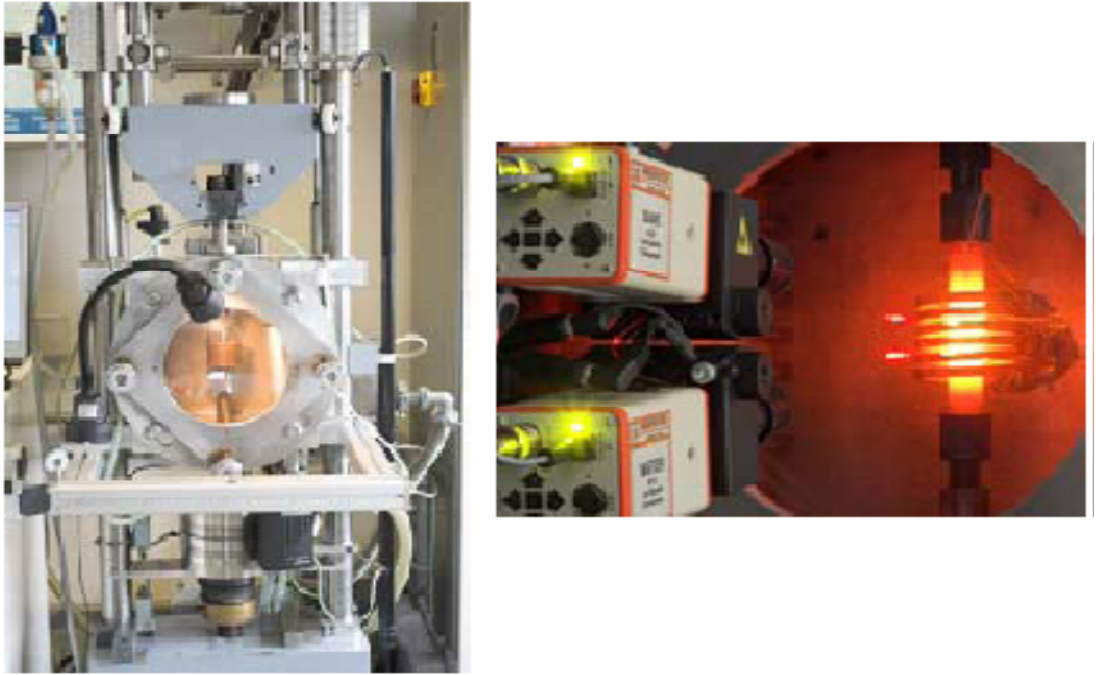
Malzemenin termo-mekanik özelliklerinin belirlendiği bir diğer çalışma ise Jang J-H ve ark. (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmadır. Uygulanan çekme testleri, 100-900°C arasında ve deformasyon hızları ise; 0,02 ve 0,2 s<sup>-1</sup> dir. Çalışmanın diğer kısmında ise, derin çekme testleri ılık olarak gerçekleştirilmiş ve malzemeler, 800-950°C ye kadar ısıtılıp bu sıcaklıklarda 3 dakika bekletilmiştir. Daha sonra 5 mm/s zımba hızıyla derin çekme işlemi uygulanıp ardından hızlı bir şekilde soğutulmuştur.

22MnB5 malzemesinin akış eğrilerinin elde edilmesiyle ilgili bir diğer çalışma, Merklein ve Lechler (2006) tarafından gerçekleştirilmiştir. Malzemenin tek eksenli çekme deneyleri gerçekleştirilirken akış eğrilerini etkileyecek olan parametreler olarak belirlenen parametreler; hadde yönü, sıcaklık, şekil değişim hızı ve soğutma hızıdır. Hadde yönü olarak 0°, 45° ve 90°; sıcaklık aralığı olarak 500 - 800°C seçilmiştir. Ayrıca 0,01 s<sup>-1</sup>, 0,1 s<sup>-1</sup> ve 1 s<sup>-1</sup> olmak üzere 3 adet şekil değişim hızı; 50 K/s ve 80 K/s olmak üzere 2 adet soğuma hızı seçilmiştir. Numunelerin uzamaları, optik deformasyon ölçüm sistemi olan ARAMIS (GOM) ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan test sistemi, Şekil 2.25’ de gösterilmiştir.



**Şekil 2.25.** Yüksek mukavemetli çelikler için örnek bir termo-mekanik çekme testi sistemi (Merklein ve Lechler 2006)

Tungtrongpairoj ve ark. (2009), 22MnB5 malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, 900 - 1200°C sıcaklık ve 0,001 – 0,1 s<sup>-1</sup> şekil değişim hızları aralığı kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Çekme deneyleri boyunca, deforme olmuş numunedeki lokal şekil değişimini ölçmek amacıyla lazer nokta ekstensometre (LSE) kullanılmıştır. LSE; iki adet lazer ve kameradan oluşmaktadır. Çalışmada ayrıca, sıcaklık ve şekil değişim hızının, bor alaşımli çeliklerin plastik davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Şekil 2.26' da, çalışmada kullanılan termo-mekanik çekme testi sistemi görülmektedir.

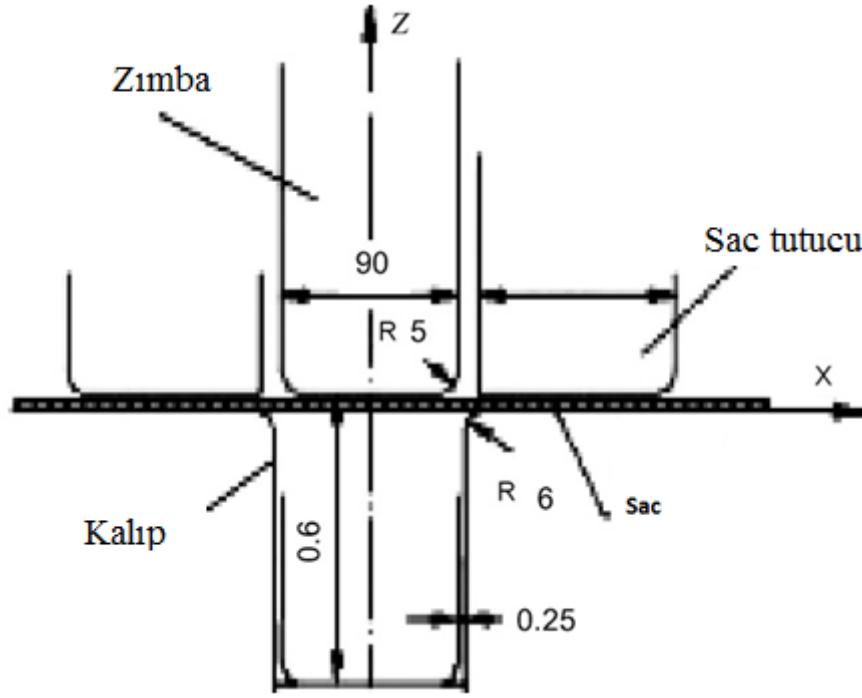


**Şekil 2. 26.** Yüksek mukavemetli çelikler için örnek bir termo-mekanik çekme testi sistemi (Tungtrongpairoj ve ark. 2009)

Elde edilen mekanik özelliklerin en büyük yararı, nümerik analizlerin malzeme modelinde kullanılacak olmasıdır. Literatür araştırması genişletildiğinde, 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin, sonlu elemanlar yöntemiyle analizi ile ilgili çeşitli çalışmalara rastlanmıştır.

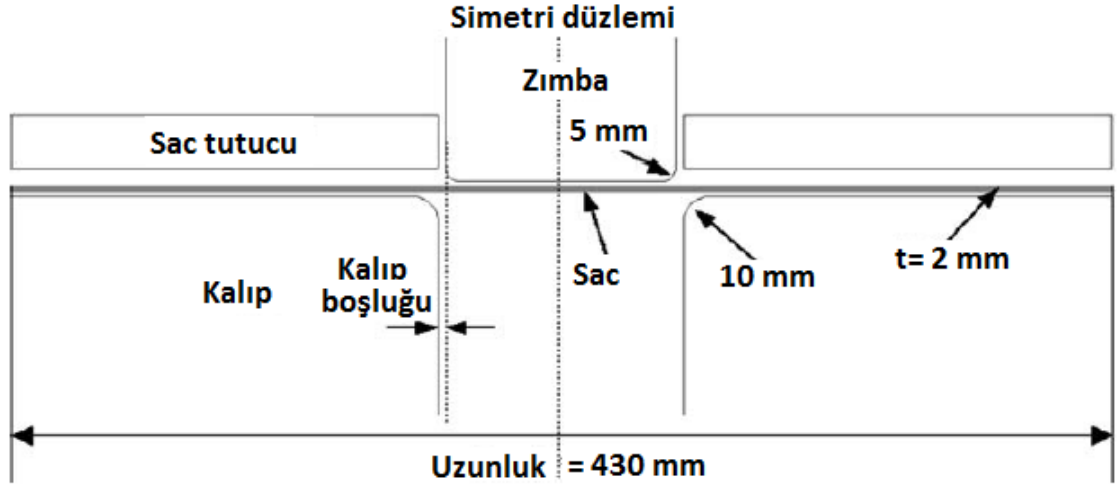
Xing ve ark. (2009), 22MnB5 malzemenin yüksek sıcaklıkta mekanik özellikleri belirlendikten sonra, FEM simülasyonu gerçekleştirilmiştir. FEM simülasyonunda 300

mm genişlikte, 410 mm uzunlukta ve 2,1 mm kalınlıkta levha metal kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca; zımba genişliği, flanş uzunluğu, zımba radyüsü, kalıp radyüsü ve zımba kalıp arasındaki açıklık değerleri verilmiştir. Simülasyonda malzemenin ısıtılma sıcaklığı; 900 ° C ve zımbalanma süresi 1 s dir. Su vermeyle soğutma süresi ise 10 s dir. Çalışmada kullanılan model Şekil 2.27’ de gösterilmiştir.



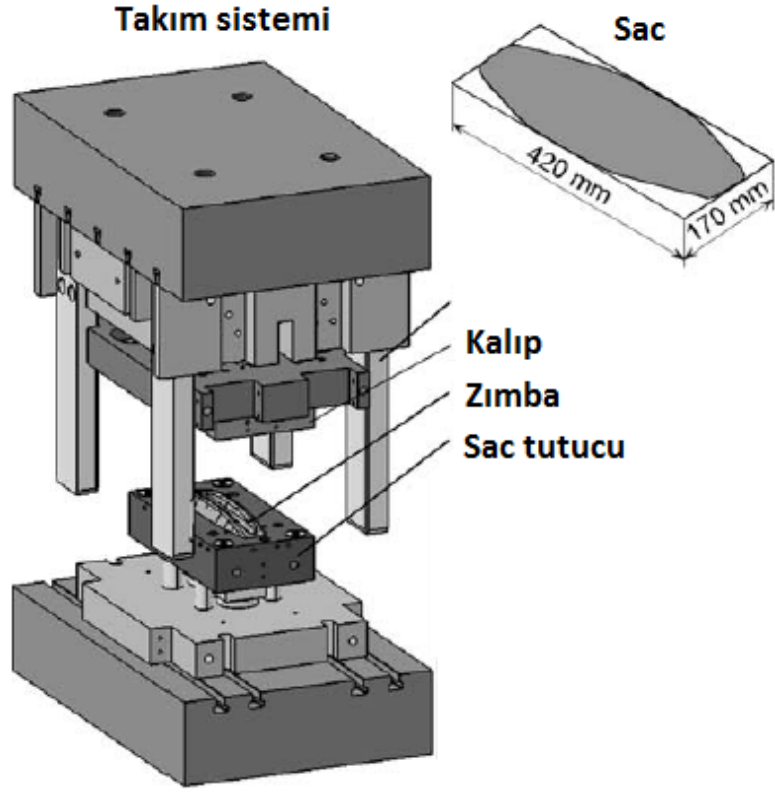
Şekil 2.27. Sıcak şekillendirme simülasyonunda kullanılan örnek bir model (Xing ve ark. 2009)

Nümerik bir çalışma olan Liu ve ark. (2009) ’nın yaptığı araştırmada ilk olarak, 22MnB5 malzemenin akış davranışını incelemek amacıyla sıcak çekme testleri yapılmıştır. Daha sonra, Abaqus/Explicit programında şapka şeklindeki parçaların sıcak şekillendirme simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, takım ve sac levha arasındaki temasta iyileştirme, malzeme karakteristiklerinin ve mesh işleminin tanımlanması gibi işlemler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, nümerik simülasyon yapılmasının sebebi olarak sacı tutan kuvvetin ve şapka şeklinde yapılan sıcak şekillendirme işlemindeki kalıp boşluğu etkisinin araştırılması açıklanmıştır. Şekil 2.28’ da, bahsedilen çalışmada kullanılan model gösterilmektedir.



**Şekil 2. 28.** Sıcak şekillendirme simülasyonunda kullanılan örnek bir model (Liu ve ark. 2009)

Tekkaya ve ark. (2007)'nin yaptığı çalışmada, simülasyonda kullanılmak üzere malzemenin mekanik özellikleri deneylerden elde edildikten sonra, simülasyon işlemi; MARC 2005 ve PAMSTAMP 2G programlarıyla gerçekleştirilmiştir. Sac için, her 2 modelde de, kabuk eleman kullanılmıştır. Takımlar için termal modelde, hacim elemanı ve mekanik modelde ise, yüzey elemanı kullanılmıştır. İş parçası ile kalıplar arasındaki sürtünme katsayısı ise;  $\mu = 0.2$  dir. Simülasyon işleminde, sac levha takım içinde 3 s. tutulur daha sonra şekillendirilir ve 3 s boyunca soğutma işlemi yapılır. Şekillendirme işleminden sonra şekillendirilen levha kalıplar içinde  $150^{\circ}\text{C}$ 'a 15 s. içinde soğutulur. Sac kalınlığı ise 1,75 mm dir. Prosesin başlangıcında, takımların sıcaklığı  $20^{\circ}\text{C}$  dir. Çalışmada kullanılan takım sistemi ve sac malzeme, Şekil 2.29'de verilmiştir.



**Şekil 2. 29.** Sıcak şekillendirme işleminde kullanılan örnek bir takım ve sac malzemeden oluşan sistem (Tekkaya ve ark. 2007)

22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin termo-mekanik özelliklerin elde edilmesi ve nümerik çalışmalarında haricinde farklı araştırmalar da bulunmaktadır.

Suehiro ve ark. (2003)'ün yapmış olduğu çalışmada USIBOR 1500 adı verilen Al kaplamalı levha metalin, sertlik- tokluk- punta kaynağı uygulanabilirlik-boyama ve korozyon direnci gibi özellikleri araştırılmıştır.

Sıcak şekillendirme işlemindeki ele alınacak önemli konulardan biri de, ısı transferidir. Abdulhay ve ark. (2009), sıcak şekillendirme prosesinin simülasyonunu daha iyi açıklayabilmek için, deneysel bir alet dizayn edip, bahsi edilen proste ısıl yüzey direncini (thermal contact resistance-TCR) ölçmüştür. Bu parametre, Z160 çeliğinden yapılmış olan takım ve Usibor 1500P sac levhası arasındaki kontak yüzeyindeki ısı transferi hassasiyetini karakterize etmektedir.



**Şekil 2. 30.** Sıcak şekillendirme işleminin örnek bir deneysel düzeneği (Abdulhay ve ark. 2009)

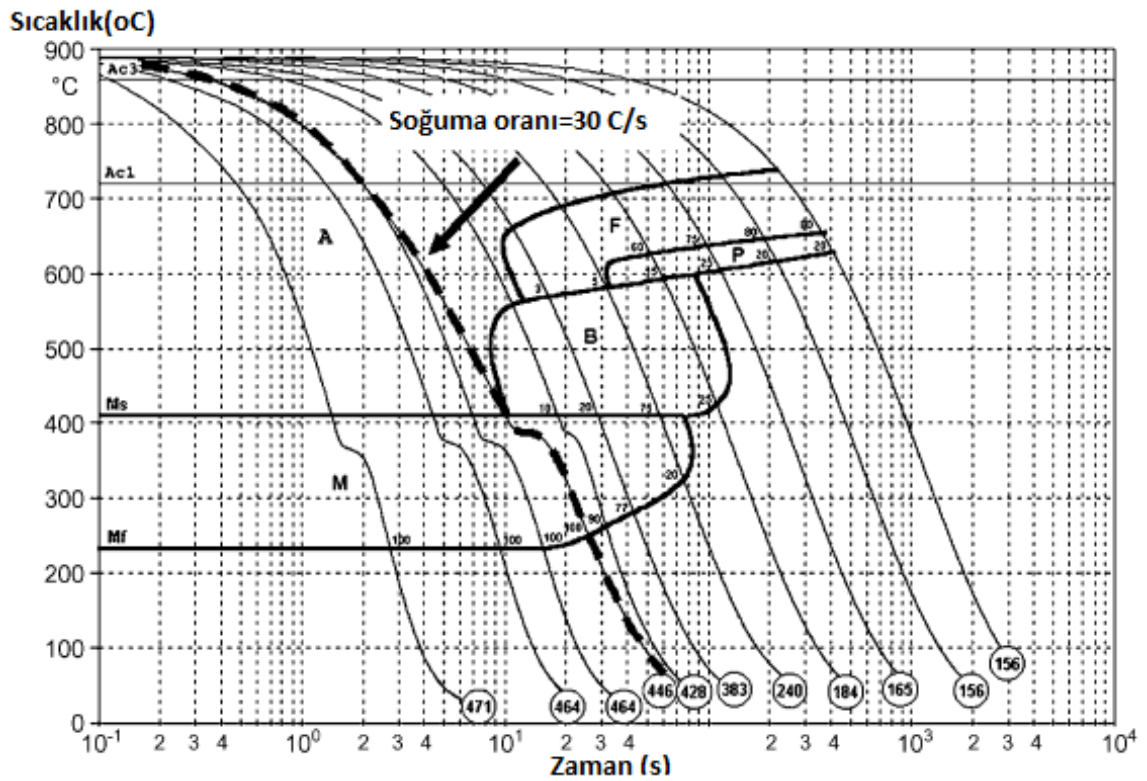
Şekil 2.30'da ki hidrolik pres 6 tonluk bir prestir ve sac levha 930°C de östenit fazı oluşuncaya dek beklenir. Daha sonra, bahsedilen hidrolik prese transfer edilir ve sıcak numune, zımba ve kalıp arasında direkt temasta soğutulur.

Bir diğer ısıl analiz çalışmasıysa, Merklein ve ark. (2009)'ı tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, 22MnB5 malzemenin soğuma davranışı karakterize edilmeye çalışılmıştır. Belirlenen soğutmalı kalıpta; farklı temas basınçları, kalıp sıcaklıkları ve kalıp boşlukları için sıcak şekillendirme işlemi yapılmıştır. Araştırmalar sonucunda, basınç zorlamasına bağlı olarak yüksek kalıp sıcaklığında yüksek ısı transferi katsayısı elde edildiğine varılmıştır.

Bir diğer çalışma ise, Mori ve Ito (2009)'nun yapmış olduğu, sıcak şekillendirme işleminde elektrikli ocakta ısıtma esnasında oluşan oksidasyonu önlemek amacıyla gerçekleştirilen çalışmadır. Bu amaçla, oksidasyon önleyici yağ kaplama uygulanmıştır. Çalışmada 2 çeşit oksidasyon önleyici yağ kullanılmıştır. Kaplanmayan levha için, oksit tabakası 800 °C de oluşmuş ve 850 °C de ise pul pul dökülme gözlemlenmiştir. A yağı için ise; 850 °C de pul pul dökülme gözlemlenmemiş ve B için ise, 900 °C de çok

az olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada ayrıca, kaplamalı levhanın sıcak şapka formunda eğilme işlemi gerçekleştirilmiştir.

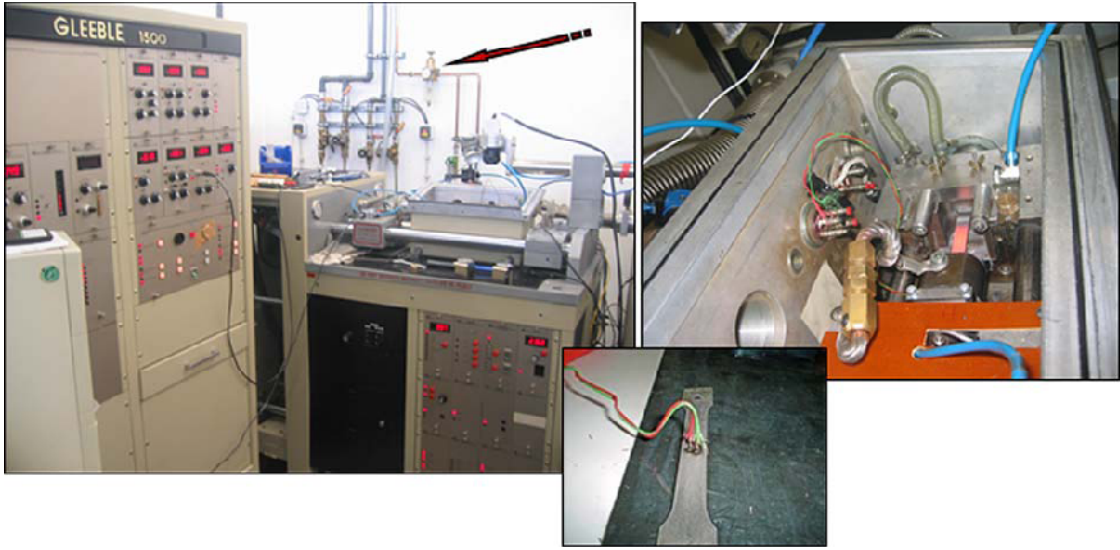
Naderi ve ark. (2008)' nin yaptığı çalışmada, izotermal olarak deforme edilen tek eksenli bası testleri 600-900 ° C arasında ve 0,1-1-10 s<sup>-1</sup> deformasyon hızları kullanılarak yapılmıştır. Plastik davranışla ilişkilendirmek amacıyla 2 adet model ortaya konulmuştur. Bunlar; Voce–Kocks combined modeli ve Molinari–Ravichandran modelleridir. Malzemenin ZSD (Zaman-sıcaklık-dönüşüm) diyagramları (Şekil 2.31); dilatometre testleri, metalografik araştırmalar ve sertlik ölçümleriyle elde edilmiştir. 900 °C de 5 dk. östenitleme işleminden sonra, soğutma işlemi gerçekleştirilmiş ve tüm yapı martenzite dönüştürülmüştür. 30 K/s den yüksek soğutma hızında tamamen martenzit yapı gözlemlenirken, daha düşük soğutma hızlarında ise beynit ya da ferrit yapısı oluşur ve bu durum da daha düşük sertlik ve mukavemete sebep olur. Bu çalışmada seçilen soğuma hızı ise, 50 °C/s dir.



Şekil 2.31.22MnB5 Malzemenin ZSD diyagramı (Naderi ve ark. 2008)



Barcellona ve Palmeri (2009), bor alaşımlı- alüminyum kaplamalı malzemenin 873-1223 K sıcaklık aralığında ve  $0,08 \text{ s}^{-1}$  sabit Şekil değişim hızında olmak üzere; Şekil değişimi, dönüşüm sıcaklıkları, mikro yapı ve mikro sertlik üzerine etkileri araştırılmıştır. Diğer taraftan, tüm termo mekanik işlemler Gleeble 1500 isimindeki test simülatörü (Şekil 2.32) ile geręekleřtirilmiř ve deneysel sonuçlara göre, sabit soğuma oranında sıcak deformasyon miktarı arttığa sertliğin düştüğü sonucuna varılmıştır.



**Şekil 2. 32.** Bor alaşımlı malzemenin termo-mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan Gleeble test simülatörü (Barcellona ve Palmeri 2009)

22MnB5 bor alaşımlı çelik malzeme, Lee ve ark. (2009)' ı tarafından da incelenmiştir. Belirlenen çekme numuneleri sırasıyla; östenitleme, martenzit dönüşüm için soğutma ve 150- 520°C sıcaklık aralığında temperleme işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra, 1,7 ppm miktarında hidrojene maruz bırakılmış ve test edilmiştir. Deneysel sonucunda, martenzit yapıdaki malzemelerin daha gevrek olduğu, ayrıca 460 ve 520°C lerde temperlenen numunelerin, hidrojenin sebep olduğu gevrekliğe hassasiyet gösterdiğine ulaşılmıştır.

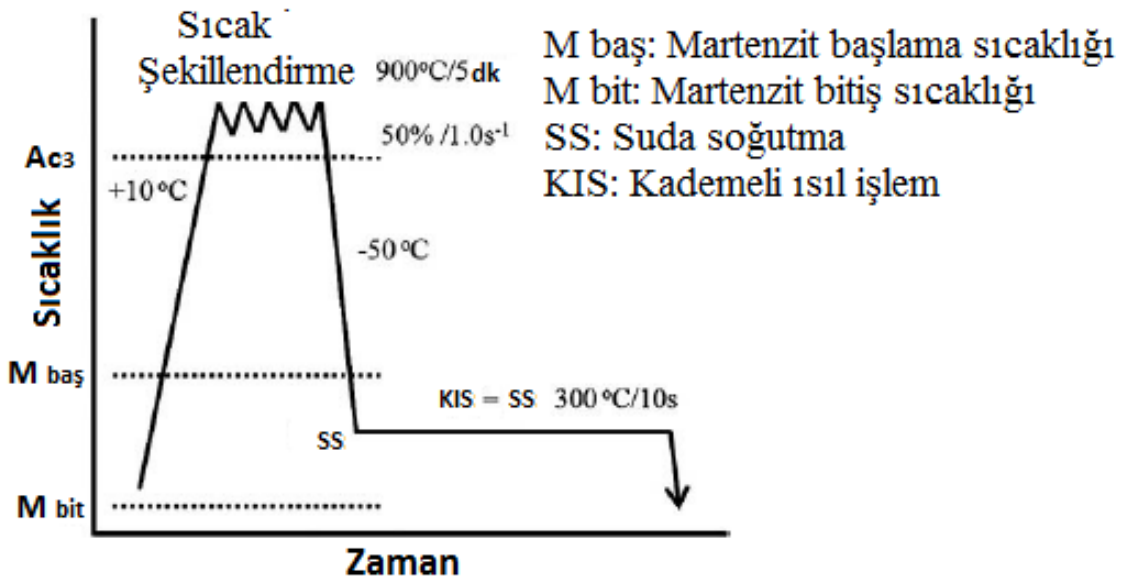
Chang ve ark.(2011)'ı ise, 22MnB5 malzemenin sıcak Şekillendirme işlemiyle ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla, ısıtılan bor alaşımlı çelik malzeme, prese transfer edilerek- su soğutmalı kalıpta Şekillendirme esnasında su verme işlemine tabi tutulmuştur. Şekillendirme sonucunda, 900°C civarında ısıtılıp kalıpta su ile soğutulan



malzeme uniform bir martenzitik yapıya ulaşılmıştır. Optimum çekme ve akma mukavemetleri sırasıyla; 1530 MPa ve 1000 MPa olarak şekil deformasyonu ise 23% olarak tespit edilmiştir.

Kolleck ve ark. (2009), 22MnB5 bor alaşımlı malzemenin ısıtılması için, alternatif bir metot geliştirmiş ve benzer özelliklere konvektif ısıtmaya göre indüksiyon ısıtma ile ulaşılmıştır.

Liu ve ark. (2010)'nın sıcak şekillendirme işlemi ile ilgili yapmış olduğu çalışmada, belirli bir sıcaklığa kadar suda kontrollü soğutma ve daha sonra kademeli ısıtma işlemi olarak isimlendirilen bir proses uygulanmıştır. Kademeli ısıtma işlemi sonucunda, martenzit yapı ve kalıntı östenit oluşumu gözlemlenmiştir. Mikro yapıyı incelemek amacıyla, 900 °C östenitleme sıcaklığına 10 °C/s hızla ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 5 dk. bekletilmiş ve daha sonra, 50 °C/s hızla 300 °C ye soğutulmuştur. Çalışmada bahsedilen ısıtma işlemi, Şekil 2.33'de gösterilmektedir.



Şekil 2. 33.Bor alaşımlı malzeme için kademeli ısıtma işlemi (Liu ve ark. 2010)

Bir başka çalışmada ise, Ikeuchi ve Yanagimoto (2011) sıcak şekillendirme işleminde ürüne etkileyen etkileri doğrulamak amacıyla bir metod geliştirmiştir. Bu sistem; sacın sıcaklığı, zımbanın hareketi, dışı kalıba olan ısı yayılımı için kullanılmaktadır.

Hongtu ve ark. (2010)' ın, sıcak şekillendirme çeliklerinin çarpışma davranışları üzerine hem deneysel hem de sonlu elemanlar analiz yöntemlerini kullanarak bir çalışma yapmışlardır ve bu çalışmanın sonucunda, sıcak şekillendirilebilir çeliklerin daha yüksek mukavemet sergiledikleri ve böylelikle %20 oranında ağırlık azalımı sağladıkları sonucuna varılmıştır.

U kanal şeklindeki bir modelin, sonlu elemanlar yöntemiyle 2 boyutlu analizinin gerçekleştirildiği Liu ve ark. (2010)' nın yaptığı çalışmada, aynı zamanda 22MnB5 malzemenin farklı deformasyon hızları ve yüksek sıcaklıklardaki çekme deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, model deneysel olarak da denenmiş ve geri yaylanma davranışı simülasyonlarla benzer özellikler göstermiştir.

Liu ve ark.(2011)' nın yapmış olduğu bir başka çalışmada, şekillendirmeye başlangıç sıcaklığı ve sac-kalıp arasındaki temasın mikro yapı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Aynı zamanda, şekillendirmeye başlangıç sıcaklığı ve sac tutma kuvvetinin geri yaylanma davranışı üzerindeki etkileri de tespit edilmiştir. Yüksek başlangıç sıcaklıkları ve yüksek sac tutma kuvvetlerinde, geri yaylanmanın daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Nümerik bir çalışma olan Bai-liang ve ark. (2010)'nın gerçekleştirdiği çalışmada, çarpışma önleyici bir parçanın sıcak şekillendirme simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme parametreleri olarak; şekillendirme hızı (pres hızı); 20-25-30-50-100-150 ve 200 mm/s, sacın başlangıç sıcaklığı; 850°C ve 900°C ve ayrıca, su verme aşaması için 5 s. ve 10 s. lik zamanlar belirlenmiştir. Daha sonra, bu parametrelerin sıcak şekillendirme işlemi sonunda gerilme, sıcaklık ve kalınlık dağılımları incelenmiş ve uygun simülasyon sonucuna bağlı olarak, deneysel doğrulama işlemi yapılmıştır.

Naderi ve ark. (2011)'nin yapmış olduğu bir başka çalışmada ise, bor kaplamalı olmayan dört farklı sıcak şekillendirilebilir çeliğin suda ve nitrojen ortamında soğutma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu soğutma ortamları kullanılarak, belirlenen bir model için şekillendirme işlemi yapıldıktan sonra, nihai ürünün alt ve yan yüzeylerinden alınan numunelere sertlik ölçümü ve mikro yapı analizleri gerçekleştirilmiş, çekme deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak; nihai ürünler 600–1100MPa aralığında akma mukavemeti, 900–1400 MPa aralığında çekme mukavemeti sergilemişlerdir. Nitrojenle soğutma martenzitik yapıyla beraber en yüksek mukavemet değerini oluştururken, suda soğutma ile ferrit tanelerinin oluşumuna sebep olup, en iyi şekillendirilebilme özelliği elde edilmiştir.

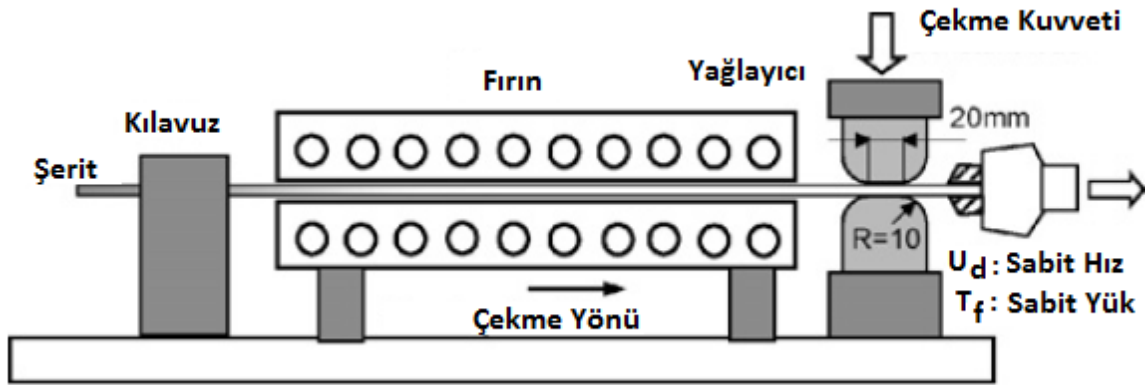
Naderi ve ark. (2011)'nin yapmış olduğu bir diğer deneysel çalışmada ise, sıcak şekillendirilebilir- bor alaşımsız dört çelik ve sıcak şekillendirilebilir- bor alaşımlı beş çelik malzemenin, su veya nitrojen soğutmalı kalıplarda sıcak şekillendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, tüm çelik malzemelerin şekillendirme sonucundaki mikro yapı analizleri ve çekme deneyleri gerçekleştirilmiş ve şekillendirme sonucunda bor alaşımlı çelikler tamamen martenzitik veya beynitik yapı sergilerken; bor alaşımsız çeliklerde martenzit ve beynitik yapının yanında ferrit taneleri olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bor alaşımlı çelikler, 650-1370 MPa ve 850-2000 MPa aralığında mukavemet değerine sahipken, bor alaşımsız çelikler bu değerler 600-1100 MPa ve 900-1400 MPa aralığında olmuştur.

Geiger ve ark.(2008)'nin yapmış olduğu deneysel- analitik- nümerik çalışmada, bor-mangan alaşımlı 22MnB5 malzemenin sıcak şekillendirme esnasında oluşan sürtünme olayındaki  $\mu$  sürtünme katsayısı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, yüksek sıcaklıklarda derin çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir ve nümerik analiz kısmında Autoform yazılımı kullanılmıştır. Sonuç olarak, sürtünmeyi etkileyen en önemli parametrenin sac sıcaklığı olduğu sonucuna varılmıştır.

Ying ve ark.(2010)'nin yapmış olduğu bu çalışmada, belirlenen sıcak şekillendirilecek kapı kirişi için yırtılma ve geri yaylanma davranışları araştırılmıştır. Japon standartlarına göre BR1500HS ile adlandırılan 22MnB5 malzeme, 920°C de 5dk.

tutulmuş, daha sonra sıcak şekillendirme kalıbına transfer edilmiş ve 10 s. boyunca şekillendirme yapılmıştır. Çalışma sonucunda, yırtılmanın ana sebebi olarak sac ile kalıp arasındaki sürtünme olduğu tespit edilmiş ve bunun önüne geçebilmek adına sürtünmenin azaltılması gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca, şekillendirme için sac tutma kuvvetinin de gerekli olmadığı sonucuna varılmıştır.

Yanagida ve Azushima (2009)' nın yapmış olduğu bu çalışmada, sıcak şekillendirme işleminde meydana gelen sürtünmelerde oluşan sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Bu katsayıların belirlenmesinde, tribosimülator adı verilen bir sistem kullanılmıştır (Şekil 2.34). Bahsedilen deneylerde, SPHC ve 22MnB5 çeliklerinin kuru ortam şartlarında sürtünme katsayıları belirlenmiş ve 22MnB5 çeliğinin sıcak şekillendirilme işleminde daha yüksek sürtünme katsayısı değerine sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, yağlayıcı kullanılan durumlarda kuru ortama nazaran daha düşük sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Bununla beraber, yağlayıcı kullanılmasının, zımbalama kuvvetinin ve kalıp aşınmasının azaltılması için etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.



**Şekil 2. 34.** 22MnB5 çeliğinin sürtünme özelliklerini incelemek amacıyla kullanılan tribosimülator (Yanagida ve Azushima 2009)

So ve ark. (2012)' nin yaptığı çalışmada, 22MnB5 ultra yüksek mukavemetli çelik malzemenin kesme işleminde takım ömrünün artırılması ve nihai ürünün daha kaliteli olmasını sağlayabilecek daha ekonomik kesme metotları araştırılmıştır. Çalışmada özellikle, farklı zımba- dişi kalıp açıklıklarını denenebileceği bir test düzeneği oluşturulmuştur. Sonuç olarak, kesme yükünü azaltarak takım ömrünü artırmak için

sıcak şekillendirme işlemiyle aynı anda yapılan ılık kesme işlemini gerçekleştiren bir sistem önerilmiştir.

Choi ve ark. (2011) şekillendirme sonucu oluşan buruşmayı önleyecek yeni bir sac tutucu önermiştir. Bahsedilen bu tutucuda, sac ve takımlar arasında direkt temas gerçekleşmemekte ve böylelikle şekillendirme esnasındaki şiddetli sıcaklıktan dolayı yırtılma olmamaktadır. Kanal tipi endirekt sac tutucu adı verilen bu sistem genellikle orta takviye (center pillar) adı verilen parçaların şekillendirilmesinde kullanılmaktadır. Çalışmada ayrıca, çekme kuvveti, sonlu elemanlar analizi ve önerilen sac tutucuyla deneysel çalışmalar yapılmıştır.

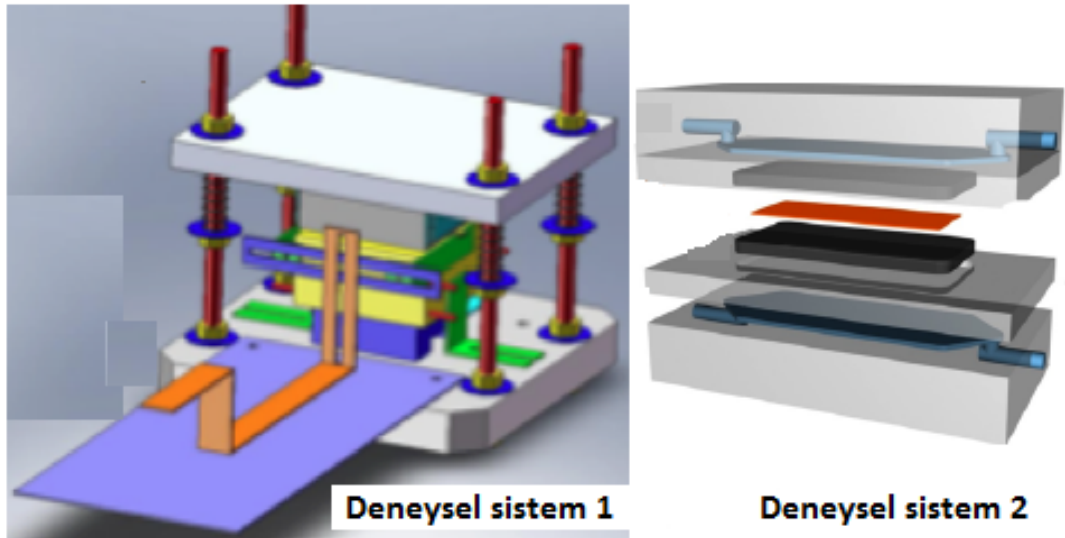
Cai ve ark. (2011) LS-DYNA yazılımı kullanılarak belirlenen bir modelin sıcak şekillendirme işleminin termo-mekanik simülasyonu gerçekleştirmiştir. Bu simülasyonun amacı, 22MnB5 malzemenin östenit dönüşümünün modellenmesi, Vickers sertliği ve akma gerilmesi değerlerinin belirlenmesidir. Ayrıca; sonuçlar daha önce yapılan simülasyonlarla da karşılaştırılıp doğrulanmıştır.

Nikravesht ve ark. (2012)'nin yapmış olduğu çalışmada, 22MnB5 bor alaşımlı çeliğinin deformasyona uğramamış hali ve sıcak şekillendirilmiş hali için, martenzit ve beynit başlama sıcaklıkları belirlenmiştir. Bu amaçla, dilatometre kullanılmış ve 900 °C de 5 dk. bekletilen numuneler 0,4°C/s -100°C/s aralığında soğutma hızlarına tabi tutulmuşlardır. Çalışmada, diğer fazların martenzit oluşumundan daha önce meydana gelmesine bağlı olarak soğuma hızındaki azalmanın martenzit başlama ve bitiş sıcaklıklarını da azalttığı ya da arttırdığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, sıcak şekillendirme esnasındaki düşük soğuma hızları martenzit oluşumuna engel olmakta ve martenzit başlama ve bitiş sıcaklıklarını düşürürken beynit başlama sıcaklığını arttırmaktadır.

Çeliklerde beynit formu; alt beynit ve üst beynit olmak üzere 2 şekilde gözlemlenebilmektedir (Totten 2006). Daha düşük sıcaklıklarda görülen alt beynitte, ferrit tabakaları içinde çökelen karbürler sementitten ziyade altıgen ε-karbür formundadırlar (Naderi ve ark. 2008). Üst beynitte ise sementit yapı, ferrit levhaları arasında ince filmler şeklinde bulunur.

Çünkü çeliklerde gözlemlenen üst bey nitik yapılar paralel karbür tabakaları ve ferritten oluşarak daha yumuşak ve tok iken; alt bey nitik yapılar ise iğnemi yapılar içinde küçük karbürlerden oluştuğundan daha sert ve gevrektr (Totten 2006).

Bosetti ve ark. (2010), 22MnB5 malzemenin sıcak şekillendirme işlemi esnasında ısı transferi katsayılarını belirlemişlerdir. Bu amaçla, Şekil 2.35’de gösterilen 2 farklı deneysel sistem kullanılmıştır ve farklı temas basınçları (0-40 MPa aralığı) için ısı transferi katsayıları elde edilmiştir.



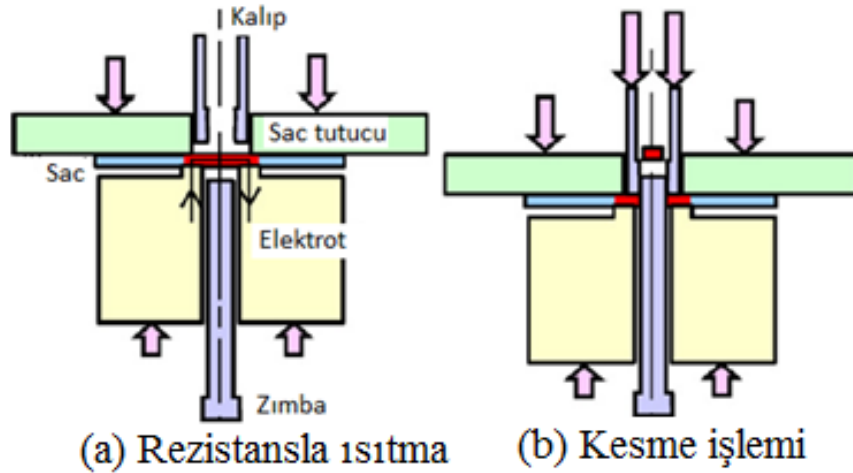
**Şekil 2. 35.** 22MnB5 malzemenin ısı transferi katsayılarının belirlendiği örnek deneysel düzenekler (Bosetti ve ark. 2010)

Kim ve ark. (2011)’ nın yapmış olduğu çalışmada, 22MnB5 malzeme üzerindeki Al-Si kaplamanın lazer kaynağındaki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, 1,6 mm lik sac levha kullanılmış ve kaplama kalınlıkları taramalı elektron mikroskobu kullanılarak ölçülmüştür. Çalışma sonucunda, sıcak şekillendirme öncesi 25  $\mu\text{m}$  olan kaplama kalınlığı difüzyon edip 35  $\mu\text{m}$  ye çıkmıştır. Ayrıca, martenzit yapı ısınan kaynak bölgesinde temperlenmiş martenzit, bey nit ve bey nit-martenzit oluşumuna dönüşmüştür.

Min ve ark. (2012)’ nın yapmış olduğu çalışmada, ferrit ve bey nit dönüşümü üzerinde östenit deformasyonunun etkileri incelenmiştir. 22MnB5 malzemenin ZSD diyagramlarının oluşumunda ve ferrit bölgesinde izotermal çekme deneyleri

gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerde, Gleeble 3800 termomekanik sistem kullanılmış ve mikro yapılar değerlendirilmiştir. Aynı zamanda; deformasyon sıcaklığı, şekil değişim hızı, şekil değişim miktarı ve soğuma hızı gibi parametrelerin ferrit dönüşümü üzerine etkileri de incelenmiştir. Çalışma sonucunda, eğer şekil değişim hızı ve soğuma hızı yüksek olduğunda ve deformasyon sıcaklığında artış gerçekleştiğinde, sıcak şekillendirilen parçadaki ferrit oluşumunun azalacağı sonucuna varılmıştır. Bununla beraber, deformasyon ve soğuma hızındaki artış martenzit oluşumunu arttırmakta ve daha mukavim bir durum olmaktadır.

Mori ve ark. (2012) su ile soğutulmuş 22MnB5 çeliğin delik delme işleminde, kesme kuvvetini azaltmak amacıyla bölgesel ısıtma yöntemi uygulanmıştır. Isıtma işlemi, Şekil 2.36 a' da gösterilen dikdörtgen elektrotlar vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, kesme işlemi sırasında sacın 500°C ye ısıtılması kesme kuvvetini 1/3 oranında soğuk kesme işlemine kıyasla azaltmıştır. Ayrıca bu ısıtma işleminin, kesme kenarlarındaki pürüzü ve yırtılmayı önlediği sonucuna varılmıştır.



**Şekil 2. 36.** 22MnB5 malzemenin rezistansla ısıtma ve kesme işlemlerinin gerçekleştirildiği örnek bir sistem (Mori ve ark. 2012)

Abbasi ve ark. (2012)' nin yapmış olduğu bu çalışmada, deformasyon sıcaklığının ve şekil değişim hızının mikro yapı ve mekanik özellikler üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, bor alaşımlı çelik olan 22MnB5 ve bunun yanında 2 adet bor alaşımsız malzemeler kullanılmıştır. Sonuçlara göre, sabit şekil değişim hızı için deformasyon

sıcaklığı arttıkça sertlik ve martenzit başlama sıcaklığı da artmaktadır. Ayrıca, yüksek şekil değişim hızlarında sertlik ve gerilme değerleri de artmakta martenzit başlama sıcaklığında belirgin bir etki görülmemektedir. Bununla beraber, deformasyon sıcaklığının artması deformasyon sertleşmesi oranını ise azaltmaktadır. Son olarak gerilme; martenzit başlama sıcaklığı, sertlik ve hacimsel martenzit oranı parametrelerinin değişimleri, deformasyon ve eş zamanlı soğutma işlemleri açısından karşılaştırılmıştır.

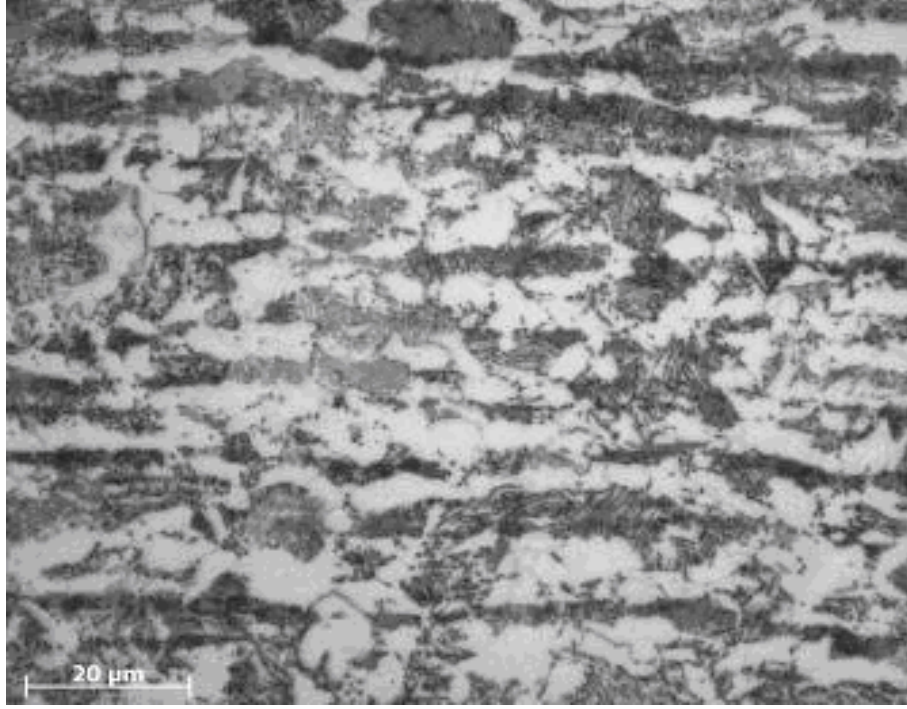
Bardelcik ve ark. (2012) 1,2 mm lik Usibor 1500 malzeme ile bir çalışma gerçekleştirmiştir. Östenitleme işlemi gerçekleştirilen malzemenin 14°C/s -50°C/s soğuma hızı aralığında beş farklı soğuma hızıyla soğutulmuştur. Bu işlemler sonucunda elde edilen yapı beynitik ve/veya martenzitik mikro yapıdır. Bununla beraber, şekillendirilmiş parçadan kesilen deney numunelerine, 0.003s<sup>-1</sup>-1075s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızı aralığında bası testleri gerçekleştirilmiştir.

Georg ve ark. (2012), laboratuvar ortamında B-pillar parçanın şekillendirilmesini gerçekleştirmiştir. Çalışmada, 400°C ye ısıtılan kalıp kullanılmış ve 30°C/s kritik soğuma hızının altında soğuma gerçekleştirilip, beynit oluşumu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 4 s. ve 10s. olmak üzere iki soğuma süresi denenmiş ve daha kısa soğuma süresinin daha yumuşak bir yapıya sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Şekillendirilmiş parçadan numuneler kesilip, bası testleri yapılmış ve diğer taraftan LS-DYNA ile nümerik modelleme gerçekleştirilmiş ve şekillendirilmiş parçanın Vickers sertlik tahminleri gerçekleştirilmiştir.

### **2.5.30MnB5 Çelik Malzeme**

Bor alaşımlı ve sıcak şekillendirilebilir bir başka çelik malzeme ise 30MnB5 tir. Bu malzeme, 22MnB5 çeliğinde olduğu gibi ısıl işlem görmemiş halde iken ferritik-perlitik bir mikro yapıdadır (Şekil 2.37) ve malzemenin ısıtılıp hızlı soğutulması sonucu martenzitik yapı elde edilir (<http://www.salzgitter-flachstahl.de>, 2012).





**Şekil 2. 37.** 30MnB5 çelik malzemenin ısıtım işlem öncesi mikro yapısı  
(<http://www.salzgitter-flachstahl.de>, 2012)

30MnB5 malzemesi, farklı sektörlerde kullanılan bor alaşımlı bir malzeme olup genel kullanım yerleri olarak; otomotiv endüstrisinde kullanılan pasif güvenlik parçaları, Dikişli hassas çelik borular, stabilizör, kardan mili, transmisyon mili (vites mili), tarım araçlarında: döner tırmık, pulluk bıçağı ve inşaat sektöründe aşınmaya ve yıpranmaya maruz kalan yapı elemanlarında kullanılır (<http://www.salzgitter-flachstahl.de>, 2012).

Isıtım işlem öncesi akma mukavemeti ve çekme mukavemeti sırasıyla 400 MPa ve 600 MPa civarında iken uygun soğutma ortamında bu değerler 1200 MPa ve 1700 MPa civarına çıkmaktadır. Malzemenin kimyasal kompozisyonu ise Çizelge 2.2' de verilmiştir (<http://www.arcelormittal.com>, 2012).

**Çizelge 2.2.** 30MnB5 malzemenin kimyasal kompozisyonu  
(<http://www.arcelormittal.com>, 2012)

	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	B (%)
30MnB5 EN 10083	0.270 - 0.330	1.15 - 1.45	≤ 0.025	≤ 0.035	≤ 0.40	0.0008 - 0.0050

### 2.5.1. 30MnB5 çelik malzeme ile ilgili yapılmış çalışmalar

30MnB5 bor alaşımlı malzeme ile ilgili literatürde çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Ülkemizde bu malzeme özellikle tarım sektöründe kullanıldığından dolayı, bu konu üzerine yalnızca birkaç çalışma mevcuttur.

Yazıcı (2011), pulluk uç demiri olarak kullanılan 30MnB5 malzemenin abraziv aşınması üzerine sıcak presleme işleminin ve örtülü elektrotla metal ark kaynağı (SMAW) ve gaz altı metal ark kaynağı (GMAW) gibi farklı yüzey sertleştirme tekniklerinin etkisini tarla koşullarında incelenmiştir. Aşınma kayıpları, toprak işleme öncesi ve sonrasında ağırlık ve boyut değişimlerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi açısından ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde, pulluk uç demirlerinde meydana gelen aşınma kayıplarının azaltılması bakımından sıcak presleme, örtülü elektrotla metal ark kaynağı ve gaz altı metal ark kaynağı yöntemleri ile yüzey sertleştirme işlemleri etkili bir çözüm olarak önerilmiştir.

30MnB5 malzemenin aşınma davranışı ile ilgili bir başka çalışma Nalbant ve Palalı (2011) tarafından gerçekleştirilmiştir ve yine pulluk uç demirindeki kaplama katmanının toprak işleme sırasında aşınması araştırılmıştır. Pulluklarda yaygın olarak kullanılan DIN EN 10083 (30 MnB5) çeliğinden üretilmiş uç demirleri, aşınmaya karşı dirençlerini artırmak amacıyla elektroliz yöntemiyle 20 µm kalınlığında sert kromla, kimyasal işlemlerle 20 µm kalınlığında akımsız nikelle ve fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle 4 µm kalınlığında titanyum nitrit ile kaplanmış ve toprak işleme gerçekleştirilmiştir. Pulluk uç demirleri toprak işlemeden önce ve sonra tarama elektron mikroskobu kullanılarak metalografik olarak da incelenmiş ve enerji dağılım spektrumu belirlenmiştir.

Yazıcı (2011)' in gerçekleştirdiği bir başka çalışmada ise 30MnB5 malzemenin gaz karbonitrasyon prosesinin aşınma davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, karbonitrleme işlemi uygulanan numunelerin, laboratuvar şartlarındaki geleneksel ısı işlemleri gerçekleştirilen numunelere göre daha iyi aşınma direnci gösterdiği sonucuna varılmıştır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Tez kapsamında bor alaşımlı çeliklerden olan Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) ve kaplamasız 30MnB5 malzemeler kullanılmıştır.

##### 3.1.1. Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) çelik malzeme

Çalışmada kullanılan 1,7 mm lik sac malzeme ArcelorMittal firması tarafından soğuk haddeleme yöntemiyle üretilmektedir ve malzemenin dış yüzeyi ise, alüminyum-silisyum (Al-Si) bir tabaka ile kaplanmıştır. Bu kaplamanın amacı, ısıtma ve sacın fırından kalıba transferi esnasında gerçekleşebilecek olan oksidasyon ve dekarbürizasyondan koruyabilmektir. Bahsedilen Al-Si kaplamanın ergime sıcaklığı yaklaşık olarak 600 °C dir ve alt katman içerisindeki Fe' in varlığından dolayı, bu ergime sıcaklığı onun çelik üzerinde erimesini engeller. Daha yüksek erime noktasına sahip olan Al-Fe alaşımı, temel metale sahip ara yüzeyde oluşur ve yüzeye hızlı bir şekilde ulaşır( Borsetto ve ark. 2009).

Çalışma kapsamında, öncelikle işlem görmemiş halde bulunan malzemenin kimyasal analizi gerçekleştirilip, mekanik özellikleri tespit edilip, mikro yapısı incelenmiştir. Spektrometre cihazıyla elde edilen kimyasal analiz sonuçları ve UTEST marka 25 ton universal çekme cihazıyla elde edilen mekanik özellikler Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de görülmektedir.

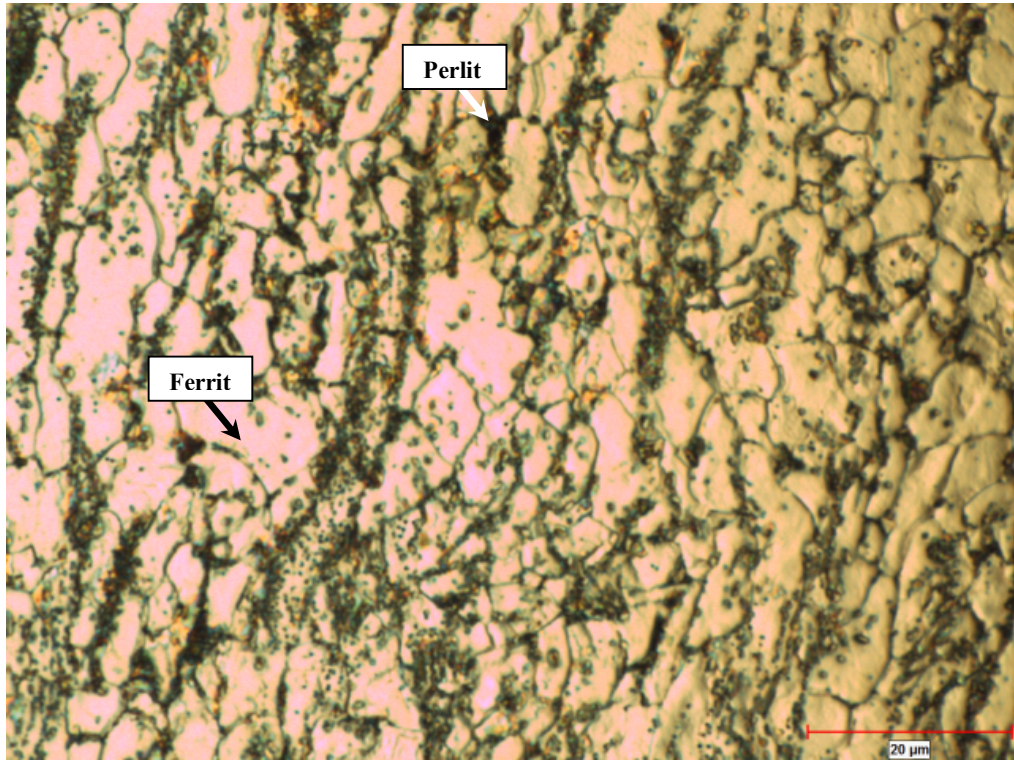
**Çizelge 3.1.** Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin kimyasal analizi (% kütle)

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	B	Ni
22MnB5	0,19	0,649	1,13	0,0096	0,0021	0,192	0,0327	0,003	0,0189

**Çizelge 3.2.** Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin mekanik özellikleri

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Vickers Sertlik Değeri (HV <sub>1</sub> )
22MnB5	509	415	240	191

Bununla beraber, Nikon Eclipse LV150 marka optik mikroskopta gerçekleştirilen mikro yapı analizi sonucunda 22MnB5 malzemenin işlem görmemiş hali için elde edilen mikro yapının ferritik (beyaz) + perlitik (siyah) olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 3.1). Kullanılan büyütme ise 1000 büyütmedir.



**Şekil 3.1.** 22MnB5 ısıtılmış işlem görmemiş malzemenin mikro yapısı (1000x)

### 3.1.2. 30MnB5 çelik malzeme

Çalışmada kullanılan 2,5 mm kalınlığında 30MnB5 malzeme, sıcak haddeleme yöntemiyle üretilmektedir. Çalışma kapsamında, öncelikle işlem görmemiş halde bulunan malzemenin kimyasal analizi gerçekleştirilip, mekanik özellikleri tespit edilip, mikro yapısı incelenmiştir. Spektrometre cihazıyla elde edilen kimyasal analiz sonuçları ve UTEST marka 25 ton üniversal çekme cihazıyla elde edilen mekanik özellikler Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4’de görülmektedir.

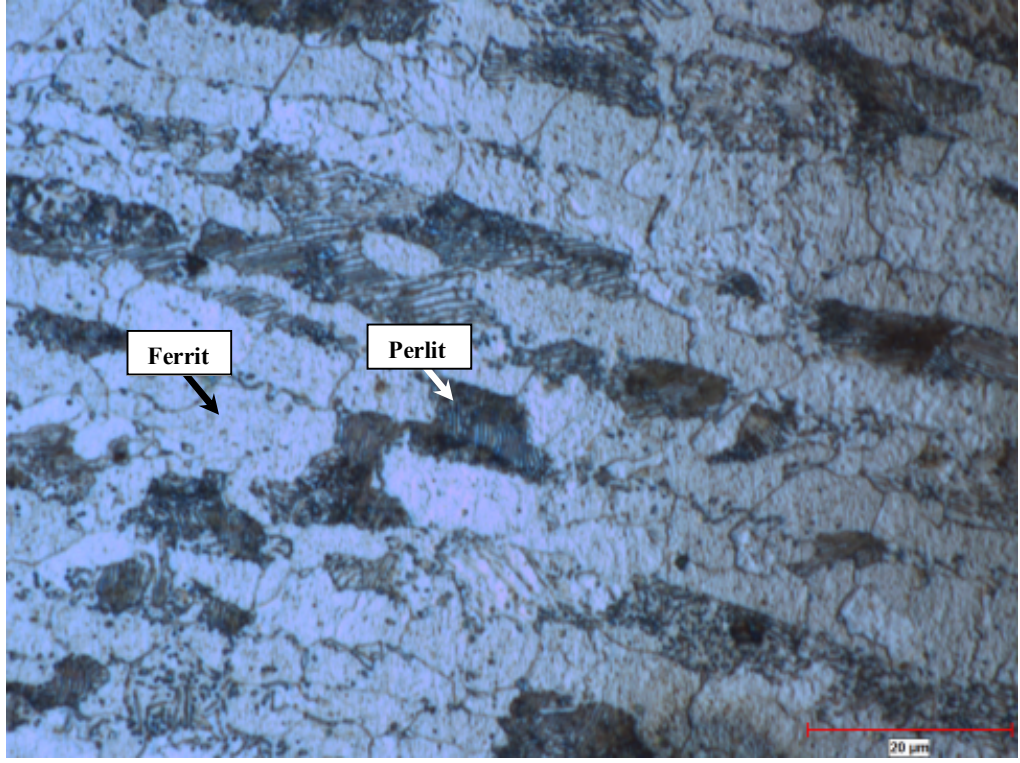
Ayrıca, Nikon MA100 marka optik mikroskopta gerçekleştirilen mikro yapı analizi sonucunda ise 30MnB5 malzemenin işlem görmemiş hali için elde edilen mikro yapının ferritik (beyaz) + perlitik (siyah) olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 3.2). Kullanılan büyütme ise 1000 büyütmedir.

**Çizelge 3.3.** 30MnB5 malzemenin kimyasal analizi (% kütle)

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	B	Ni
30MnB5	0,27	0,22	1,29	0,008	0,007	0,3	0,04	0,003	0,03

**Çizelge 3.4.** 30MnB5 malzemenin mekanik özellikleri

Malzeme	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Vickers Sertlik Değeri (HV <sub>1</sub> )
30MnB5	363	550	222	183



Şekil 3. 2. 30MnB5 ısıt işlem görmemiş malzemenin mikro yapısı (1000x)

### 3.2.Yöntem

#### 3.2.1. Gerçekleştirilen ısıt işlemler

Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) ve 30MnB5 malzemelerin ısıt işlem öncesi mikro yapıları ferritik ve perlitik bir durum sergilemekte iken endüstride kullanım esnasında ise martenzitik yapı oluşumu amaçlanmaktadır.

Bu nedenle martenzit yapı oluşumu için gerçekleştirilmesi gereken ısıt işlem; sertleştirme işlemidir ve bu işlemde östenit, çeliğin bileşimine bağlı bir minimum hızın altına inilmeyecek şekilde soğutulmuş olarak yarı kararlı bir yapı olan martenzit yapı oluşturulmaya çalışılır (Güleç ve Aran 1995).

DIN 17014 e göre sertleştirme, çeliklerin  $A_3$  veya  $A_1$  üzerindeki bir sıcaklıktan, yüzeyde ve aynı zamanda kesitte önemli sertlik artışı sağlayacak bir hızla soğutulmasıdır.



Böylece, genellikle martenzite dönüşen içyapıda ferrit ve perlit oluşumu engellenir. Soğuma hızı, kritik soğuma hızının üzerinde olduğunda ve martenzit bitiş sıcaklığının altına inildiğinde % 100 martenzite dönüşüm gerçekleşir. Soğuma hızı, kritik hızdan azalarak uzaklaştıkça martenzitin yerini artan ölçüde diğer dönüşüm oranları alır (Güleç ve Aran 1995).

Bu bağlamda, fırında belirli sıcaklıklarda ısıtılan numuneler kritik soğuma hızını belirlemek amacıyla su ve hava olmak üzere 2 farklı ortamında soğutulmuşlardır. Böylece, yapılan ısı işlemler sonucunda optimum mekanik özellikler belirlenmeye çalışılmıştır.

Şekil 3.3' de, tez çalışmasında kullanılan maksimum 1100°C sıcaklığa ısıtılabilen ısı işleme fırını görülmektedir. Isıtıldıktan sonra, maşa yardımıyla fırından çıkarılan numuneler, daha sonra durgun havada ve suda soğumaya bırakılmışlardır. Soğuma sürecinde, soğumaya bırakılan numunelerin sıcaklıkları belirli aralıklarla (10s. ve 20 s.de bir) Şekil 3.4'de gösterilen Lazer işaretlemeli infrared termometre ile ölçülmüş ve malzemedeki sıcaklık değişimi 5-10°C arasında azalana kadar ölçümler gerçekleştirilmiştir, böylelikle soğuma hızı tespit edilmeye çalışılmıştır.



**Şekil 3. 3.**Isıl işlem fırını



**Şekil 3.4.** Lazer işaretlemeli infrared termometre

### **3.2.2. Numune hazırlama işlemleri**

Isıl işlemin mikro yapı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla, ısıl işlem uygulanan çekme numunelerinden küçük parçalar (yaklaşık 5 mm Streurs marka abrasif kesme cihazında kesilmiştir (Şekil 3.5 a). Kesme işleminden sonra elde edilen küçük parçalar Metkon Ecopress-100 marka cihaz (Şekil 3.5 b) ile bakalite alma işlemine tabi tutulmuş ve son olarak yüzeylerin optik mikroskopta daha iyi gözlemlenebilmesi adına, Metkon-Forcimat marka otomatik parlatma cihazı (Şekil 3.5 c) kullanılarak 180-320-400-600-800-1000-1200-2000 gridlik kaba yüzeyden ince yüzeye olacak şekilde zımparalar kullanılarak parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Son olarak, aynı cihazda 1 $\mu$  luk alümina solüsyon kullanılarak kadife keçe ile parlak yüzeyler elde edilmiştir.





(a)



(b)



(c)

Şekil 3.5 a) Kesme cihazı, b) Bakalite alma cihazı, c) Otomatik parlatma cihazı

### 3.2.3. Mikro yapı incelemeleri

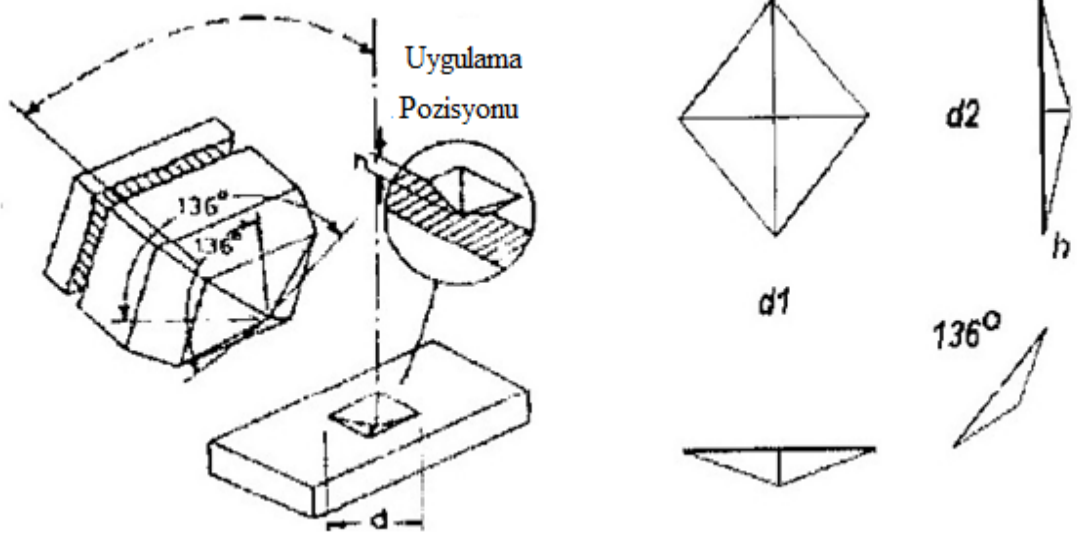
Parlatma işlemi tamamlanan bakalite alınmış numuneler, son olarak % 2 nital ile dağlanarak gerçekleştirilen ısıl işlemlerdeki mikro yapıları incelemek amacıyla hazır hale getirilmişlerdir. Mikro yapı analizlerinde, Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzeme için Nikon Eclipse marka, 30MnB5 malzeme için Nikon MA100 (Şekil 3.6) marka mikroskoplar kullanılmış ve resimlemeler 1000 büyütmeli objektif ile gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.6.** Optik metal mikroskobu (Nikon MA100)

#### **3.2.4. Vickers sertlik ölçümleri**

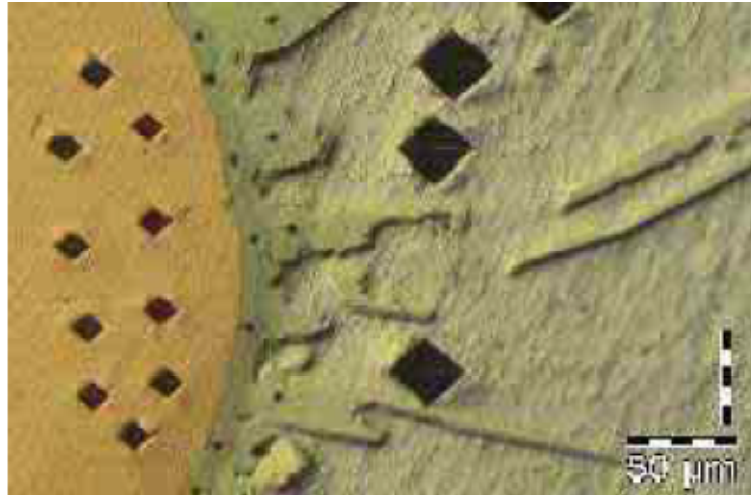
Vickers sertlik testi, en duyarlı sertlik ölçme yöntemidir. Daha uzun zaman almasına karşın, özellikle araştırma amacı ile mikro sertlikleri ölçmeye elverişlidir. 1920'li yıllarda İngiltere'de Vickers Ltd.' in mühendisleri tarafından ortaya çıkarılmıştır. Bu testte kullanılan uç, kare tabanlı bir piramit olup (Şekil 3.7), piramit ucunun tepe açısı  $136^\circ$ 'dir ve bu uç belirli bir kuvvet altında malzeme yüzeyine uygulandığında malzeme üzerinde bir eşkenar dörtgen oluşur (Aytar 2012).



**Şekil 3. 7.** Vickers sertlik deneyinde kullanılan ucun şematik gösterimi (Aytar 2012)

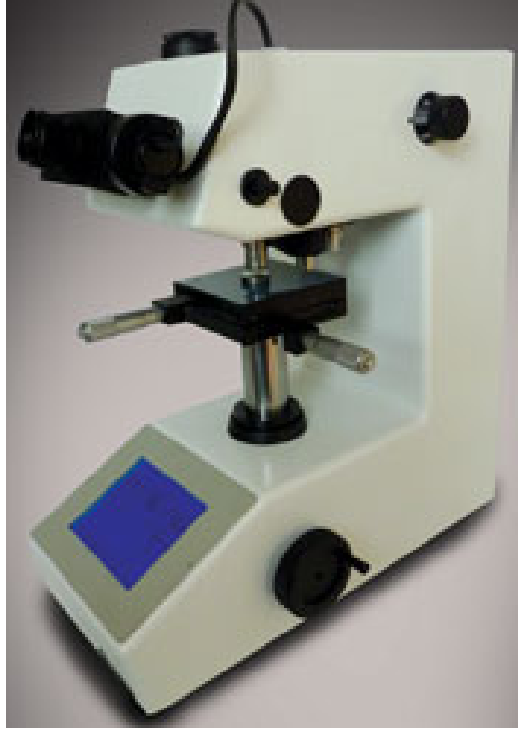
Ucun malzeme yüzeyinde oluşturduğu iz'in (Şekil 3.8),  $d_1$  ve  $d_2$  köşegen uzunluklarının ölçülerek ortalamasından hareketle  $d$  mesafesi hesaplanır. Uygulanan kuvvet ( $F$ ) ve hesaplanan  $d$  uzunluğu aşağıdaki ifade de yerine yazılarak Vickers sertlik değeri ( $HV$ ) aşağıdaki ifadeyle hesaplanır. (Aytar 2012).

$$HV = \frac{1.8544 * F}{d^2} \quad (3.1)$$



**Şekil 3.8.** Malzeme yüzeyinde oluşturulan Vickers izleri (Aytar 2012)

Çalışmada, mikroskopta mikro yapı inceleme sonrası Mikro Vickers sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen sertlik ölçümlerinde 1kg.lık yük uygulanmıştır. Bakalite alınmış her bir numunenin üzerinden 1 mm lik aralıklarla 5 ölçüm gerçekleştirilip ortalaması alınmıştır. Kullanılan cihaz Duroline-Metkon marka olup 10, 25, 50, 100, 200, 300, 500, 1000 gr.lık yük aralığında ölçüm yapılabilmektedir (Şekil 3.9).



**Şekil 3.9.** Mikro vickers sertlik ölçüm cihazı

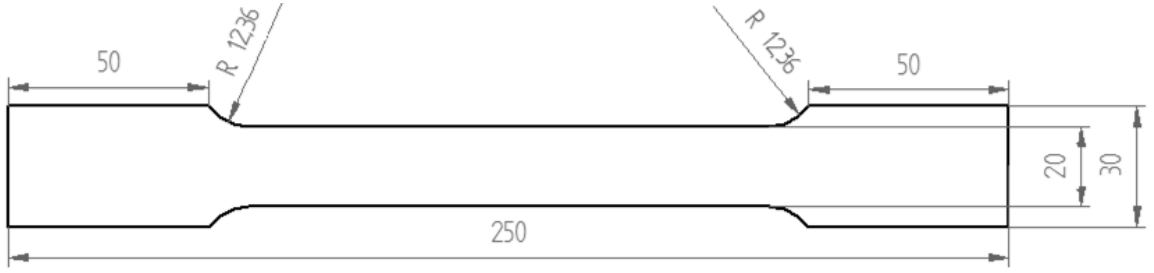
### **3.2.5. Çekme deneyleri**

Isıl işlem uygulanmış olan ve ısıl işlem öncesi tüm numunelerin çekme deneylerinde, Utest marka 25 ton luk üniversal çekme cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.10). Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemesinin temini Beyçelik firmasından yapıldığı için çekme numuneleri, firma bünyesinde bulunan kalıpta kesilmiştir. Bu numunenin boyutları Şekil 3.11’de verilmiştir. 30MnB5 malzemesinin çekme numuneleri ise lazer yöntemi ile kesilmiştir. Bu numunenin boyutları da Şekil 3.12’de verilmiştir.

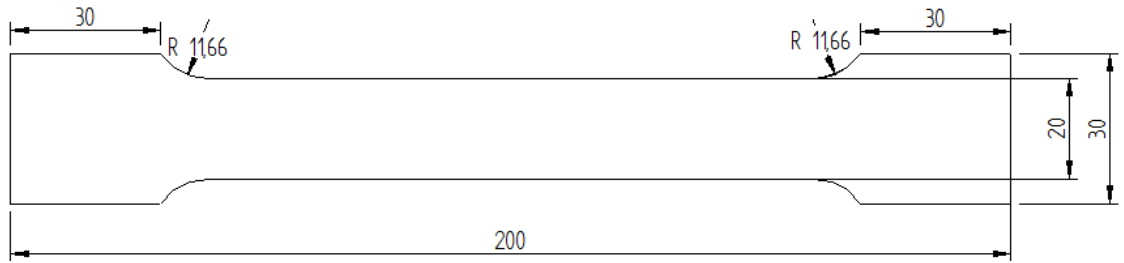
Numunelerin kenarları, çekme işlemi esnasında çentik etkisi altında kalmaması amacıyla taşlanmış ve pürüzleri alınmıştır. Ayrıca ısıl işlem sonrası çekme işlemine tabi tutulan malzemelerde kullanılan çekme hızı 10 mm/ dk. ve yük hücresi ise 250 kN dur.



**Şekil 3. 10.** Çalışmada kullanılan çekme cihazı



**Şekil 3.11.** Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin çekme işleminde kullanılan numune boyutları (mm)



**Şekil 3.12.** 30MnB5 malzemenin çekme işleminde kullanılan numune boyutları (mm)

### 3.2.6. Sıcak çekme işlemleri

Sıcak çekme işlemlerinde, malzemenin yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme grafikleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, Utest marka 25 ton çekme cihazıyla beraber çalışabilen indüksiyon ısıtma sistemi kullanılmıştır. İndüksiyon ısıtma sistemi iki kısımdan oluşmaktadır. Biri, soğutma sistemini içinde barındıran alt kısım (Şekil 3.13 b) ve diğeri ısıtıcı ucu da içinde üzerinde bulunduran üst kısımdır (Şekil 3.13 a).





(a)

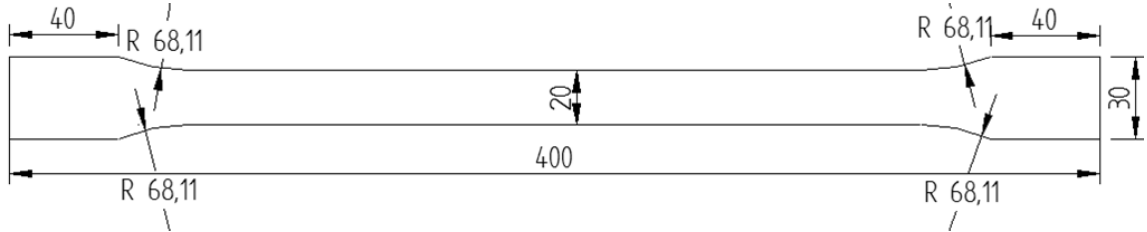


(b)

**Şekil 3. 13.** a) İndüksiyon ısıtma sistemi alt kısım, b) İndüksiyon ısıtma sistemi üst kısım



Hem Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemeye hem de 30MnB5 malzemeye uygulanan bu işlemde, çekme numuneleri lazer yöntemiyle kestirilmiştir. Şekil 3.14' de bu numunenin boyutları görülmektedir.



**Şekil 3. 14.** Sıcak çekme işleminde kullanılan çekme numunesi boyutları (mm)

Deney sıcaklıkları; 400-500-600-700-800-900°C lar olup, çekme numuneleri 60 s. içerisinde ayarlanan sıcaklığa ulaşacak şekilde ayarlanmış ve ısıtma, çekme numunesinin orta kısmına gelecek şekilde lokal olarak gerçekleştirilmiş ve istenen sıcaklığa ulaşıldıktan sonra çekme işlemi başlatılmıştır. Sıcaklığın istenen değere ulaşp ulaşmadığının kontrolü ise sensör yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.7. Darbe deneyleri

Yabancı bir objeden dolayı olan gerçek bir darbeyi simüle etmek için, çeşitli test düzenekleri geliştirilmiştir; gaz tabancası cihazı, serbest düşen ağırlık sistemi, sarkaç tipi darbe cihazı gibi (Akgün 2010).

Darbeler genel olarak, düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar, fakat bu kategoriler arasında açık bir geçiş yoktur. Düşük hızlı darbeler normal olarak çarpışma temas anında malzeme içyapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Bazen düşük hızlı darbe, düşük enerjili darbe olarak da kullanılır. Düşük hızlı darbeye, malzemenin içyapısında darbeye karşı cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir ve sonuç olarak daha fazla enerji elastik olarak absorbe edilir. Bu nedenle hedefin dinamik yapısal cevabı çok büyük bir öneme sahiptir. Yüksek hızlı darbe cevabı malzeme

boyunca yayılan gerilme dalgası tarafından hakim olunur ki bu durumda malzeme darbeye karşı cevap verebilme zamanına sahip olamaz ve çok küçük bir bölgede hasar oluşur (Doğan 2008).

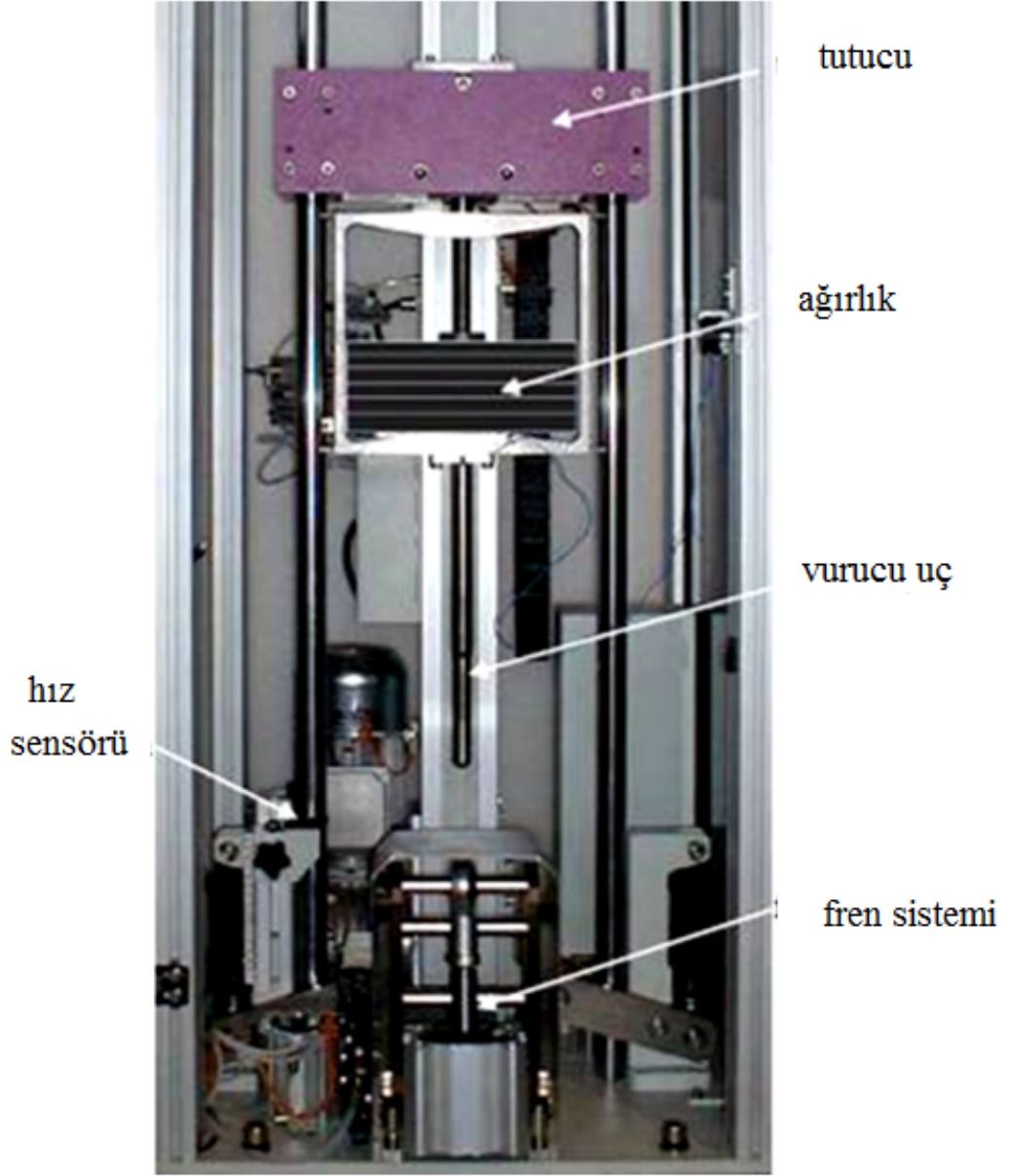
Darbe testi çeşitleri ise 3 kategoride sınıflandırılabilir:

1. Ağırlık düşürme testleri,
2. Sarkaç testleri (Izod ve Charpy),
3. Hava veya Gaz silah testleri (düşük hız veya balistik testler(Doğan 2008)).

Bu çalışma kapsamında, optimum mekanik özelliklerin gösterildiği ısıtılmış numuneler ve ısıtılmamış numuneler için ağırlık düşürme ve charpy testleri gerçekleştirilmiştir.

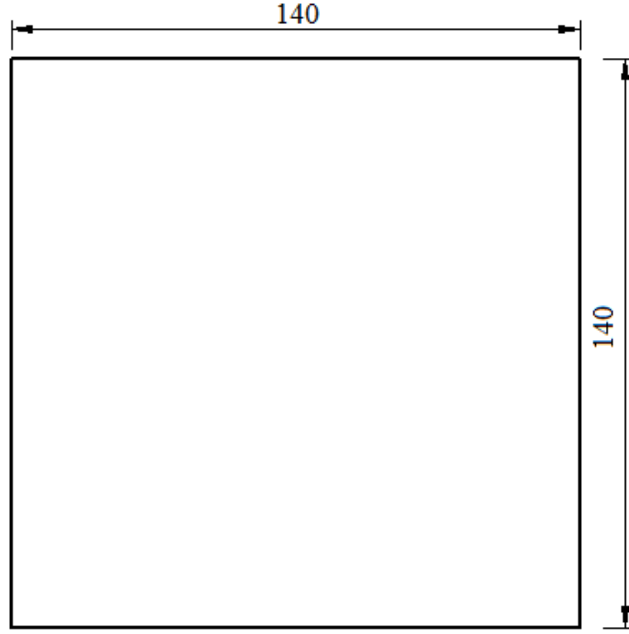
#### **3.2.7.1. Ağırlık düşürme deneyleri**

Çalışmanın bu kısmında uygulanan darbe deneylerinde Şekil 3.15’ de görülen, Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan, ağırlık düşürme esasına dayalı olarak çalışan CEAST marka FARCTOVIS PLUS darbe test cihazı kullanılmıştır. Bu cihazın çalışması esnasında, force transducer’ dan kuvvet verileri elde edilerek kuvvetin zamana bağlı değerlerine ulaşılır. Buradan hareketle, Newtonun 2. yasasından ve kinematik bağıntılardan sırasıyla ivme, hız ve deplasman değerlerinin zamana bağlı verileri elde edilebilmektedir.



**Şekil 3. 15.** Serbest düşen ağırlık darbe cihazı iç gösterim (Akgün 2010)

Kullanılan cihazdaki vurucu kütle'nin ağırlığı; 4,906 kg, uç geometrisi ise yarı küresel olup çapı; 12,7 mm dir. Ayrıca cihazın maksimum yük kapasitesi; 22,4 kN ve maksimum hızı ise; 24m/s dir. Ağırlık düşürme deneylerinden kullanılan numuneler lazer yöntemiyle kesilmiştir ve numune boyutları 140x140 mm dir (Şekil 3.16). Deneylerde, tüm numuneler kenarlarından çepeçevre tutulmuştur ve vurucu uç numunenin tam ortasına düşürülmüştür.



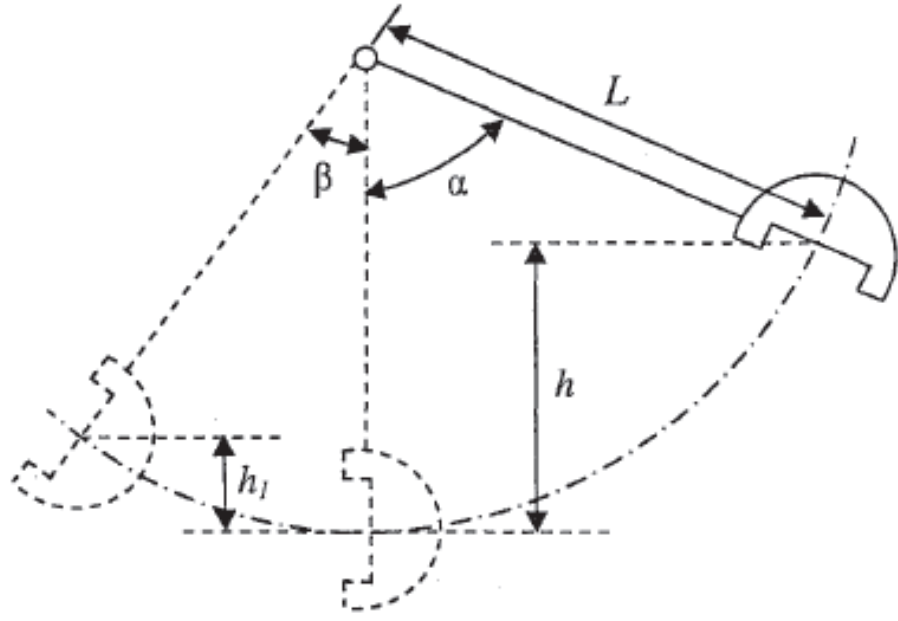
Şekil 3. 16. Ağrlık düşürme deneyi numune boyutları (mm)

### 3.2.7.2.Charpy (Çentik darbe) deneyleri

Charpy darbe test yöntemlerinde çentik açılmış bir test numunesi, standart bir yükseklikten bırakılan bir sarkaç ile darbeye maruz bırakılır. Darbeden sonra sarkacın çıktığı yükseklik tespit edilerek sarkacın ilk ve son konumdaki enerji farkı numune tarafından absorbe edilen darbe enerjisi olarak ölçülür (Şekil 3.17). Darbeden sonraki sarkacın yüksekliği ne kadar az ise, absorbe edilen darbe enerjisi, dolayısıyla malzemenin darbe direnci veya tokluğu da o derece yüksektir (Doğan 2008). Bu enerji; aşağıdaki formülle gösterilebilir:

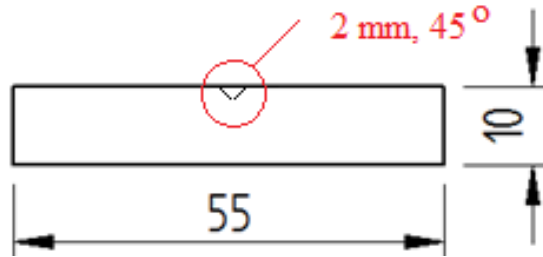
$$\text{Kırılma Enerjisi} = m(h - h_1) = m \cdot L \cdot (\cos\beta - \cos\alpha) \quad (3.2)$$

Burada  $m$  vurucu kütlenin ağırlığı,  $L$  sarkacın ağırlık merkezinin sarkacın salınım merkezine uzaklığı,  $h$  sarkacın ağırlık merkezinin düşme yüksekliği,  $h_1$  sarkacın ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği,  $\alpha$  düşme açısı,  $\beta$  yükseliş açısıdır (Ekici 2004).

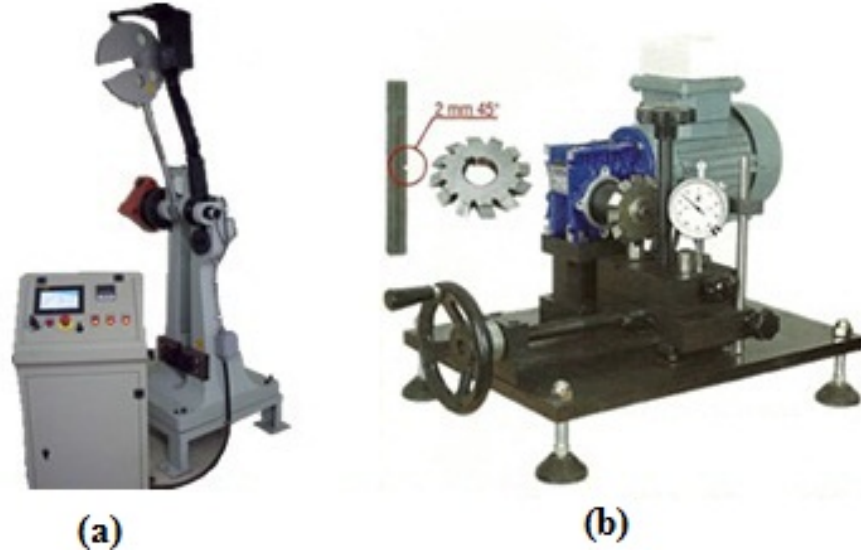


Şekil 3.17. Darbe enerjisi hesabı için gerekli boyutlar (Ekici 2004)

Çalışma kapsamında, Şekil 3.18’de verilmiş ve lazerle kesilen malzemelere öncelikle  $45^\circ$  açıda ve 2 mm derinliğinde çentik açılarak Charpy V-çentikli vurma deneyi uygulanmıştır. Çentik açma işleminde kullanılan cihaz Şekil 3.19 b’ de verilmiştir. Gerçekleştirilen Charpy V-çentikli vurma deneyleri, U.Ü. Makine Mühendisliği bünyesinde bulunan Şekil 3.19 a’ da görülen cihazla gerçekleştirilmiştir. Cihazın maksimum enerji kapasitesi; 300 Joule, vurucu kütlesi; 20,5 kg, hızı; 5,5m /s ve düşme açısı  $160^\circ$  dir. Deneyle sonuçunda, kırılma enerji değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3.18. Charpy vurma deneyi numune boyutları (mm)



Şekil 3 19. Çalışmada kullanılan a) çentik darbe b) çentik numune hazırlama cihazı

### 3.2.8. Yorulma deneyleri

Birçok makine parçası ve yapı elemanları kullanılmaya esnasında tekrarlanan gerilmeler ve titreşimler altında çalışmaktadır. Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen belirli bir tekrarlanma sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama ve bunu takiben kırılma olayına neden olurlar. Bu olaya “Yorulma” adı verilir. Yorulma olayına, parçaya sadece dışarıdan uygulanan mekanik kuvvetler değil, ısıl genişleme ve büzülmeyle doğan ısıl gerilmeler de neden olabilmektedir.

Yorulma deneyleri; aksel gerilmeli, eğme gerilmeli, burulma gerilmeli, bileşik gerilmeli yorulma deneyleri olmak üzere 4'e ayrılmaktadır. Tez kapsamında gerçekleştirilen metot ise eğme gerilmeli yöntemidir. Bu yöntem, düzlemsel eğme gerilmeli ve dönen eğme gerilmeli olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır (Saygın 2006). Ancak çalışmada, düzlemsel eğme gerilmesi uygulayan yorulma cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.20). Malzemeye uygulanacak gerilme ise, Şekil 3.21'de gösterilen sehim hesaplamasıyla belirlenmiştir.



**Şekil 3. 20.** Yorulma deneyi gerçekleştirilen cihaz

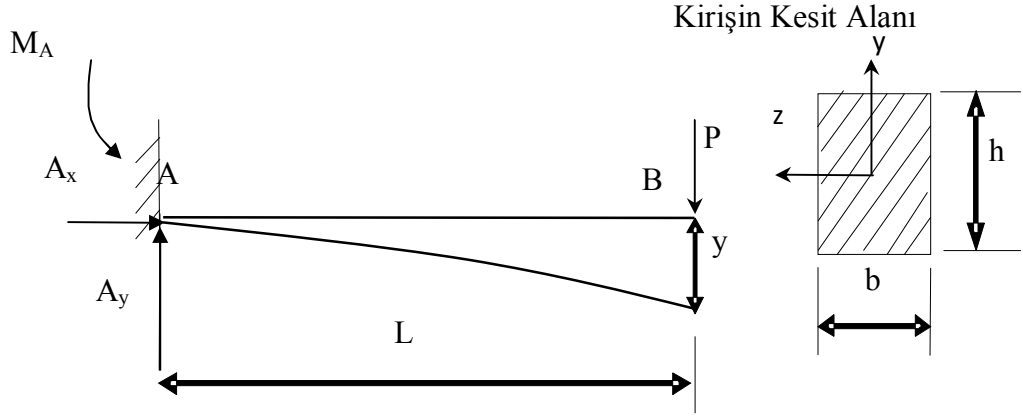


**Şekil 3.21.** Yorulma deneyi gerçekleştirilen cihazda sehim ayarı

Tez kapsamında uygulanan yorulma deneylerinde numune bir ucundan sabit tutulup, diğer ucundan ise tekrarlı yük uygulaması gerçekleştirilmiştir. Literatürde bu sabitleme türüne ankastre mesnetleme denirken, malzeme de eğilme gerilmesine maruz bırakılmaktadır. Şekil 3.22’de yorulma deneyinde oluşan sistem görülmektedir.

Bu durum, ucundan P tekil yükü uygulanan ankastre mesnetlenmiş kiriştir ve uygulanan P kuvveti sonucu sistemde;  $A_x$ ,  $A_y$  tepki kuvvetleri ile  $M_A$  tepki momenti oluşmaktadır.  $L$ =Kiriş boyu ve  $P$ =Uygulanan Yükü göstermektedir.





Şekil 3.22. Yorulma deney düzeneği

$\sum M=0$  denge denklemine göre;

$$M_A - P \cdot L = 0 \quad \text{ve} \quad (3.3)$$

$$M_A = P \cdot L \quad \text{olur.} \quad (3.4)$$

Diğer taraftan; P yüküne maruz bir kirişte oluşan eğilme gerilmesi ise;

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \quad \text{dır.} \quad (3.5)$$

Bu denklemden hareketle Şekil 3.22’de bahsedilen sistem için; (Moment)  $M = P \cdot L$ ,

(tarafsız eksene uzaklık)  $y = \frac{h}{2}$  ve (atalet momenti)  $I = \frac{b \cdot h^3}{12}$  olduğundan gerilme denklemleri olarak;

$$\sigma = \frac{P \cdot L \cdot \left(\frac{h}{2}\right)}{\frac{b \cdot h^3}{12}} = \frac{6 \cdot P \cdot L}{b \cdot h^2} \quad \text{elde edilir.} \quad (3.6)$$

Denklem 3.6’ dan P yükü çekilirse;

$$P = \frac{\sigma \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot L} \quad \text{olur.} \quad (3.7)$$

Bir başka taraftan; Şekil 3.22’de gösterilen Y; sehim yani uygulanan P yükü sonucu oluşan çökme miktarıdır. Böyle bir yükleme durumunda oluşan sehim miktarı ise;

$$Y = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad \text{dır.} \quad (3.8)$$

Denklem 3.7’ den elde edilen P değeri, Denklem 3.8’ de yerleştirildiğinde;

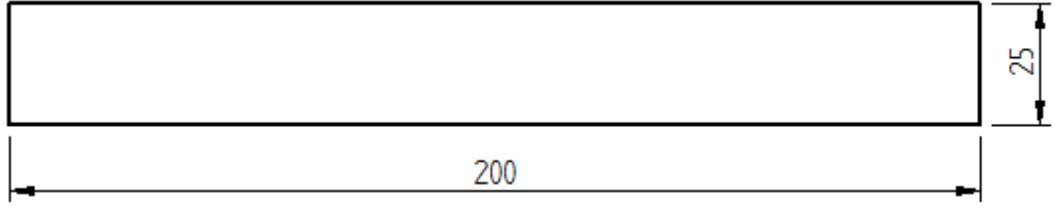
$$Y = \frac{\sigma \cdot b \cdot h^2 \cdot L^2}{288 \cdot E \cdot I} \quad \text{olur.} \quad (3.9)$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad \text{olduğundan ise de;}$$

$$Y = \frac{\sigma \cdot L^2}{24 \cdot E \cdot h} \quad \text{ifadesine ulaşılır.} \quad (3.10)$$

Tez çalışmasında, ısıtma işlemi uygulanmış ve uygulanmamış malzemelerin çekme deneyleri sonucu elde edilen akma gerilme değerleri referans alınarak farklı emniyet katsayısı değerleri için gerilme hesapları yapılmış ve buna bağlı olarak Denklem 3.10’ da ifade edilen Y, sehim değeri hesaplanmıştır. Elde edilen bu değer, Şekil 3.21’de görülen genlik değeri olup, bu mesafe dijital kumpas yardımıyla ayarlanmıştır.

Çalışmada, en iyi mukavemet değerine ulaşılan sıcaklık ve soğuma ortamı parametrelerinde, Şekil 3.23’de görülen lazer yöntemiyle kesilmiş yorulma numunelerine ısıtma işlemleri uygulanmış ve daha sonra yorulma işlemine tabi tutulmuştur. Bununla beraber, ısıtma işlemi görmemiş Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) ve 30MnB5 malzemelerinin de yorulma deneyleri yapılarak, ısıtma işlemi sonrası ve öncesi durumlar ‘yorulma dayanımı’ sürekli mukavemet hali açısından karşılaştırılmıştır.

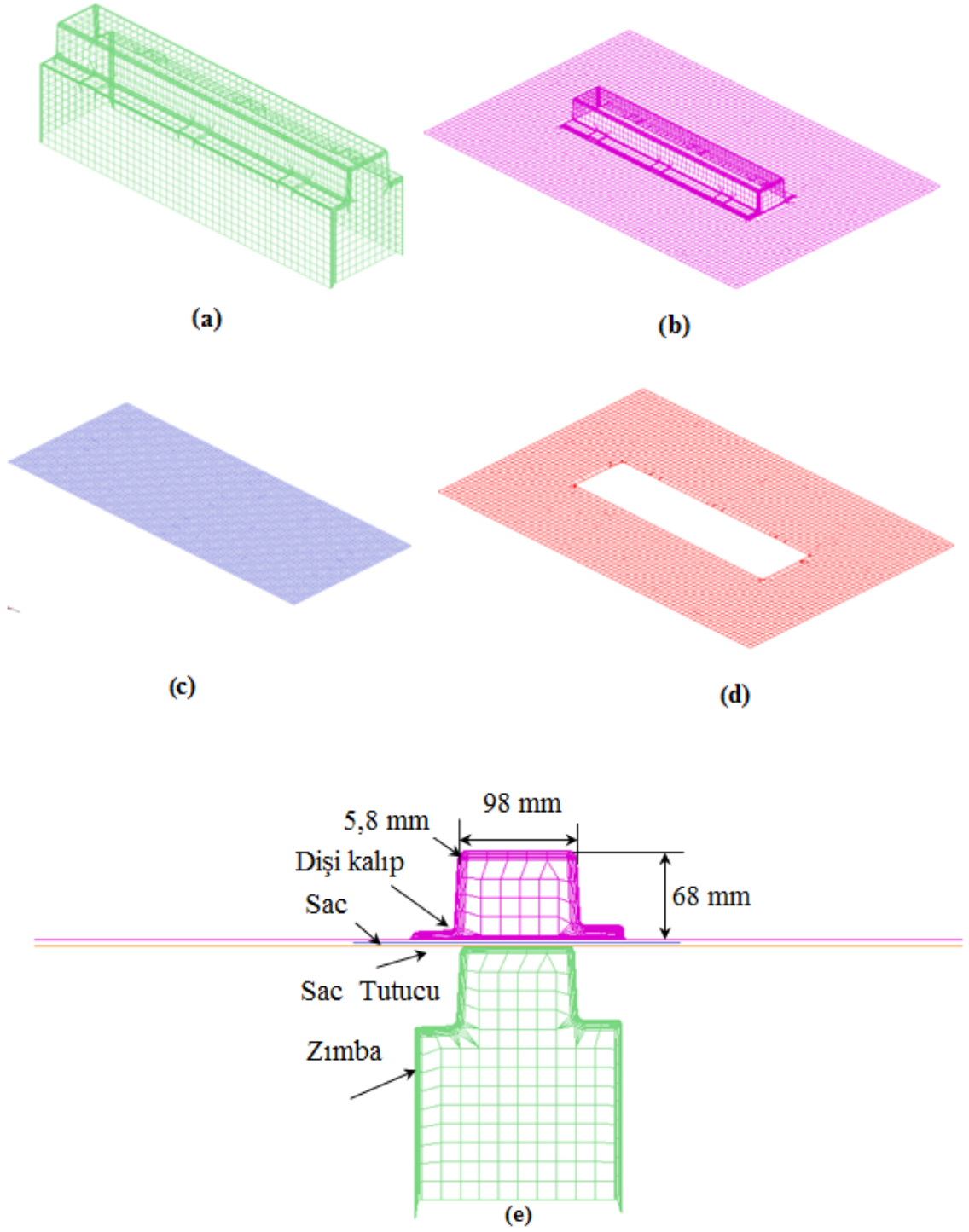


Şekil 3.23. Yorulma deneyi numune boyutları

### 3.2.9. Sonlu Elemanlar Yöntemi Çalışmaları

Çalışmanın bu kısmında, Dynaform 5.7.3 isimli sac metal şekillendirme programı kullanılarak prototip bir kalıp için sıcak şekillendirme prosesi simüle edilmiştir. Bu program ile şekillendirme esnasında malzemede oluşabilecek yırtılma, incelme ve buruşma gibi problemler ve maksimum gerilme, sac kalınlığında değişim durumları incelenmiştir.

Şekillendirilen sac kalınlığı; Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) için 1,7 mm ve kaplamasız 30MnB5 için 2,5 mm dir ve sac 264 x 642 mm boyutlarına sahiptir. Sıcak şekillendirme işleminde kullanılan malzeme modeli “Elastik-Viskoplastik Termal” olarak seçilmiştir. Bu model, sıcak şekillendirme işlemi gibi termo-mekanik simülasyonlarda kullanılmaktadır ve ayrıca malzeme modelinin özelliği ise, sıcaklığa bağlı akma gerilmesi değerleri ve elastisite modülü değerlerinin kullanılıyor olmasıdır. Bu nedenle, Bölüm 3.2.6’ da bahsedilen sıcak çekme deneyleri vasıtasıyla elde edilen bu değerler, Dynaform programında seçilen Elastik-Viskoplastik Termal modele girilmiştir. Sıcak şekillendirme simülasyonu yapılan sistemin zımba, dişi kalıp, sac ve sac tutucu elemanları ile modelin montaj hali Şekil 3.24’de görülmektedir.



**Şekil 3.24.** Sıcak Şekillendirme işleminde kullanılan modeldeki elemanlar a) Zimba b)Dişi c) Sac d) Sac Tutucu e) Modelin Montaj Hali

## 4. BULGULAR

### 4.1. Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) Malzeme ile ilgili Bulgular

#### 4.1.1. Isıl İşlemler

1,7 mm kalınlığında, Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemeye uygulanan ısıl işlemler Çizelge 4.1' de verilmiştir. Çekme numunesi şeklinde kalıpta kestirilen tüm numuneler, ısıl işlem fırınına konulduktan sonra 700-950°C sıcaklık aralığında ve 50°C lik artırımlarla yine Çizelge 4.1' de verilen tutma sürelerine bağlı olarak fırında bekletilmişlerdir. Daha sonra durgun havada ve suda soğutma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 4. 1.** 22MnB5 (Usibor 1500) malzeme için gerçekleştirilen ısıl işlemler

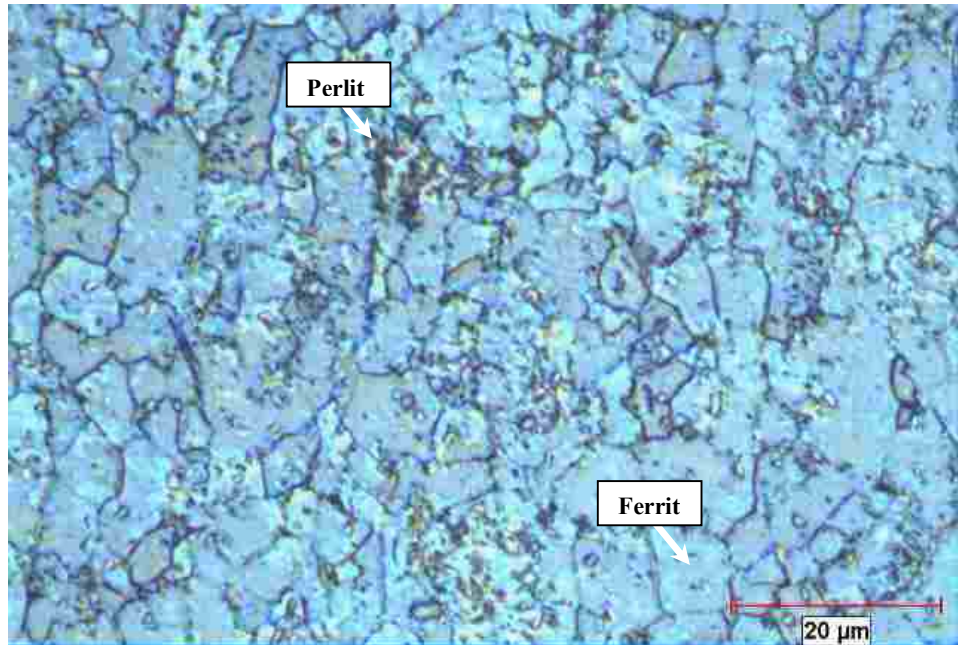
Numune Kodu	Isıl işlem sıcaklığı	Fırında Tutma süresi	Soğuma ortamı
H700	700°C	30 dk.	hava
S700	700°C	30 dk.	su
S750	750°C	30 dk.	hava
S750	750°C	30 dk.	su
H800	800°C	30 dk.	hava
S800	800°C	30 dk.	su
H850	850°C	30 dk.	hava
S850	850°C	30 dk.	su
H900	900°C	20 dk.	hava
S900	900°C	20 dk.	su
H950	950°C	15 dk.	hava
S950	950°C	15 dk.	su

Bilindiği üzere, çekme mukavemeti ve sertlik değerleri, malzemelerin mekanik özellikleri hakkında yorum yapabilmeyi sağlarlar. Bu nedenden ötürü, çalışmada çekme deneyleri ve sertlik ölçümleri yapıp, ek olarak mikro yapı analizleri

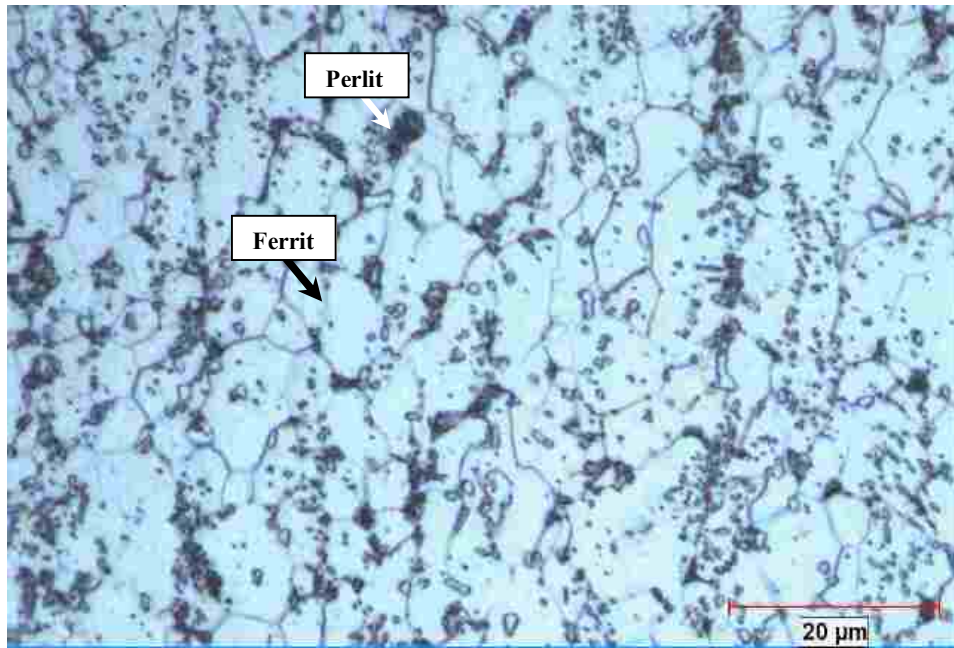
gerçekleştirilmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi, çekme deneyleri UTEST marka 25 tonluk üniversal çekme cihazında, ortalama 5 adet numune için gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, Metkon MH-3 Microvickers marka sertlik ölçme cihazıyla ve 0,98 N (HV 1) luk yük uygulanılarak ve aynı eksen üzerinden 5 adet ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan, mikro yapı analizlerinde Nikon Eclipse LV150 marka mikroskop ile 1000 büyütme objektif kullanılmıştır.

#### 4.1.1.1.Havada soğutma işlemi

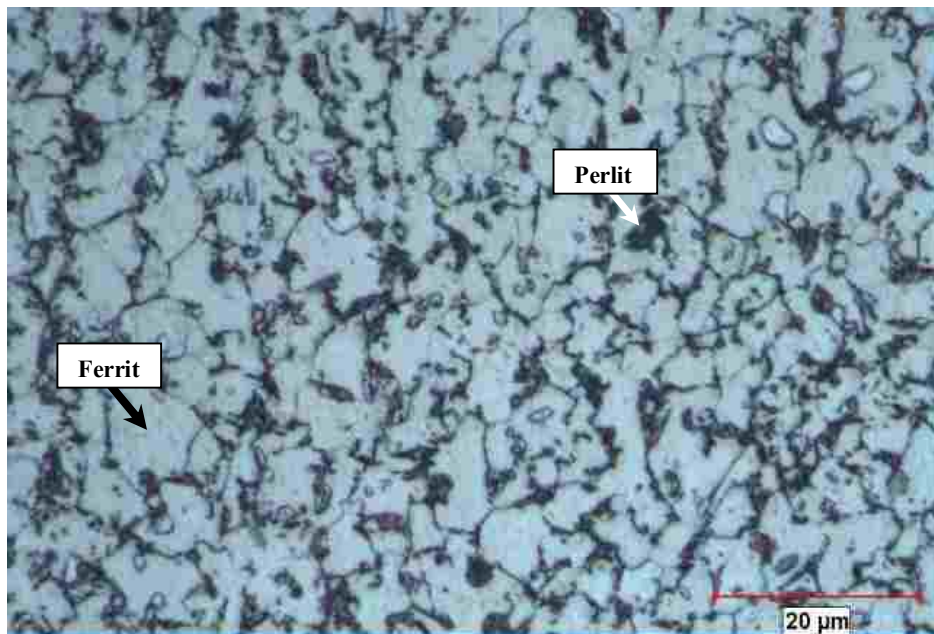
Şekil 4.1' de, Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin, (700°C, 750°C, 800°C, 850°C, 900°C ve 950°C sıcaklıklardan itibaren havada soğutulması sonucu elde edilen mikro yapı fotoğrafları görülmektedir. Malzemenin fırından çıkarıldıktan sonraki sıcaklığı, daha önceki bölümlerde bahsedilen lazer işaretlemeli infrared termometre ile 20 sn. sonra ölçülmüş ve soğuma hızı yaklaşık olarak 20°C/s olarak hesaplanılmıştır.



(a)-H700

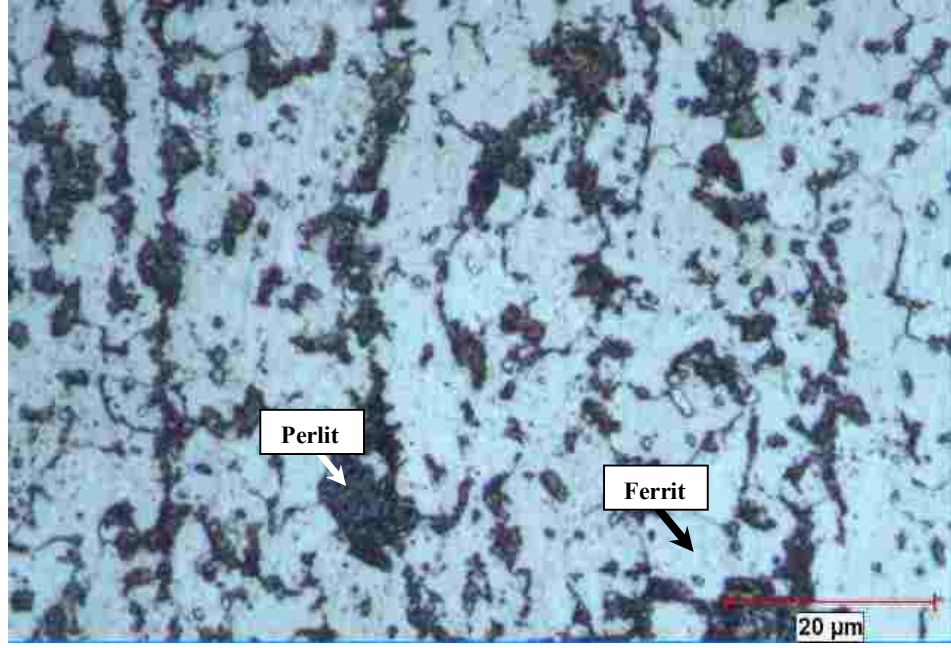


(b)-H750

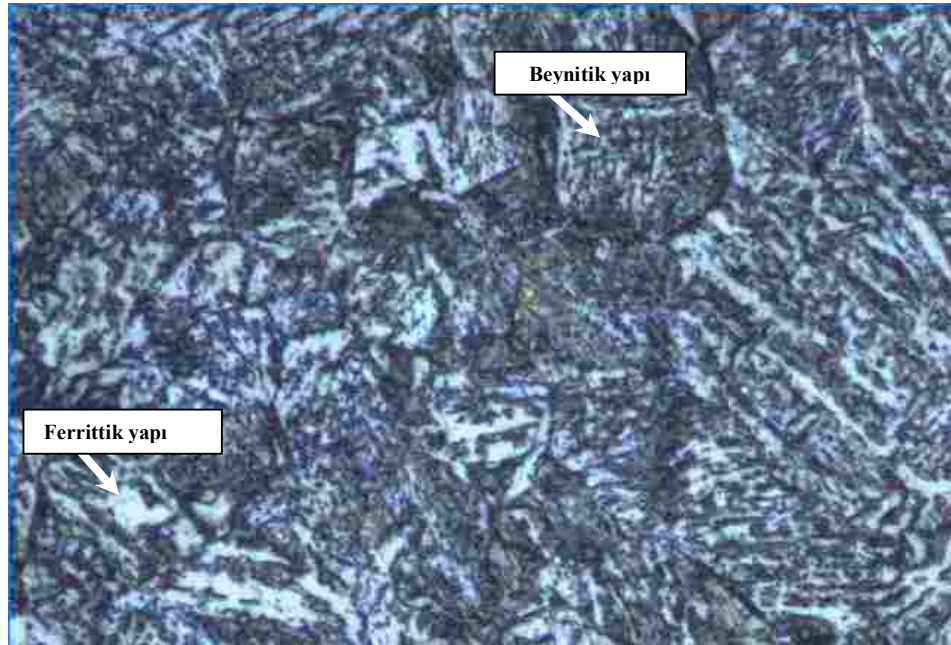


(c)-H800



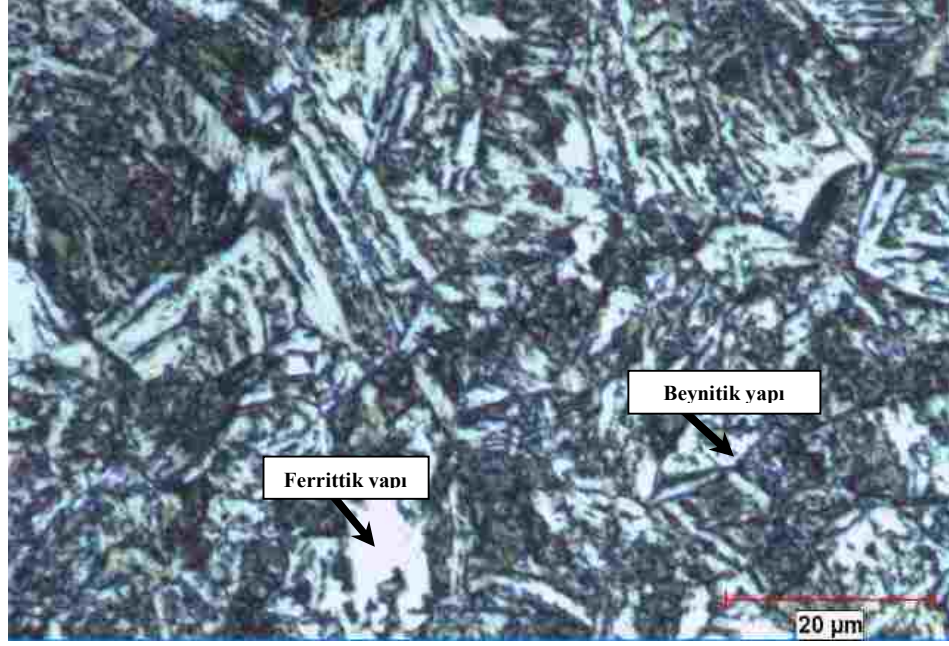


(d)-H850



(e)-H900

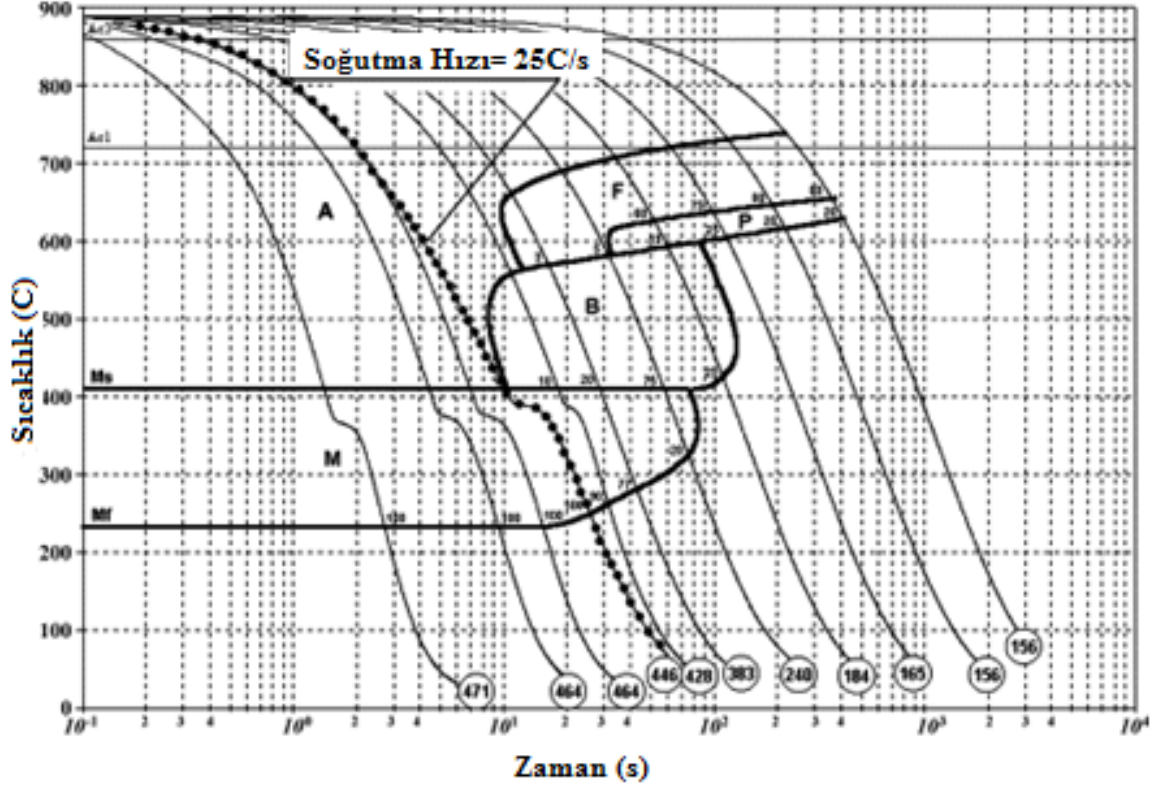




(f)-H950

**Şekil 4. 1.** Havada soğutulmuş numunelerin mikro yapı görüntüleri (1000x) a) 700°C, b) 750°C, c) 800°C, d) 850°C, e) 900°C ve f) 950°C.

Şekil 4.1 a' da, 700 °C de 30 dk. bekletilip havada soğutulan numunenin mikro yapısı görülmektedir. Bu yapı, malzemenin ısı işlem görmemiş haline benzer bir yapı olup, ferritik (beyaz)- perlitik (siyah) özellik göstermektedir. Malzemenin kritik sıcaklıkları olan  $A_{c1}$  ve  $A_{c3}$  sıcaklıkları; 750°C ve 860°C olduğundan dolayı ([http://www.arcelormittal.com/fce/prd\\_web/A54\\_EN.html](http://www.arcelormittal.com/fce/prd_web/A54_EN.html), 2012). 700°C den itibaren havada soğutulan malzemenin ferritik ve perlitik yapıda olmasını desteklemektedir.



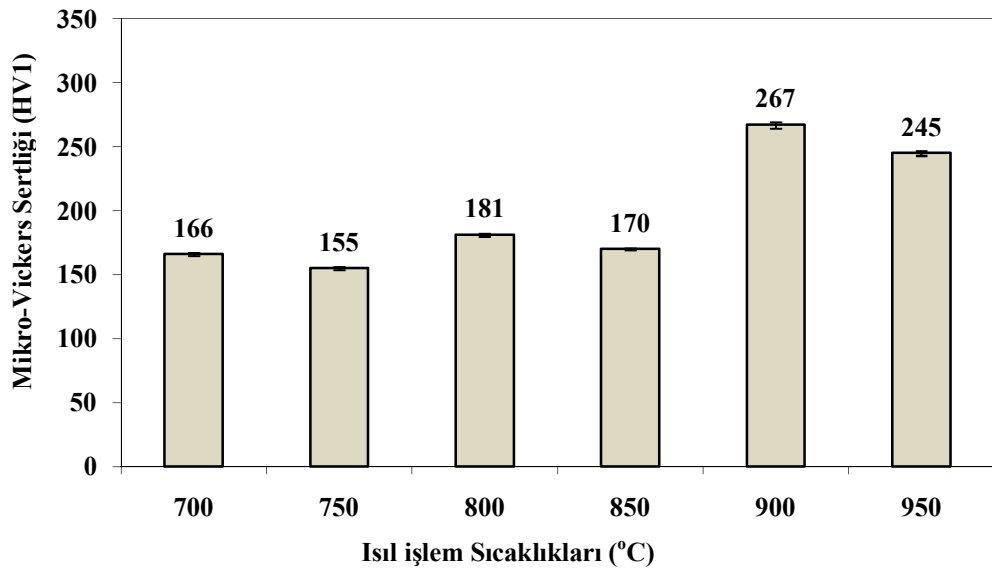
**A=Östenit, M=Martenzit, F= Ferrit, B=Beynit, P=Perlit,  
Ms= Mart. Başl. Sıc., Mf= Mart. Bitiş Sıc**

**Şekil 4. 2.** 22MnB5 Malzemenin ZSD diyagramı (Naderi ve ark. 2008)

Bununla beraber, Ac3 sıcaklığına kadar ısıtma ile elde edilecek yapı ferrit+östenit olduğundan, havada soğutma sonucu oluşacak yapı da ferrit+perlittir ve H750, H800 ve H850 numunelerinde de bu fazlar olduğu Şekil 4.1 b,c, d de görülmektedir. Yapının en büyük farkı ise tane sınırlarından oluşan perlit miktarıdır. Isıl işlem sıcaklığı arttıkça tane sınırlarındaki perlit miktarı da artmıştır.

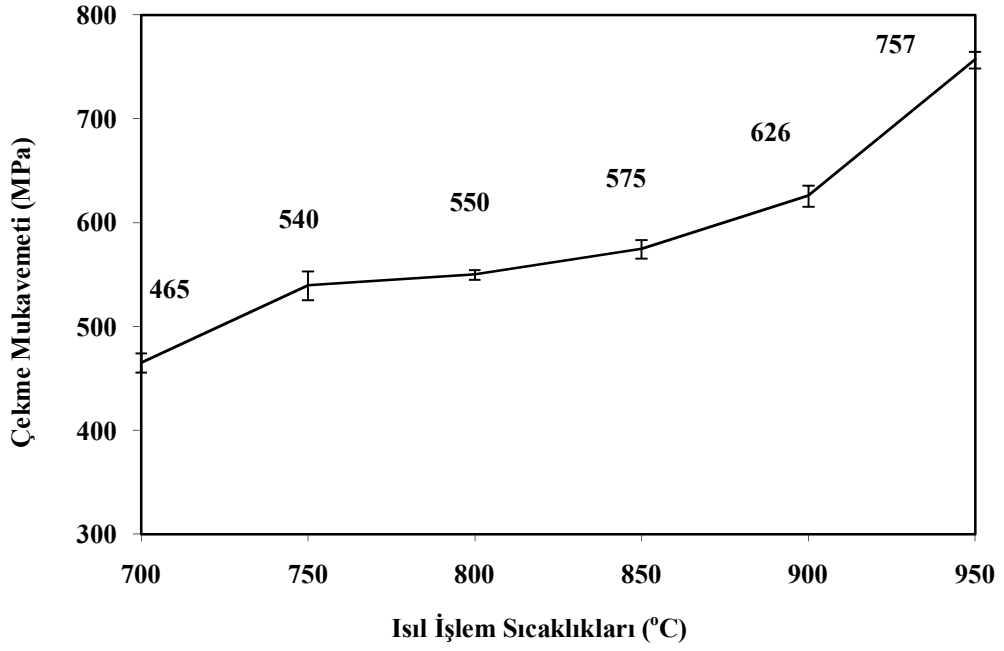
Şekil 4.1 e' de, 900°C den itibaren havada soğutulan numunenin mikro yapısı görülmektedir. Bu yapının Şekil 4.2'de verilen ZSD diyagramından da hareketle, ferritik-beynitik olup eser miktarda ise martenzit içermektedir. Fırında bekleme sıcaklığının 950°C a artmasıyla birlikte, yapı yine ferritik-beynitik ve eser miktarda martenzitiktir. Üst beynit alt beynite nazaran, daha yumuşak bir yapıdır ve bu durumdan ötürü Şekil 4.1 e' de görülen beynitik yapı alt beynit, Şekil 4.1 f' de görülen yapı ise üst beynittir.

Artan ısıtma işlem sıcaklığına bağlı olarak havada soğutma işlemi sonucunda elde edilen sertlik değerleri Şekil 4.3’ de görülmektedir. Bu değerlerin, 700-850°C aralığında belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. Çünkü bu aralıkta elde edilen mikro yapı da aynıdır. (Şekil 4.1 a,b,c,d) Ancak; 900°C ve 950°C sıcaklıklarda bey nitik yapının elde edilmesinden ötürü, sertlik 100HV1 civarında artmış ve 900°C ile 950°C sıcaklıklarda sırasıyla; 267-245HV1 olmuştur. Fakat 950°C de üst bey nitik yapı gözlemlendiğinden, 900°C ye nazaran bir miktar düşüş belirlenmiştir.



Şekil 4. 3. Havada Soğutma Sonucu Elde Edilen Mikro-Vickers Sertlik Değerleri

Isıl işlem uygulanarak havada soğutulmuş çekme numunelerinin oda sıcaklığındaki çekme mukavemeti değerleri Şekil 4.4’ de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, ısıtma işlem sıcaklığı 700°C den 950°C e artarken, çekme mukavemeti de 465 MPa dan 757 MPa’ a yükselmiştir. Yani, ısıtma işlem sıcaklığı arttıkça çekme mukavemeti de artmıştır. Malzemede elde edilen çekme mukavemetinin en yüksek değerine ise, 950°C de elde edilen ferritik, bey nit ve eser miktarda martenzit formuyla ulaşılmıştır.



**Şekil 4.4.** Havada Soğutma Sonucu Elde Edilen Çekme Mukavemeti Değerleri

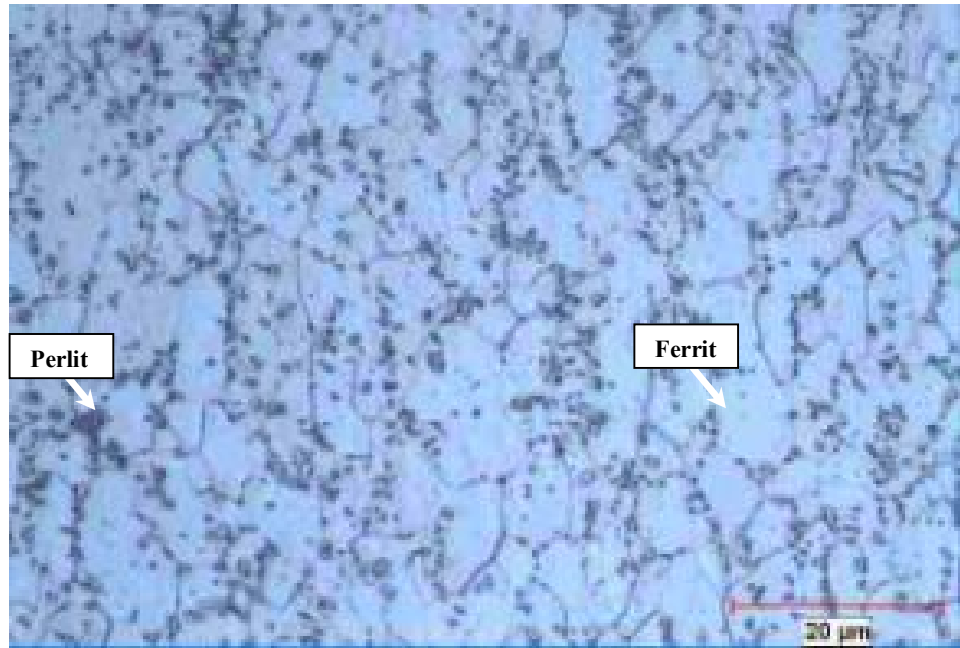
#### 4.1.1.2.Suda soğutma işlemi

Şekil 4.5' de, Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin 700°C, 750°C, 800°C, 850°C, 900°C ve 950°C sıcaklıklardan itibaren suda soğutulması sonucu elde edilen mikro yapı fotoğrafları görülmektedir. Çizelge 4.1' de belirtilen sürelerde ve sıcaklıklarda fırında bekletilen malzemeler, 17°C sıcaklıktaki suya konulup burada 20 sn. bekletilmiş ve sudan çıkarılan numunelerin sıcaklıkları lazer işaretlemeli infrared termometre ile ölçülmüştür. Bu durumda elde edilen soğuma hızı yaklaşık olarak 40°C/s olarak hesaplanılmıştır.

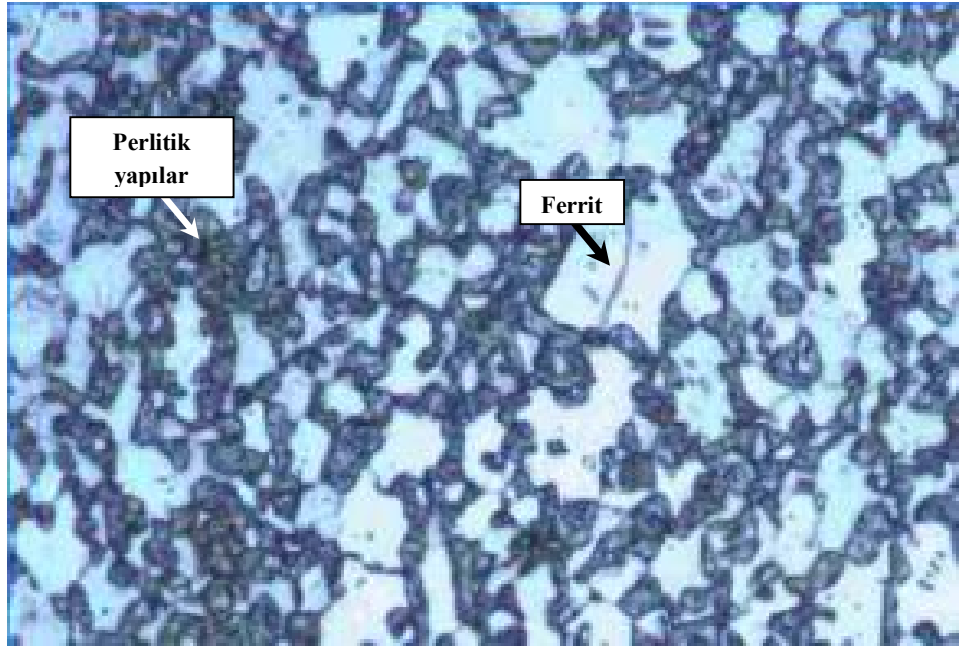
Şekil 4.5 a' da, 700°C de 30 dk. ısıtılıp, suda soğutulan numunenin mikro yapı görüntüsü verilmiştir. Elde edilen mikro yapı, 700°C nin malzemenin Ac1 sıcaklığından düşük olmasından dolayı; ferritik (beyaz) ve perlitik (siyah) tir. Fırında bekleme sıcaklığının 750°C ye çıkması sonucu, Ac1 sıcaklığı ulaşılır ve böylece ısınma sonucu elde edilen yapı yine ferritik (beyaz) ve perlitik (siyah) tir (Şekil 4.5 b).

Sıcaklığın 800°C ye ulaşmasıyla beraber, ısıtma sonucu elde edilen yapı östenit ve ferrit olduğundan, bu yapıların hızlı soğumayla martenzit ve ferrit elde edilir (Şekil 4.5 c). Çünkü karbonca zengin olan östenitik yapılar, oda sıcaklığında oluşmazlar ve hızlı soğuma sonucu bu yapıların yerini martenzitik yapılar alırlar. Bununla beraber, sıcaklığın 700°C den 750°C ye artmasıyla, ferrit miktarında da belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. S800 ve S850 numunelerinin mikro yapılarında belirgin bir değişim görülmemiş, yapı martenzit ve ferritiktir. (Şekil 4.5 c, d.) Ancak, ısıl işlem sıcaklığının artmasıyla beraber, tane boyutunda irileşme gözlemlenmiştir.

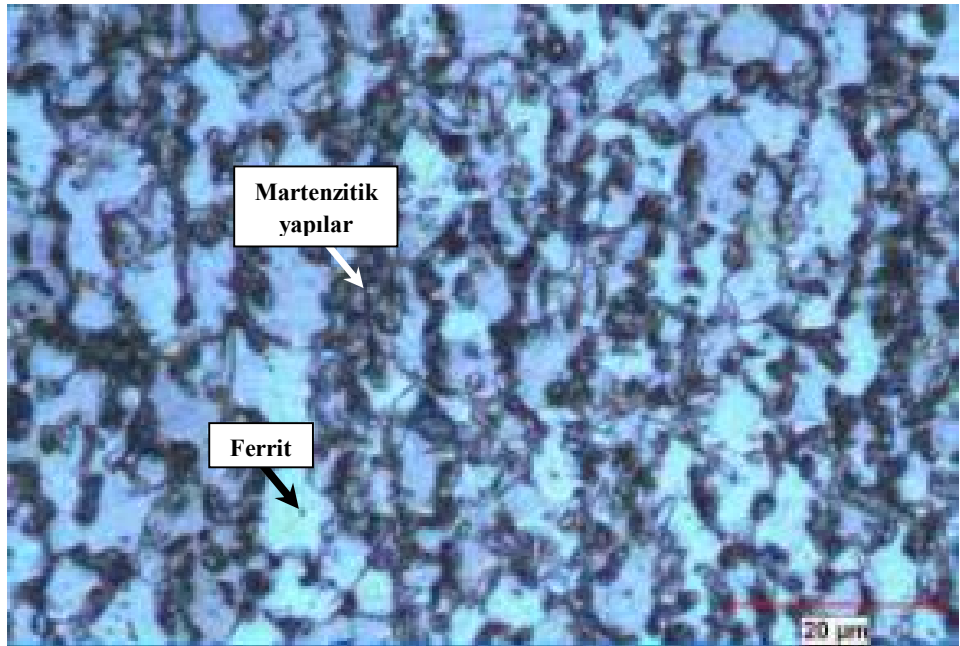
Fırında 900°C ve 950°C de ısıtıp, suda soğutma işleminde ise elde edilen yapı tamamen martenzittir (Şekil 4.5 e, f). Martenzit oluşumundaki sıcaklık etkisi, martenzit başlama (Ms) ve bitiş sıcaklıklarına (Mf) sıcaklıklarına bağlıdır. Bu sıcaklıklar, malzemenin Şekil 4.2' de gösterilen ZSD diyagramında verilmiştir. Bu diyagrama göre, yaklaşık 40°C/s hızla soğutma işlemi sonucu elde edilecek olan yapının da tamamen martenzitik olduğu görülmektedir.



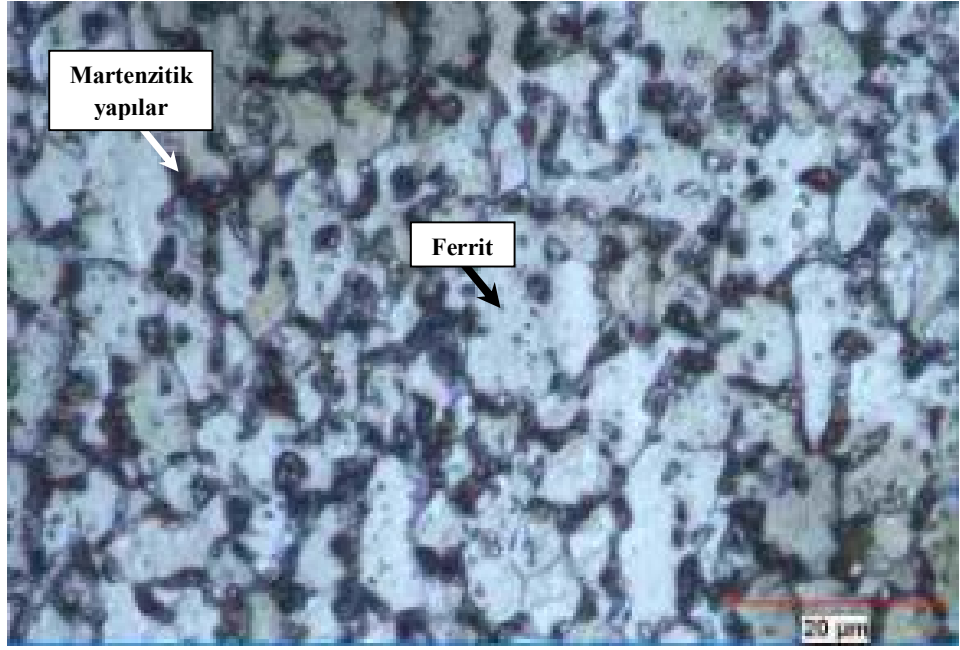
(a)-S700



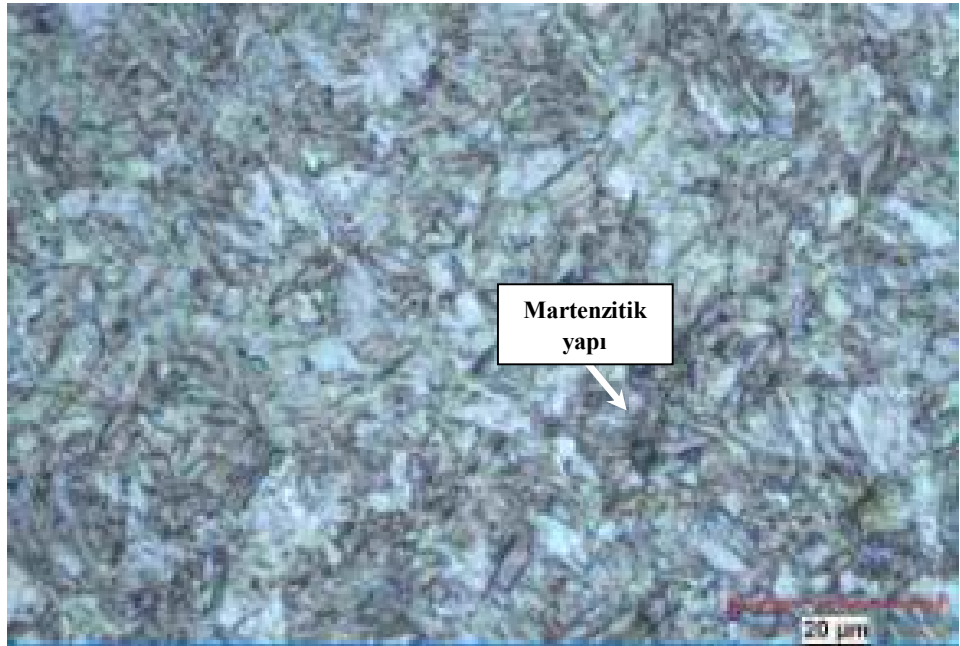
(b)-S750



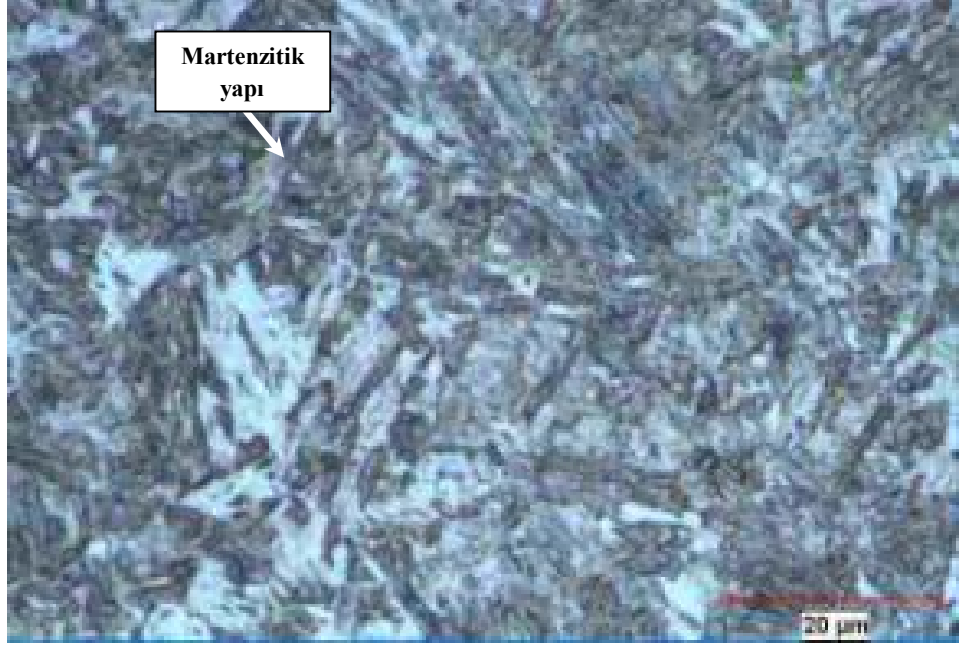
(c)-S800



(d)-S850



(e)-S900

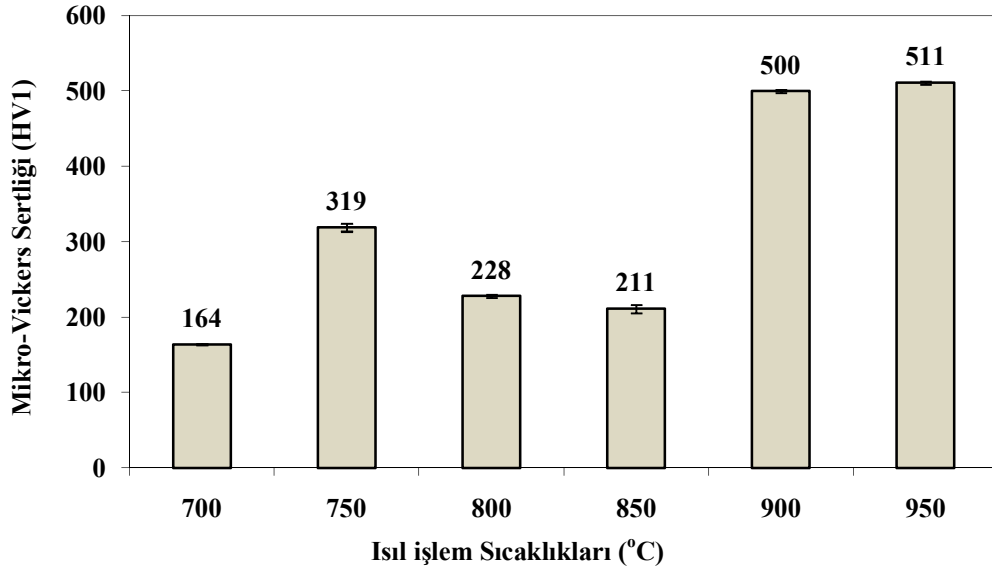


(f)-S950

**Şekil 4. 5.** Suda soğutulmuş numunelerin mikro yapı görüntüleri (1000x) (a) 700°C, (b) 750°C, (c) 800°C, (d) 850°C, (e) 900°C ve (f) 950°C.

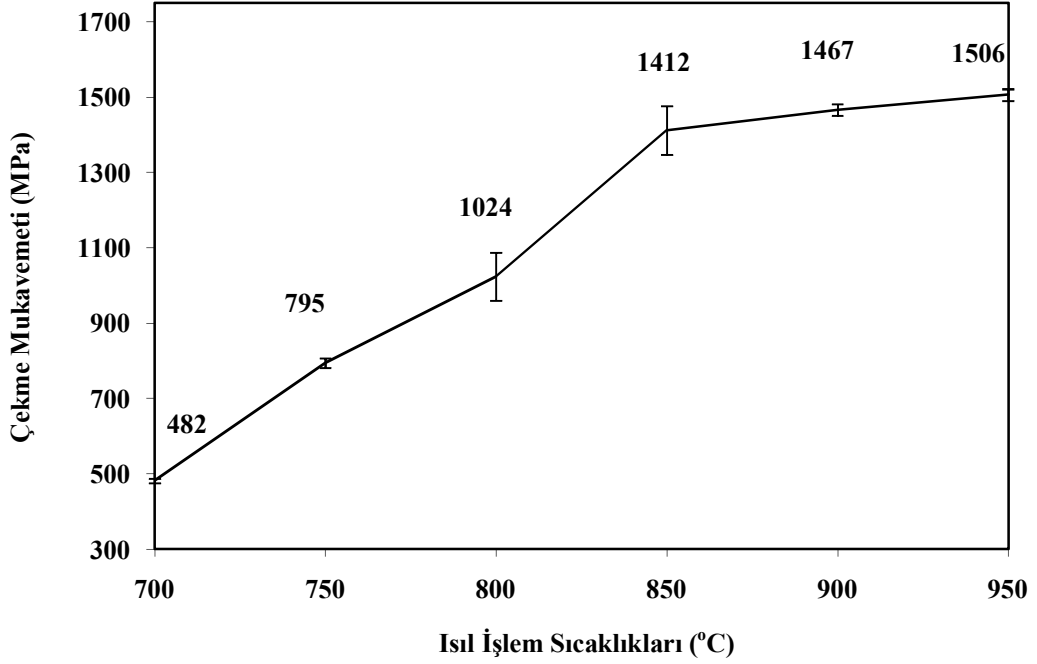
Malzemenin, 700°C, 750°C, 800°C, 850°C, 900°C ve 950°C' ler den itibaren suda soğutulması ile elde edilen sertlik değerleri de Şekil 4.6' da görülmektedir. Sıcaklığın, 700°C den 750°C ye artmasıyla birlikte perlit miktarındaki artış, sertlik değerini de arttırmıştır. 800°C ve 850°C sıcaklık aralığında sertlik değeri, 228 HV1 den 211 HV1 'e düşmüştür. Bu durum, Şekil 4.5' de görülen tane büyümesiyle açıklanabilmektedir. Bununla beraber, mikro sertlik değerindeki maksimum artış, S900 ve S950 numunelerinde elde edilmiştir (Şekil 4.5 e, f). Bu artışın sebebi, elde edilen martenzitik yapıdır. Maksimum sertlik değeri 950°C de 511HV1 olarak elde edilmiştir.





**Şekil 4.6.** Suda Soğutma Sonucu Elde Edilen Mikro-Vickers Sertlik Değerleri

Isıl işlem uygulanarak suda soğutulmuş çekme numunelerinin oda sıcaklığındaki çekme mukavemeti değerleri Şekil 4.7' de verilmiştir. Buna göre, ısıl işlem sıcaklığı arttıkça çekme mukavemeti de artmıştır. Çekme mukavemetinde en büyük artış, 850°C da olup 1024MPa dan 1412 MPa artmıştır, çünkü 850°C sıcaklık malzemenin Ac3 sıcaklığına yakındır. 900°C den sonra, çekme mukavemetindeki artış bir miktar azalır ancak 1467 MPa olup, 850°C den yine yüksektir. Fakat çekme mukavemetinin en yüksek değerine 950°C ısıl işlem sıcaklığında, 1506MPa değer ile ve martenzitik yapıdan dolayı ulaşılır. Bu durum Şekil 4.5 e, f' de görülmektedir. Ac1 sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda suda soğutma sonucu oluşan yapı ferrit ve perlit iken, Ac1-Ac3 sıcaklığı arasından soğutma da oluşan yapı yumuşak ferrit ve sert martenzittir.



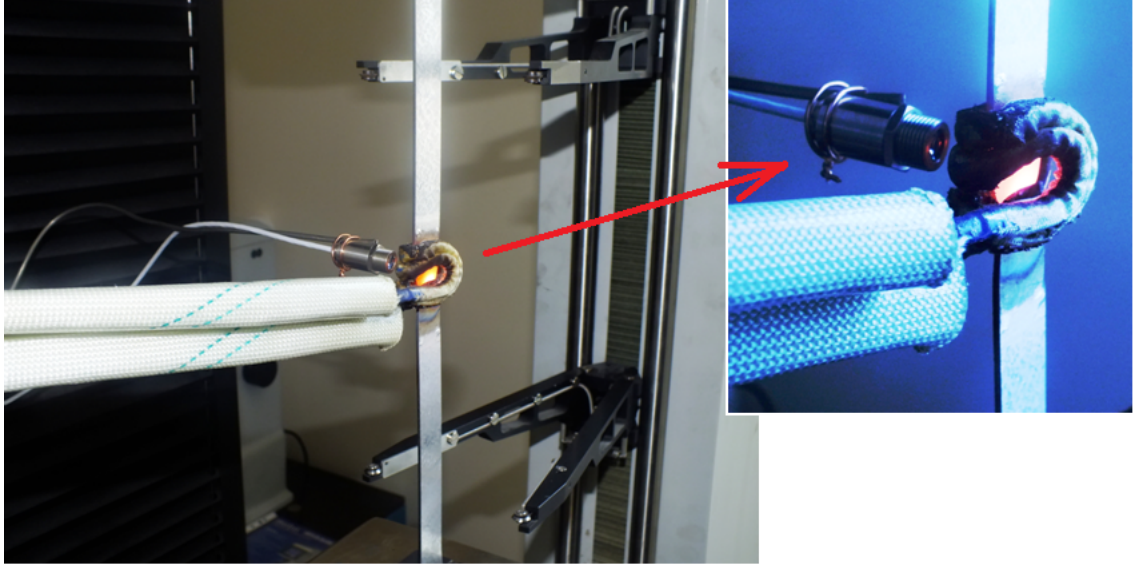
**Şekil 4.7.** Suda Soğutma Sonucu Elde Edilen Çekme Mukavemeti Değerleri

700°C-950°C aralığında gerçekleştirilen tüm ısıl işlemler neticesinde, optimum mekanik özelliklerin elde edildiği sıcaklık; 950 °C, optimum soğuma ortamı olarak su ve optimum fırında bekleme süresi olarak da 15 dk. olduğu sonucuna varılmıştır. Çünkü bu parametrelerde elde edilen çekme mukavemeti 1506 MPa ve sertlik değeri ise 511 HV1’ dir. Bu nedenden ötürü, gerçekleştirilen daha sonraki yorulma- serbest ağırlıklı düşme-kırılma tokluğu deneylerinde optimum özelliklerin sergilendiği parametrelerde ısıl işlem yapılarak, ısıl işlem görmüş ve görmemiş malzemelerin karşılaştırılması gerçekleştirilecektir.

#### 4.1.2. Sıcak Çekme Deneyleri

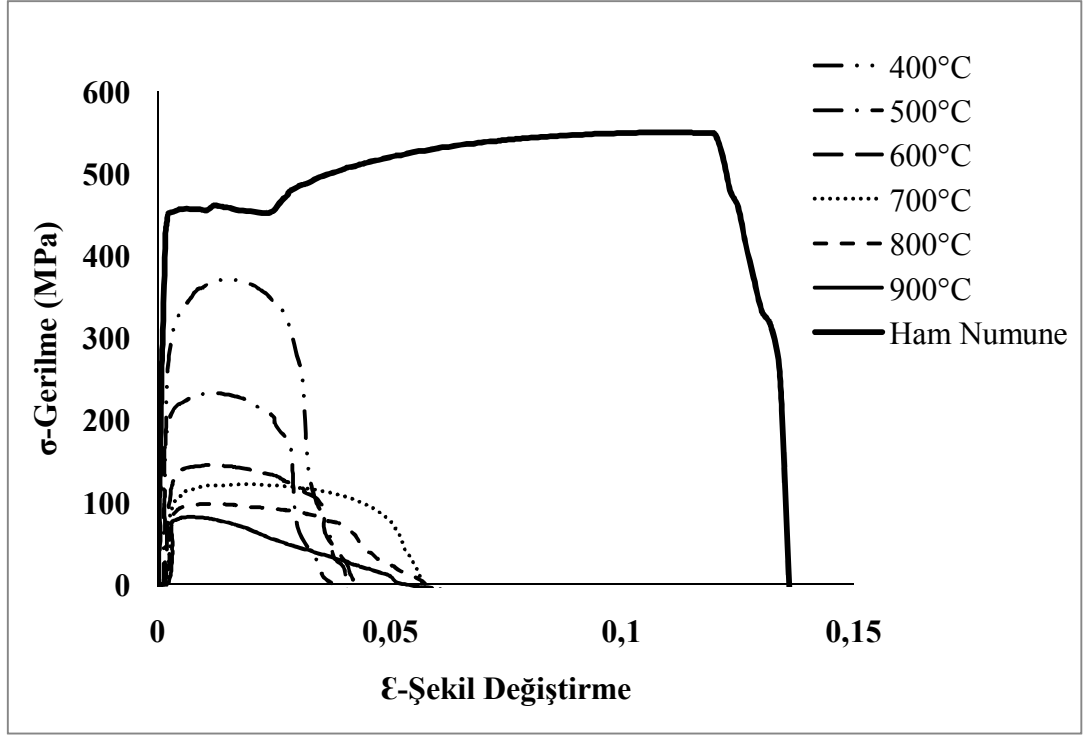
Sıcak çekme deneyleri, daha önce bahsedilen Utest marka 25 tonluk çekme cihazıyla beraber çalışabilen indüksiyon ısıtma sistemi vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. 60 s. içerisinde istenen sıcaklığa ulaşan numunenin sıcaklığı bir sensör vasıtasıyla ölçülmüş, istenen sıcaklığa ulaşıncaya kadar sıcaklık sabit kaldığından çekme işlemi o esnada başlatılmış

ve  $\dot{\epsilon}=0,083 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızıyla çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8’ de, Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin gerçekleştirilen sıcak çekme deneylerine bir örnek verilmiştir.

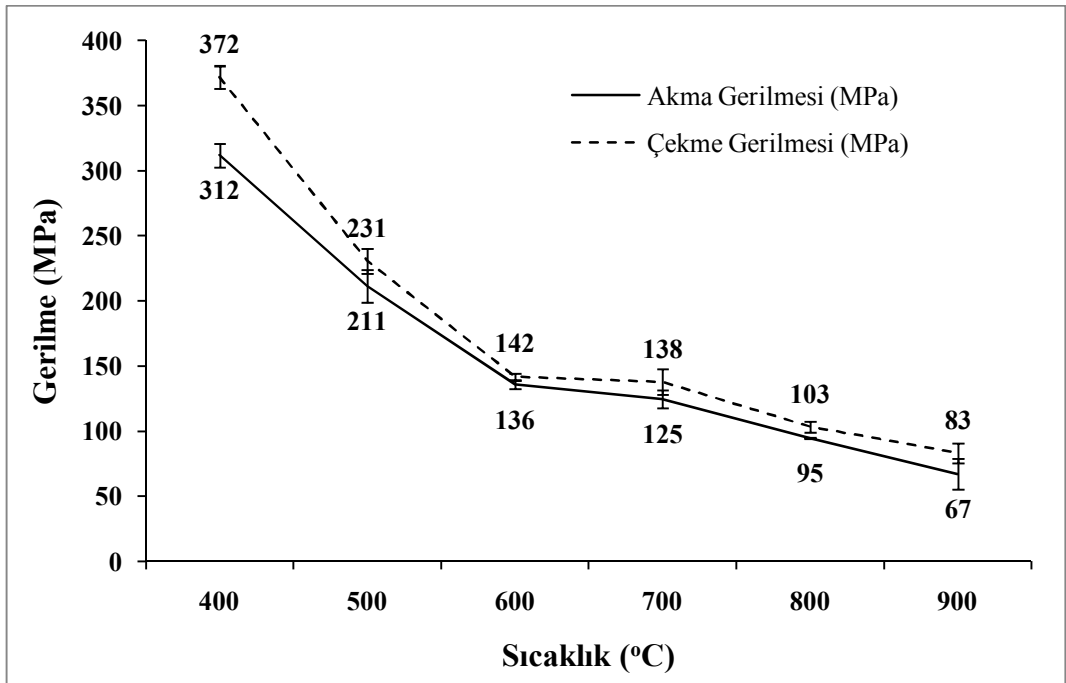


**Şekil 4.8.** Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin gerçekleştirilen sıcak çekme deneylerine bir örnek

Gerçekleştirilen çekme deneyleri sonucunda, malzemenin 400°C -500°C -600°C -700°C -800°C ve 900°C sıcaklıklarda  $\sigma$ - $\epsilon$  grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 4.9’ da, bu sıcaklıklardaki  $\sigma$ - $\epsilon$  grafiklerine örnek verilmiştir. Ayrıca deneyde, akma ve çekme gerilmeleri değerleri de elde edilmiştir. Her bir sıcaklık için, 4 adet numunenin çekme testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.10’ da tüm sıcaklıklardaki ortalama akma ve çekme dayanımı değerleri görülmektedir. Bu şekle göre; sıcaklık arttıkça, 1,7 mm kalınlığındaki Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin çekme ve akma dayanımları azalmıştır. Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin oda sıcaklığındaki akma ve çekme dayanımı sırasıyla; 415 MPa ve 509 MPa iken, maksimum sıcaklık olan 900°C ye ulaşıldığında ise bu değerler sırasıyla 67 ve 83 MPa’ a düşmüştür. Bu durum, Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor) malzemenin şekillendirilme davranışı üzerinde sıcaklık parametresinin etkisinin büyük miktarda olduğunu göstermektedir. Sıcaklık arttıkça, çekme dayanımı azaldığından dolayı sıcak şekillendirme işlemi daha kolay olmaktadır.



Şekil 4.9. Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin yüksek sıcaklıklardaki  $\sigma$ - $\epsilon$  grafikleri

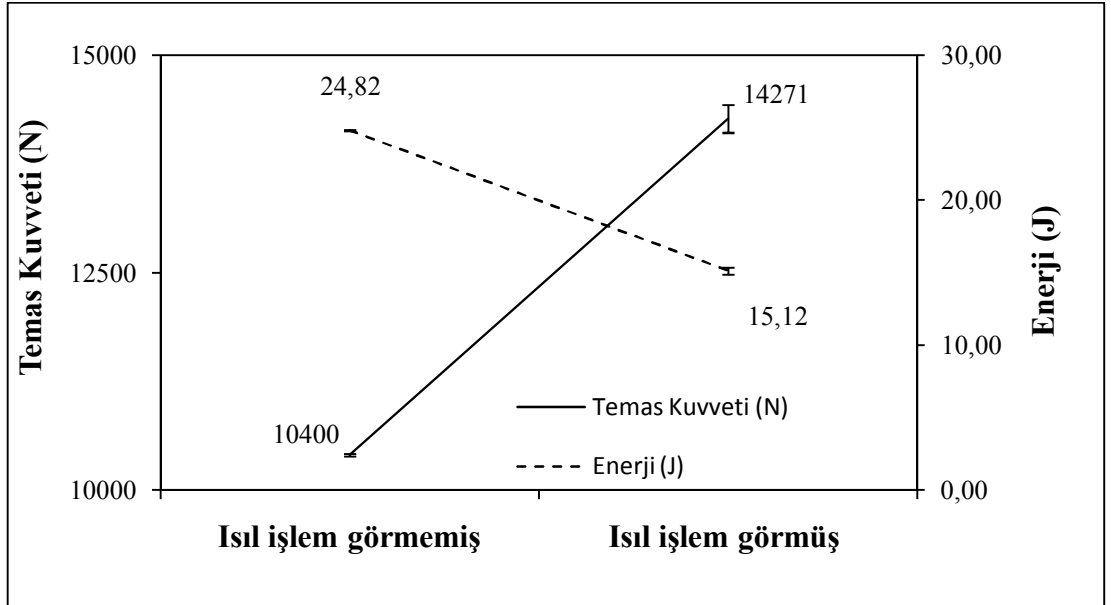


Şekil 4. 10. Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin ortalama akma ve çekme gerilmeleri değerleri

### 4.1.3. Serbest Ağırlık Düşürme Deneyleri

Çalışmanın bu kısmında, optimum mekanik özelliklerin elde edildiği, 950 °C de 15 dk. bekletme ve daha sonra suda soğutma işlemi uygulanmış numunelere, serbest ağırlık düşürme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ısı işlem görmemiş numuneler de bu deneyler gerçekleştirilerek, ısı işlem malzemenin darbe direnci üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kısaca çalışmanın bu aşamasında, malzemenin darbe etkileri karşısındaki davranışları belirlenmeye çalışılmıştır.

Deneysel olarak, ısı işlem görmüş ve görmemiş durum için 5'er adet numuneye enerji değeri olarak 30 J uygulanmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, malzemelerde oluşan temas kuvveti, malzemelerin absorbe ettiği enerji miktarı ve vurucunun hızı ölçülmüştür. Şekil 4.11' de, bu verilerin ortalama değerleri verilmiştir. Isı işlem görmemiş durumda oluşan ortalama temas kuvveti 10400 N iken ısı işlem sonucunda bu kuvvet değeri 14271 N' a çıkmıştır. Ayrıca, ısı işlem görmemiş durumda absorbe edilen enerji 24,82 J iken, ısı işlem sonucunda bu değer 15,12 J' e düşmüştür ve ısı işlem sonucu absorbe edilen enerjideki azalma %60 civarındadır.

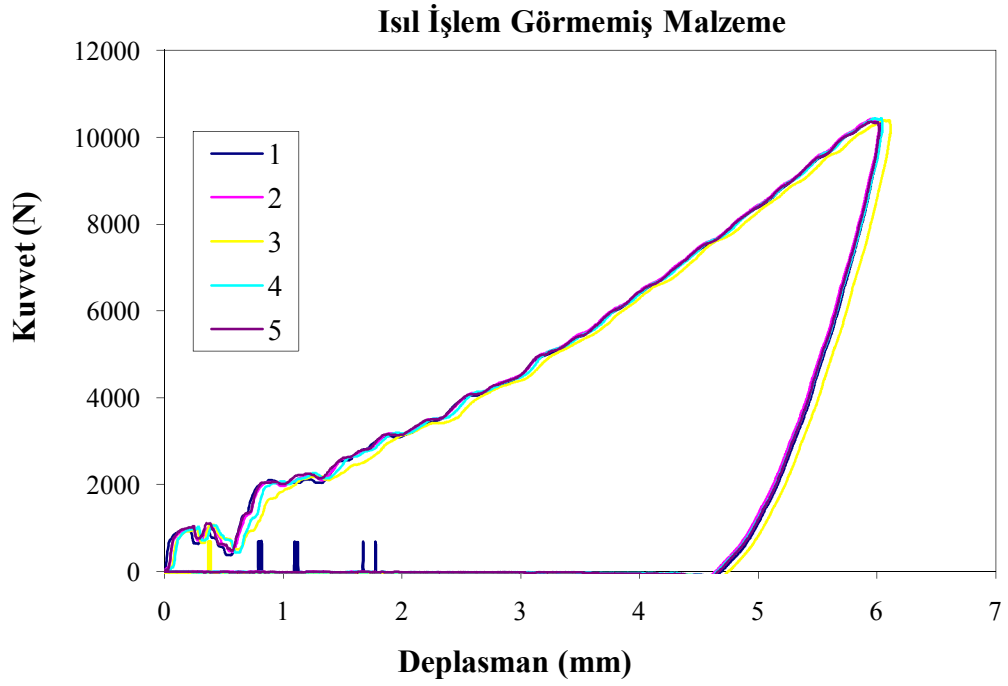


Şekil 4.11. Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin ısı işlem görmüş ve görmemiş durumları için temas kuvveti ve enerji değerleri karşılaştırması

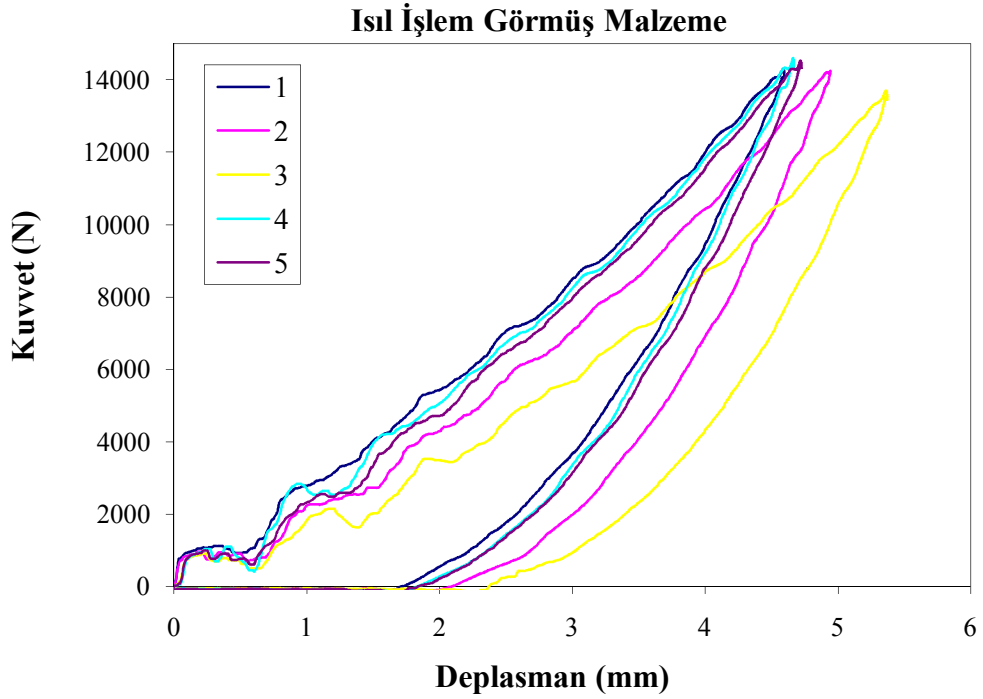
Tüm bu verilerden hareketle; 1,7 mm kalınlığındaki Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) ye uygulanan ısıtma işlemi; temas kuvvetini artırırken, enerji absorbe etme yeteneğini düşürmüştür sonucuna varılabilir. Bu durum, Bölüm 4.1.1.2' de araştırılmış olan suda soğutma işlemi sonucunda elde edilen gevrek martenzitik yapıdan kaynaklanmaktadır. Isıtma işlemi öncesi ferritik-perlitik yapı; ısıtma işlemi vasıtasıyla martenzite dönüşmüştür. Ferritik-perlitik yapının, martenzite göre daha sünek olduğu bilinmektedir.

Kuvvet-deplasman eğrileri bir darbe testinde malzeme davranışına ilişkin çok önemli ipuçları içerir. Bununla birlikte açık ve kapalı eğri olmak üzere iki tip eğri vardır. Kapalı eğri yük artışı gösteren bir bölüm ile yüklenme ve boşalma içeren bir geri dönüş bölümü içerir. Darbe enerjisi düşük olduğu zaman kuvvet-deplasman eğrisi kapalı bir eğri olur yani geri sekme sonucu kuvvet ve deplasman azalır ve eğri başlangıç noktasına yakın bir noktaya gelir. Eğer inen kısım tamamen delinmiş bir hasara aitse kuvvet-deplasman eğrisi açık eğri olur (Akgün 2010).

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de, ısıtma işlemi görmüş ve ısıtma işlemi görmemiş 5'er numunenin kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir. Bu eğrilerin altında kalan alanlar, darbe süresinde malzeme tarafından absorbe edilen enerjiye karşılık gelmektedir. Bu şekillerden yola çıkarak, ısıtma işlemi görmemiş numunelerin kuvvet-deplasman grafiği altında kalan alanların daha büyük olduğu ve dolayısıyla daha fazla enerji absorbe ettiği görülmektedir.



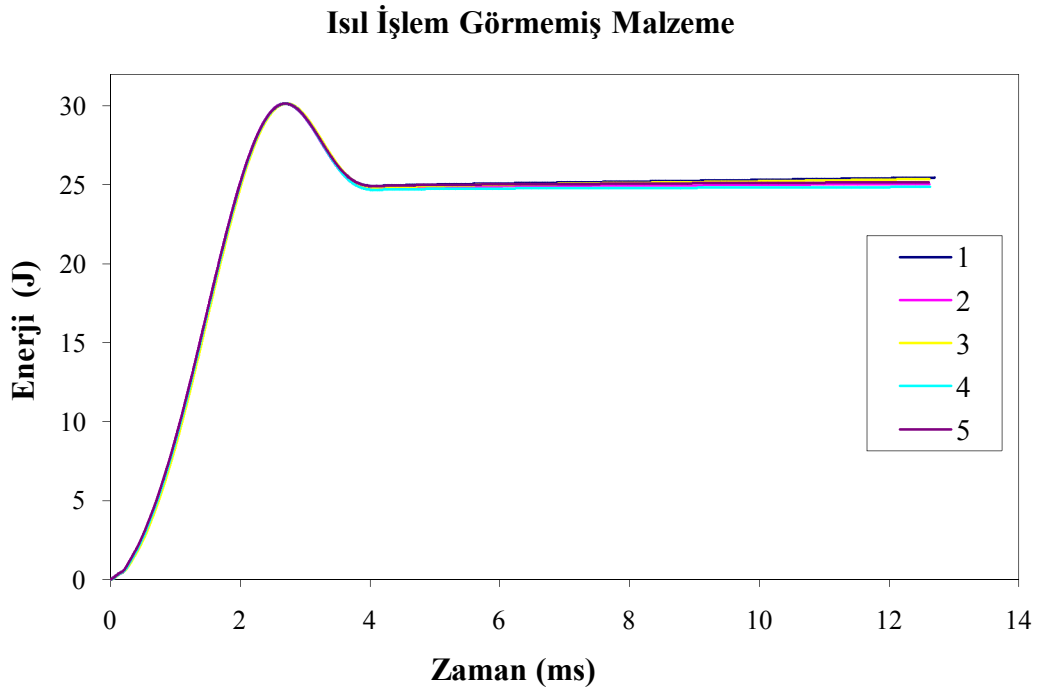
**Şekil 4. 12.** Isıl işlem görmemiş Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin kuvvet –deplasman grafiği



**Şekil 4.13.** Isıl işlem görmüş Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin kuvvet –deplasman grafiği

Darbe olayının sonunda vurucudan numuneye geçen enerji miktarı, numuneye en fazla hasarı veren enerjiye kadar artar. Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de görüldüğü üzere her bir eğri önce artmakta daha sonra ulaştığı maksimum değere ulaşır bu değerden bir miktar düşmekte ve ardından sabit bir değerde yatay bir yol izlemektedir. Bu ulaşılan maksimum nokta darbe enerjisini verir iken yatayda ulaştığı sabit nokta ise absorbe edilen enerjiyi göstermektedir. Bu ikisi arasındaki fark geri sekme enerjisini verir (Akgün 2010).

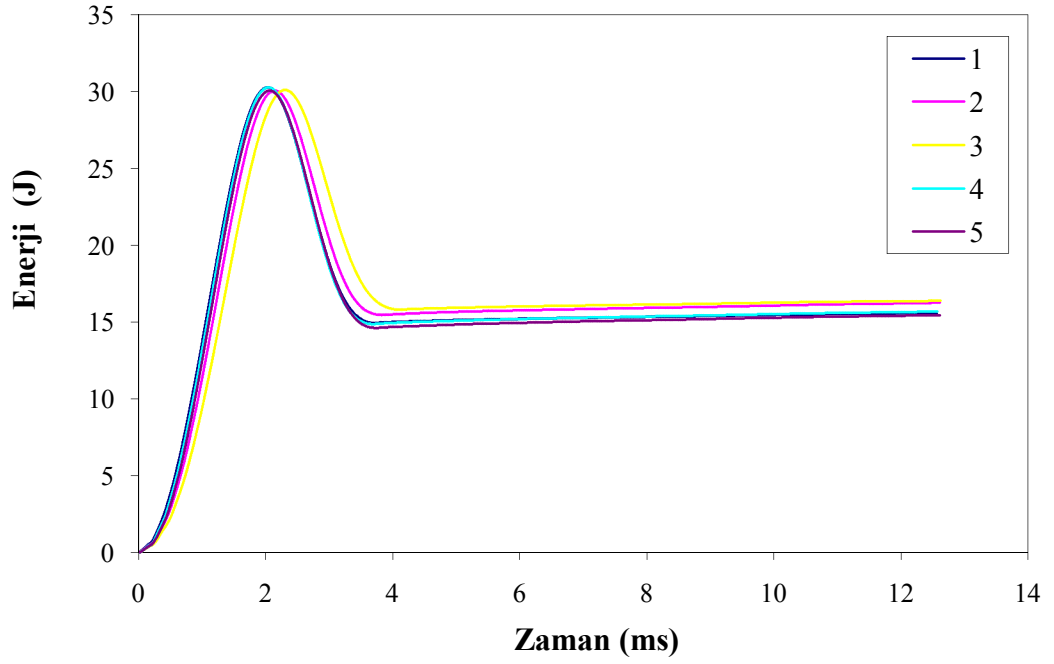
Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’den hareketle, ısı işlem görmemiş numunenin yatayda izlediği sabit değer yani absorbe ettiği enerji yaklaşık olarak 25J, ısı işlem görmüş numunenin yatayda izlediği sabit değer yani absorbe ettiği enerji yaklaşık olarak 15J dur. Bu durum, Şekil 4.11’ de verilen değerlerle örtüşmektedir.



**Şekil 4. 14.** Isıl işlem görmemiş Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin enerji –zaman grafiği

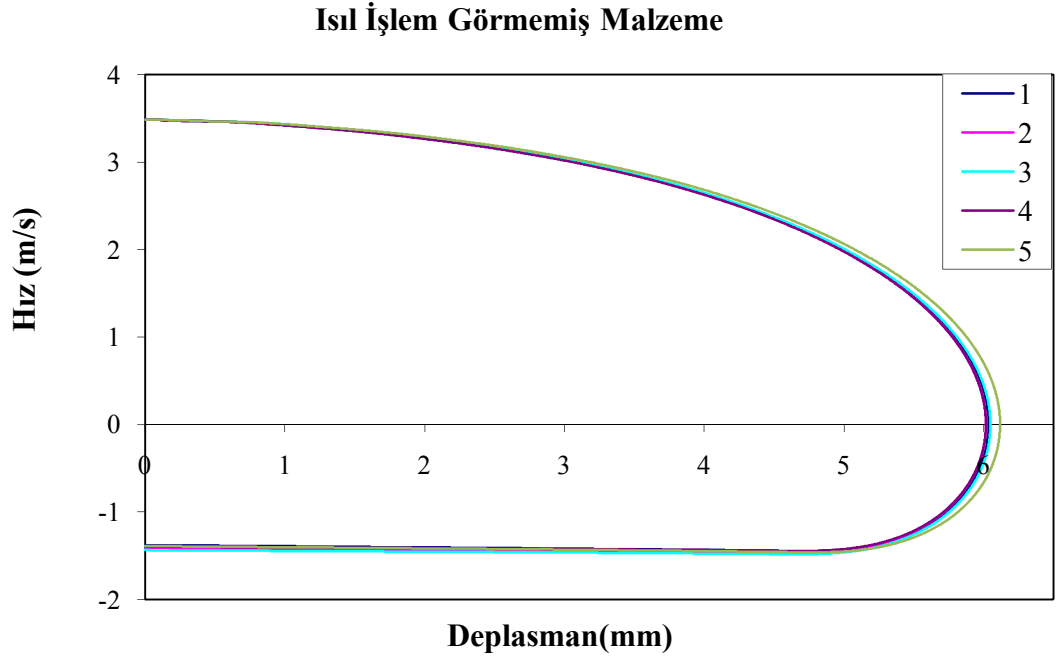


### Isıl İşlem Görmüş Malzeme

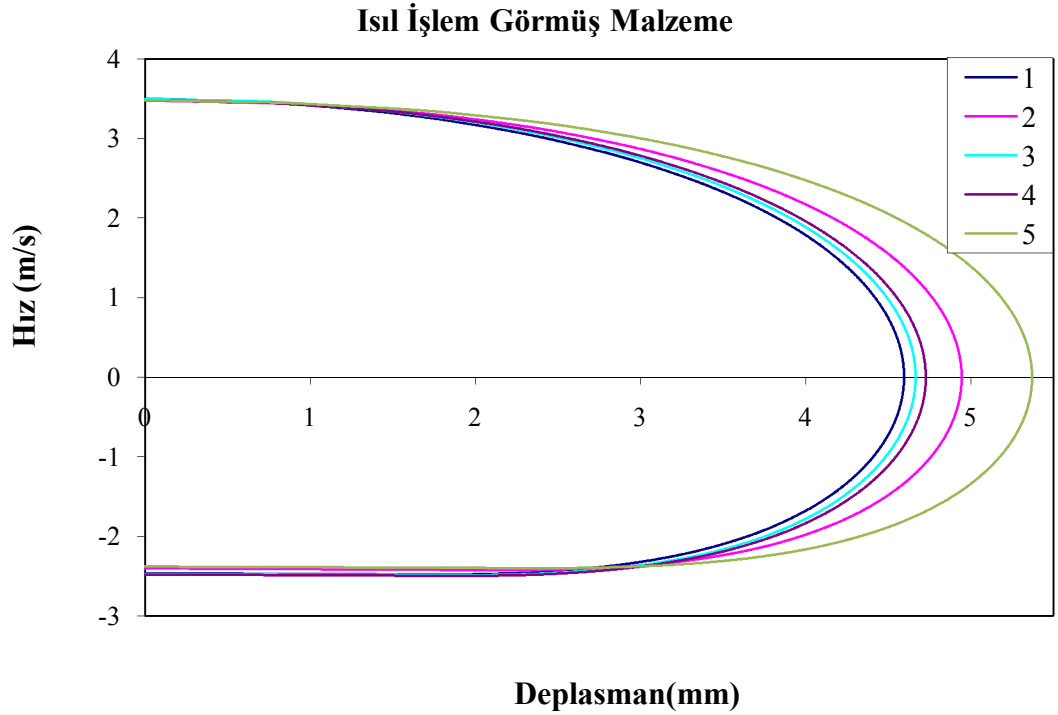


Şekil 4. 15. Isıl işlem görmüş Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin enerji –zaman grafiği

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de, ısıl işlem görmemiş ve görmüş numuneler için vurucunun hız-deplasman grafikleri görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi, hızın en yüksek olduğu zaman, numune ile vurucu arasında temas anıdır. Belli bir süre sonra, hız azalarak sıfıra ulaşır ve deplasman maksimum olur. Daha sonra hız negatif değerler alır, bu durum çarpma ucunun geri sekmesini göstermektedir.



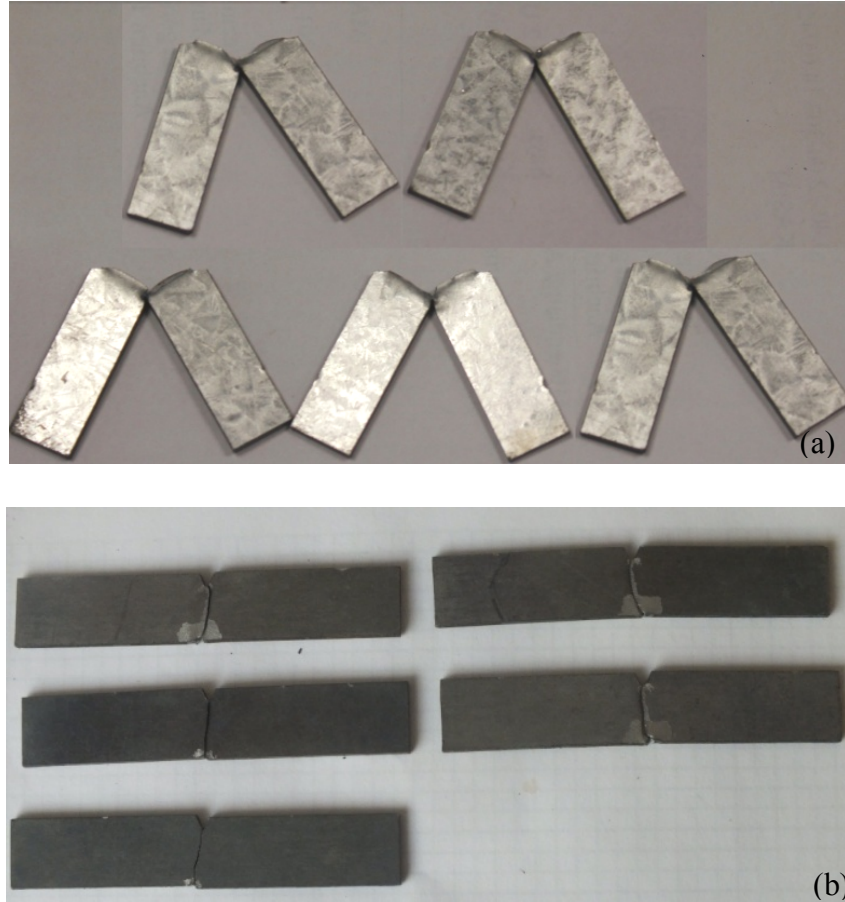
**Şekil 4.16.** Isıl işlem görmemiş Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzeme için vurucunun hız –deplasman grafiği



**Şekil 4. 17.** Isıl işlem görmüş Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzeme için vurucunun hız –deplasman grafiği

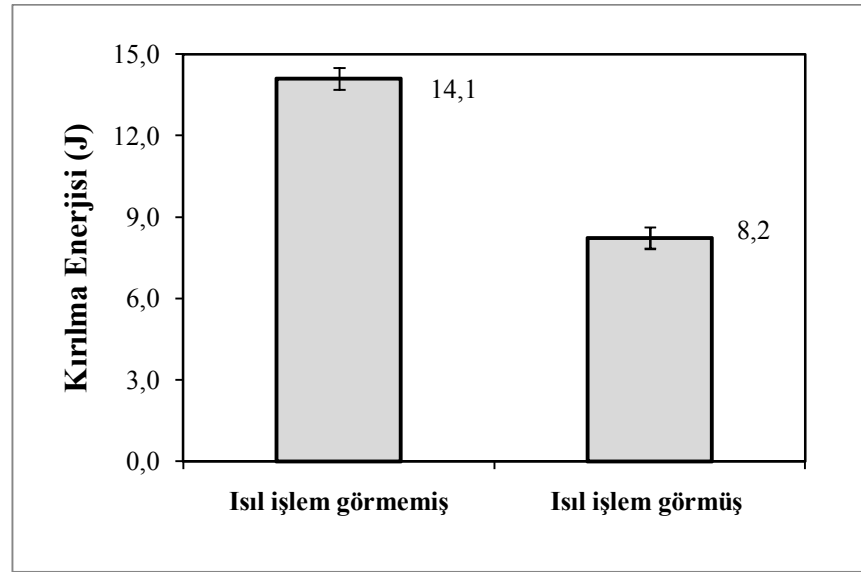
#### 4.1.4. Charpy (Çentik darbe) Deneyleri

Çalışmanın bu kısmında, dinamik yüklere karşı kırılma enerjisini belirlemek için çentik darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, optimum mekanik özelliklerin elde edildiği, 950 °C de 15 dk. bekletme ve daha sonra suda soğutma işlemi uygulanmış numunelere, ve ayrıca ısıtılma işlemi görmemiş numunelere de bu deneyler gerçekleştirilerek, ısıtılma işleminin malzemenin ani uygulanan yük altında kırılması için gerekli enerji miktarları belirlenmiştir. Her bir grup için 5 er adet numuneye çentik darbe deneyi uygulanmıştır. Şekil 4.18' de, çentik darbe işlemi uygulanan ısıtılma işlemi görmemiş ve ısıtılma işlemi uygulanmış numunelere örnekler verilmiştir.



**Şekil 4.18.** Çentik darbe işlemi uygulanan (a) ısıtılma işlemi görmemiş (b) ısıtılma işlemi görmüş Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) numuneler

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda gözlemlenen en önemli fark; ısı işlem görmemiş numunelerde tam kırılmanın gerçekleşmeyip numunenin V şeklini alması ve aksine ısı işlem görmüşlerde ise tam kırılma gerçekleşmesidir. Bu gözlem; Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemeye ısı işlem uygulamasının malzemeyi gevrekleştirdiğini göstermektedir. Şekil 4.19’da verilen çentik darbe deney sonuçları değerlendirildiğinde ise; ısı işlem görmemiş numuneler için ortalama kırılma enerjisi 14,1 Joule iken ısı işlem sonucu bu değer 8,2 Joule’ e düşmüş ve yaklaşık %42 azalma gözlemlenmiştir. Enerji değerindeki bu azalmanın sebebi; Bölüm 4.1.1.2’ de araştırılan mikro yapı dönüşümünden kaynaklanmaktadır. Bilindiği üzere; ısı işlem öncesi mevcut olan ferritik-perlitik yapı; suda soğutma işlemi sonucunda elde edilen gevrek martenzitik yapıya dönüşmüştür. Bu durumdan ötürü, ısı işlem sonrası mikro yapı dönüşümünden dolayı, malzemenin kırılma enerjisi değerinde azalma olduğu söylenebilir.



**Şekil 4. 19.** Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin ısı işlem görmüş ve görmemiş durumları için kırılma enerjisi değerlerinin karşılaştırması

#### 4.1.5. Yorulma Deneyleri

Bu bölümde, ısıtılma işlem görmüş (optimum durum) ve ısıtılma işlemiz durumlar için düzlemsel eğilme gerilmeli yorulma deneyleri gerçekleştirilerek Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin Wöhler eğrileri ( $\sigma$ -N) elde edilmeye çalışılmıştır. Malzemenin sonsuz ömür değeri olarak Akay (2005) 'ın yapmış olduğu tez çalışmasında belirtilen  $2 \times 10^6$  çevrim değeri kabul edilmiş ve yine bu çalışmada olduğu gibi her bir gerilme değeri için 3 ya da 4 ölçüm gerçekleştirilmiştir.

Bununla beraber, Bölüm 4.1.1.2' de Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin 950 °C de 15 dk. bekletme ve daha sonra suda soğutma işlemiyle optimum çekme dayanımına ulaşıldığı sonucu elde edilmişti. Ayrıca, hatırlanacağı üzere, Bölüm 3.2.8' de belirtildiği gibi; uygulanan gerilmeler, cihaz üzerinde dijital kumpas yardımıyla ayarlanan sehim (çökme) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Daha önce çıkarımı gerçekleştirilen Denklem 3.10'da ki sehim ifadesinde, uygulanacak gerilme değerleri yerleştirilerek cihaz üzerinde ayarlanması gereken değerler hesaplanmıştır. Bu formulasyonda kullanılan akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri ise, Bölüm 3.1.1 ve Bölüm 4.1.1.2' de anlatılan çekme deneyleri sonucu elde edilmiştir.

Buradaki önemli nokta Subaşı ve Karataş (2010)' ın yapmış oldukları çalışmada belirttikleri gibi uygulanacak gerilmelerin akma gerilmesinin altında seçilmesi gerektiğidir. Bu nedenle akma gerilmesinin altında seçilecek olan gerilmeler, farklı emniyet katsayısı değerleri ile belirlenmiştir. Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'de testlerde uygulanan emniyet katsayısı, gerilme ve yorulma cihazı üzerinde ayarlanan sehim (çökme) değerleri verilmiştir.

**Çizelge 4. 2.** Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin ısıtılma işlem görmemiş durumu için emniyet katsayısı, gerilme ve sehim değerleri

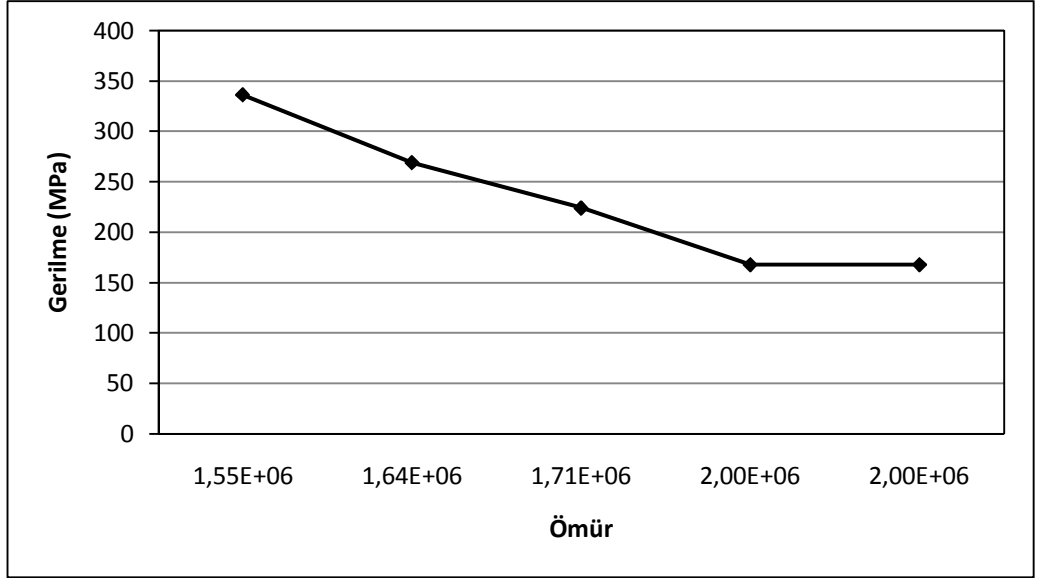
<b>Emniyet Katsayısı</b>	S=1	S=1,25	S=1,5	S=2
<b>Gerilme (<math>\sigma</math>)</b>	336 MPa	269 MPa	224 MPa	168 MPa
<b>Sehim (Y)</b>	5,38 mm	4,31 mm	3,59 mm	2,69 mm

**Çizelge 4. 3.**Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin ısıtıl işlem görmüş durumu için emniyet katsayısı, gerilme ve sehım değerleri

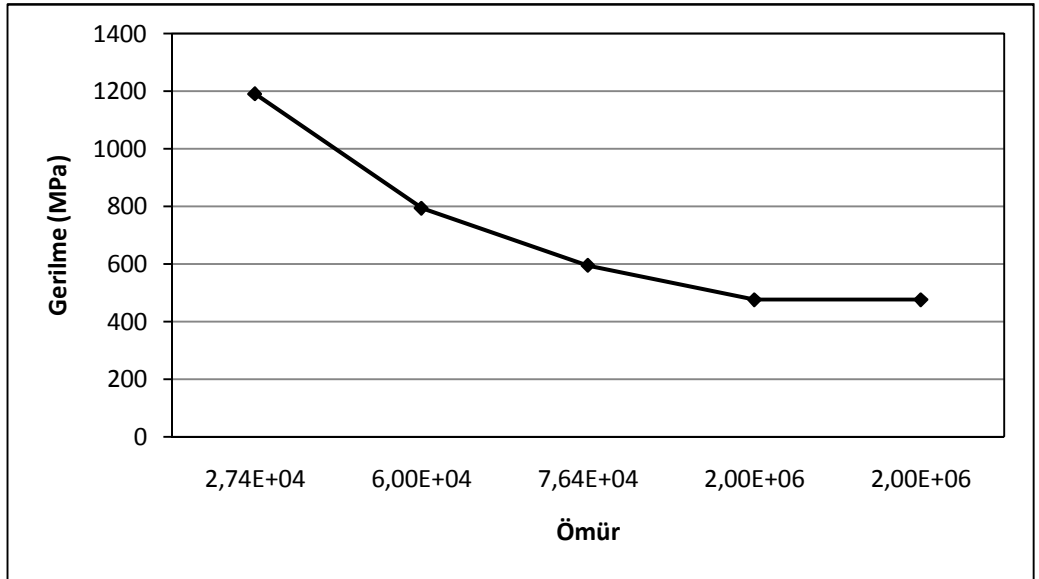
<b>Emniyet Katsayısı</b>	S=1	S=1,5	S=2	S=2,5
<b>Gerilme (<math>\sigma</math>)-MPa</b>	1190 MPa	793 MPa	595 MPa	476 MPa
<b>Sehim (Y)-mm</b>	17,3 mm	11,53 mm	8,65 mm	6,92 mm

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, sonsuz ömür olarak kabul edilen  $2 \times 10^6$  çevrim değerine ısıtıl işlemsiz durum için 168 MPa gerilme değerinde ve ısıtıl işlem görmüş durum içinse 476 MPa gerilme değerinde ulaşılmıştır. Bu durum; 950 °C de 15 dk. bekletme ve daha sonra suda soğutma ısıtıl işlemin yorulma dayanımını arttırdığını ve daha yüksek gerilme değerlerinde sonsuz ömüre ulaşılabilineceğini göstermektedir. Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemeye ısıtıl işlem uygulanması ile kırılmadan taşınabilecek gerilme yaklaşık olarak 2,8 kat artmıştır.

Tüm deneyler ışığında, başlangıçta ferrit + perlit mikro yapısına sahip Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) çelik malzemenin yorulma ömrünün, ısıtıl işlem sonrası elde edilen martenzit mikro yapısına göre daha düşük olduğu yorumu yapılabilir. Ayrıca, ısıtıl işlemin yorulma dayanımı üzerindeki etkisinin önemli derecede olduğu sonucuna varılabilir. Deneyler yoluyla oluşturulan Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’ de verilen Wöhler eğrilerinden ( $\sigma$ -N) de bu durum açıkça görülebilmektedir. Uygulanan gerilme değeri arttıkça, yorulma ömrü de azalmıştır.



Şekil 4 .20. Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin ısı işlem görmemiş durumu için Wöhler eğrisi ( $\sigma$ -N)



Şekil 4 .21. Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin ısı işlem görmüş durumu için Wöhler eğrisi ( $\sigma$ -N)

#### 4.1.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi Çalışmaları

Çalışmanın bu kısmında, daha önceki bölümlerde bahsedilen Dynaform sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak gerçekleştirilen sıcak şekillendirme (termo-mekanik) ve soğuk şekillendirme simülasyon sonuçları verilip, iki prosesin şekillendirme açısından karşılaştırılması yapılmıştır.

Kalıp düzeneğinde daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi; zımba, dişi, sac ve sac tutucu elemanları bulunmaktadır. Bu elemanlar; yüzey formunda modellenmiş ve mesh işleminde de quadrangle (dörtgen) eleman ile yüzey mesh (surface mesh) kullanılmıştır. Zımba ve dişi kalıp elemanlarının ilk sıcaklıkları olarak; programa ortam sıcaklığı olan 25°C girilmiştir. Sac malzemenin başlangıç sıcaklığı ise; bahsedilen modelin Beyçelik firmasındaki gerçek sıcak şekillendirilmesi esnasında termal kamerayla sıcaklık ölçümü sonucu belirlenmiş ve bu değer programa 550°C olarak girilmiştir. Malzemenin sıcaklığa bağlı olarak programa girilen akma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri, Bölüm 4.1.2’ de belirtilen sıcak çekme deneylerinden elde edilmiştir.

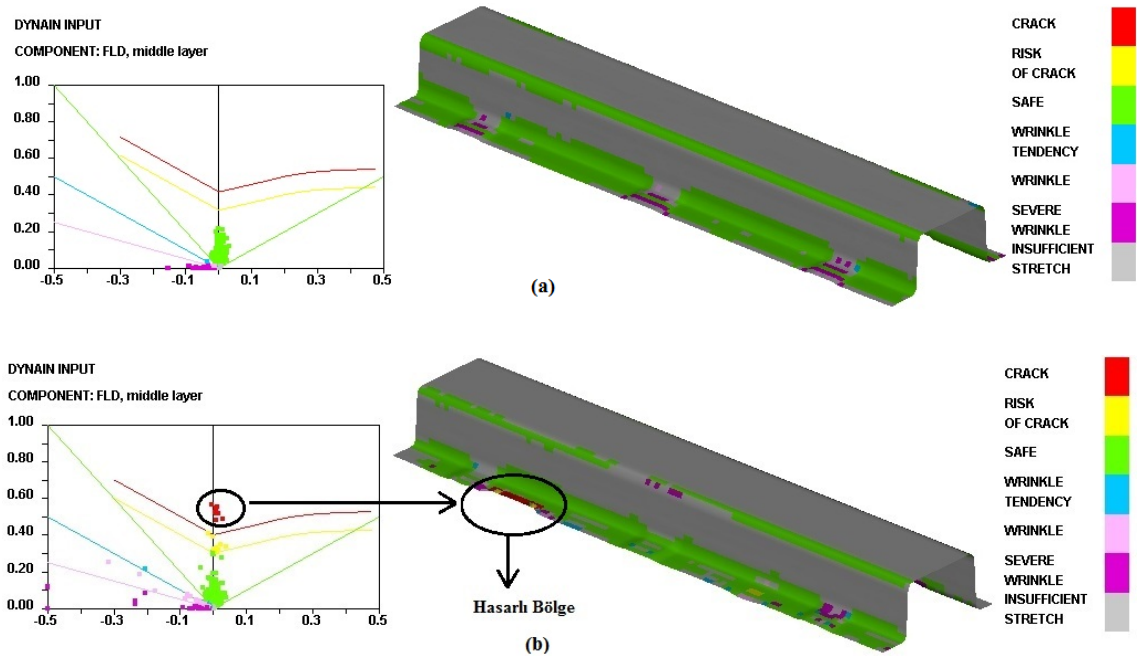
Dynaform programında tanımlanan şekillendirme işlemi iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama; dişi kalıbın sac tutucuya dayanması olarak tanımlanan “closing (kapanma)” aşamasıdır. Bu süreçte hareket edecek olan dişi kalıbın hızı; 2500 mm/s kabul edilmiştir. Bu esnada, diğer tüm parçaların konumu sabittir. Daha düşük hızlar seçilmemesinin nedeni, bu durumun çözüm süresini arttırmamasından dolayıdır. Çalışmada farklı hızlar da denenmiş ancak, sonuçlarda herhangi bir değişikliğe sebep olmamıştır. İkinci aşama; “drawing (şekillendirme)” adı verilen asıl aşamadır ve bu süreçte ise dişi kalıbın “closing” aşamasından sonra 68 mm hareket ettiği ve kapanma işleminin gerçekleştiği tanımlanmıştır.

Şekil 4.22’ de Dynaform programında öngörülen, 1,7 mm lik Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin sıcak ve soğuk şekillendirilmelerine ait FLD (forming limit diagram) grafikleri verilmiştir. FLD diyagramı, sac malzemenin şekillendirme esnasında karşılaşılabileceği bütün deformasyonları göstermektedir. Bu diyagram genel olarak değerlendirildiğinde; kırmızı çizginin üzerindeki bölgeler riskli bölgeler olarak tanımlanır ve şekillendirme işlemi sonucunda yırtılma olabileceğini, sarı renkli kısımlar; yırtılma riskini içerdiği, yeşil kısımlar; güvenli şekillendirmeyi, mavi renkli kısımlar



buruşma eğiliminin olduğu, pembe renkli kısım buruşmanın meydana geldiği, mor renkli kısımlar; yoğun buruşma ve gri bölgeler ise yetersiz gerilme olan kısımları göstermektedir.

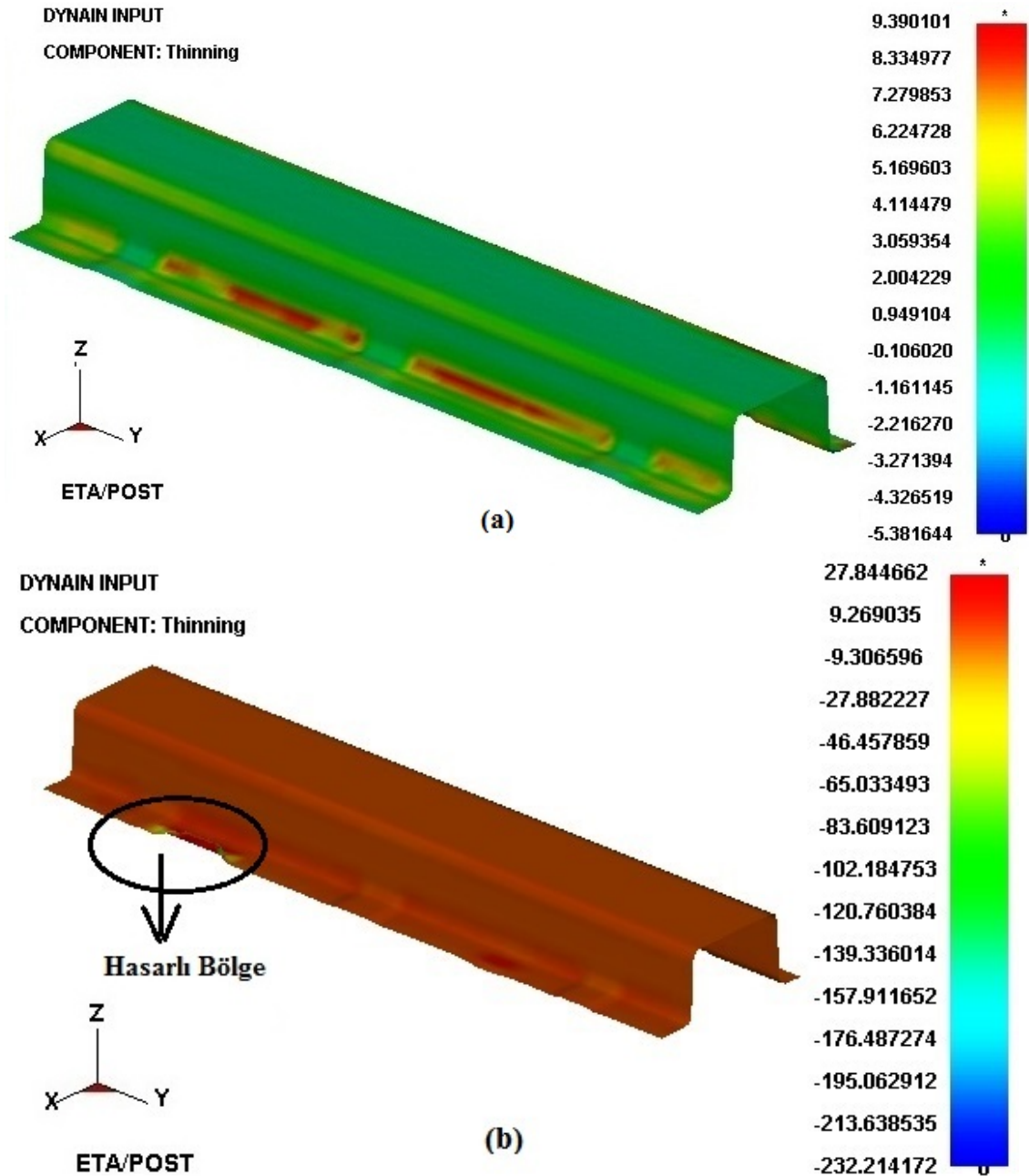
Buna göre; Şekil 4.22 a' de verilen FLD diyagramından hareketle, Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin sıcak şekillendirilmesi esnasında grafikte kırmızı ve sarı bölgeler olmadığından ötürü herhangi bir yırtılma veya yırtılma riskiyle karşılaşmayacağı görülmektedir. Ancak diğer taraftan Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin soğuk olarak şekillendirilmesi esnasında FLD grafiğinde kırmızı ve sarı bölgeler oluşmuştur. Böylelikle soğuk şekillendirme sonucunda, yırtılma problemiyle karşılaşıldığı sonucuna varılmıştır. (Şekil 4.22 b).



**Şekil 4. 22.** Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin (a) Sıcak şekillendirme sonucu (b) Soğuk şekillendirme sonucu FLD diyagramı

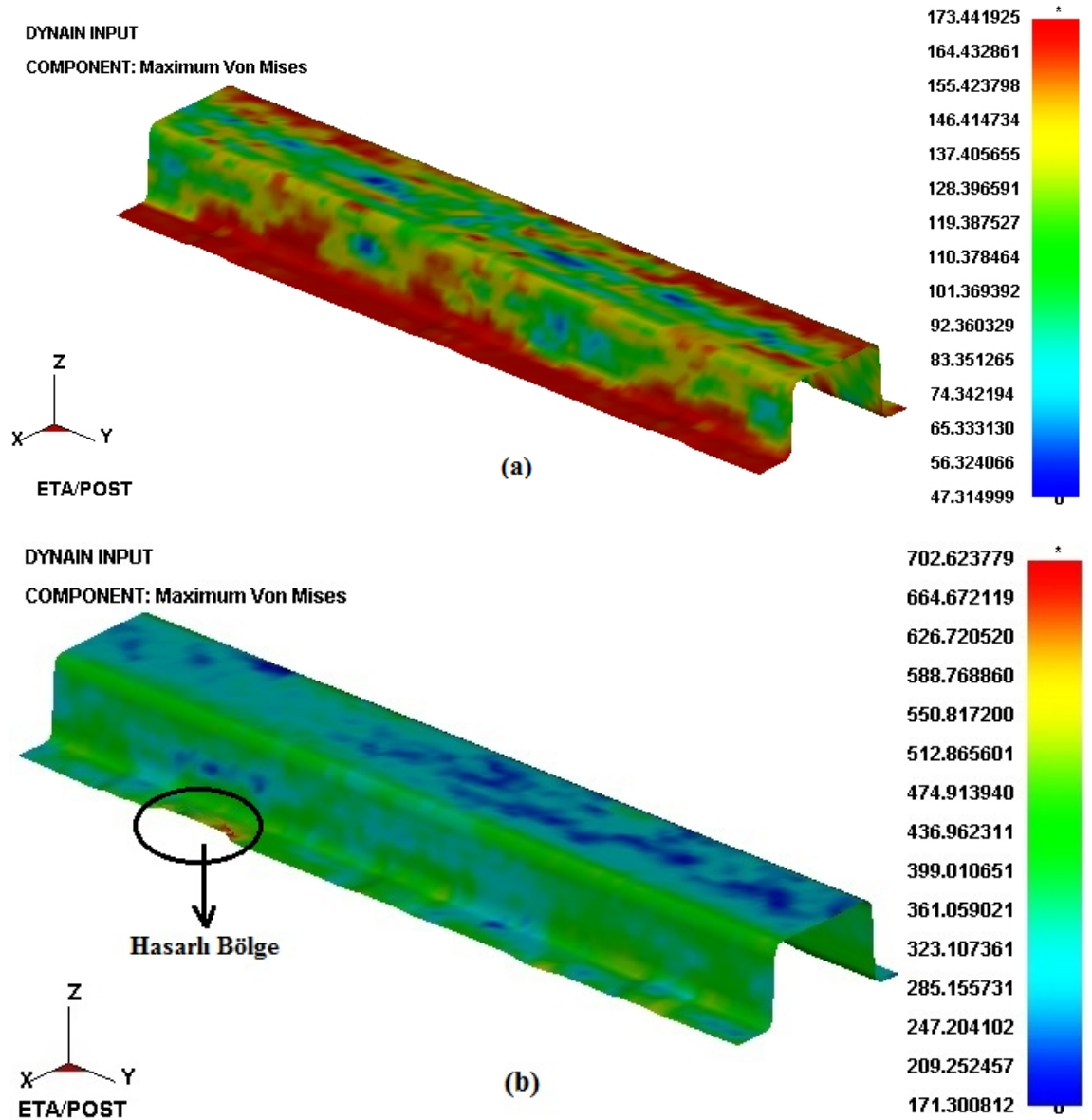
Şekil 4.23'de; 1,7 mm kalınlığındaki Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin şekillendirme sonundaki incelme değerleri verilmiştir. Şekillendirme esnasında, parçada oluşan kalınlık değişimi kaçınılmaz bir durumdur. Şekil 4.23 a'da verilen sıcak şekillendirme sonucundaki incelme değerlerine göre; kırmızı ile gösterilen parçanın kulak kısımlarındaki bölgeler, maksimum incelmenin gerçekleştiği yerlerdir. Aynı zamanda, Şekil 4.22 a' da verilen FLD diyagramına göre, bu kısımlar riskli bölge

olmadığından dolayı, yaklaşık olarak %9 incelmeyi şekillendirme işlemine olumsuz etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Diğer taraftan Şekil 4.23 b' de Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin soğuk olarak şekillendirilmesi sonucu elde edilen kalınlık değişimi verilmiştir. Soğuk şekillendirme sonucu maksimum inceme değeri yaklaşık olarak % 27 olup hasarlı bölgedir.



Şekil 4.23. Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin (a) Sıcak şekillendirme sonucu (b) Soğuk şekillendirme sonucu kalınlık azalması dağılımı

İncelenmesi gereken bir diğer önemli sonuç ise, şekillendirme sonucunda malzemede oluşan gerilmelerdir. Buna göre, Şekil 4.24 a' da sıcak şekillendirilen parçanın Von Mises gerilme değerleri verilmiştir. En büyük gerilme değeri yaklaşık olarak 173,4 MPa olup, inceme riskinin fazla olduğu bölgelerde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan Şekil 4.24 b' de soğuk şekillendirilme işlemi sonunda parçanın Von Mises gerilme değerleri görülmektedir. Maksimum gerilme değeri, yaklaşık olarak 702,6 MPa olup FLD diyagramında hasarlı bölge olarak belirlenen kısımda oluşmuştur ve sıcak şekillendirmeye göre bu değer yaklaşık olarak 4 katına çıkmıştır.



Şekil 4. 24. Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin (a) Sıcak şekillendirme sonucu (b) Soğuk şekillendirme sonucu gerilme dağılımı

Tüm şekillendirme sonuçları değerlendirildiğinde, sıcak şekillendirme işlemiyle daha risksiz bir şekillendirme işleminin gerçekleştiği görülmektedir. Çünkü sıcak şekillendirme esnasında, malzeme yüksek şekillendirilebilme kabiliyeti elde etmektedir. Bu nedenden ötürü, sıcak şekillendirme simülasyonunda yırtılma oluşmamıştır. Ayrıca, sıcak şekillendirme esnasında malzeme daha sünek (yumuşak) olduğundan dolayı şekillendirme esnasında uygulanan kuvvetler de daha düşüktür ve böylece gerilme değerleri soğuk şekillendirmeye nazaran düşer. Tüm bu olumlu sonuçlardan dolayı, sıcak şekillendirme işlemi soğuk şekillendirmeye göre daha tercih edilen bir yöntemdir.

#### **4.2.30MnB5 malzeme ile ilgili bulgular**

##### **4.2.1. Isıl İşlemler**

Çalışmanın bu kısmında, 2,5 mm kalınlığındaki 30MnB5 malzemenin optimum mekanik özelliklerini elde edilmesi amacıyla en uygun soğutma ortamı, ısıl işlem sıcaklığı ve ısıtma süreleri gibi parametreler tespit edilmeye çalışılmıştır. Mekanik özelliklerin elde edilmesi için, daha önce bahsedildiği gibi, çekme deneyleri UTEST marka 25 tonluk universal çekme cihazında, ortalama 5 adet numune için gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, Duroline-Metkon marka sertlik ölçme cihazıyla ve 0,98 N (HV 1) luk yük uygulanılarak ve aynı eksen üzerinden 5 adet ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan, mikro yapı analizlerinde Nikon MA100 marka mikroskop ile 1000 büyütme objektif kullanılmıştır.

30MnB5 malzemeyle ilgili literatür araştırması yapıldığında, malzemenin uygun östenitleme sıcaklığı veya Ac3 sıcaklığı ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenden ötürü uygun Ac3 sıcaklığını tespit etmek amacıyla Hougardy formülü kullanılmıştır ([http://www.gorni.eng.br/e/Gorni\\_SFHTHandbook.pdf](http://www.gorni.eng.br/e/Gorni_SFHTHandbook.pdf), 2012):

$$Ac_3 = 902 - 255C - 11Mn + 19Si - 5Cr + 13Mo - 20Ni + 55V$$

Bölüm 2' de gerçekleştirilen kimyasal analiz değerleri, Hougardy formülünde yerine yazıldığında elde edilen sıcaklık değeri,  $Ac_3 = 821^\circ C$  dir. Ayrıca, literatürde geçen uygun östenitleme sıcaklığı;  $Ac_{3+}(30^\circ-50^\circ C)$  olduğundan dolayı (<http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/>, 2012)  $850^\circ C$  ilk seçilen ısı işlem sıcaklığı olmuştur.

Bununla beraber, fırında uygun bekleme süresinin belirlenmesi amacıyla 5, 15 ve 30 dk. lık bekleme süreleri denenmiştir. Ayrıca, fırında bekletilen numuneler, uygun soğutma ortamını belirlemek amacıyla havada ve suda soğutulmuşlardır, böylelikle optimum mekanik özelliklerin elde edildiği parametreler belirlenmiştir. Çizelge 4. 4' de, 30MnB5 malzemeye uygulanan tüm ısı işlemler görülmektedir.

**Çizelge 4. 4.30MnB5 malzeme için gerçekleştirilen ısı işlemler**

Numune Kodu	Isıl işlem sıcaklığı	Fırında Tutma süresi	Soğuma ortamı
H850-5dk	$850^\circ C$	5 dk.	hava
H850-15 dk	$850^\circ C$	15 dk.	hava
H850-30 dk	$850^\circ C$	30 dk.	hava
S850-5 dk	$850^\circ C$	5 dk.	su
S850-15 dk	$850^\circ C$	15 dk.	su
S850-30 dk	$850^\circ C$	30 dk.	su
S800-15 dk	$800^\circ C$	15 dk.	su
S825-15 dk	$825^\circ C$	15 dk.	su
S840-15 dk	$840^\circ C$	15 dk.	su
S860-15 dk	$860^\circ C$	15 dk.	su
S875-15 dk	$850^\circ C$	15 dk.	su
S900-15 dk	$900^\circ C$	15 dk.	su

#### 4.2.1.1. Havada soğutma işlemi

Şekil 4.25 a, b, c' de, 2,5 mm kalınlığındaki 30MnB5 malzemenin,  $850^\circ C$  de 5-15 ve 30 dk. fırında bekletilip daha sonra bu sıcaklıktan itibaren havada soğutulması sonucu elde edilen mikro yapı fotoğrafları görülmektedir. Malzemenin fırından çıkarıldıktan sonraki sıcaklığı, daha önceki bölümlerde bahsedilen lazer işaretlemeli infrared termometre ile

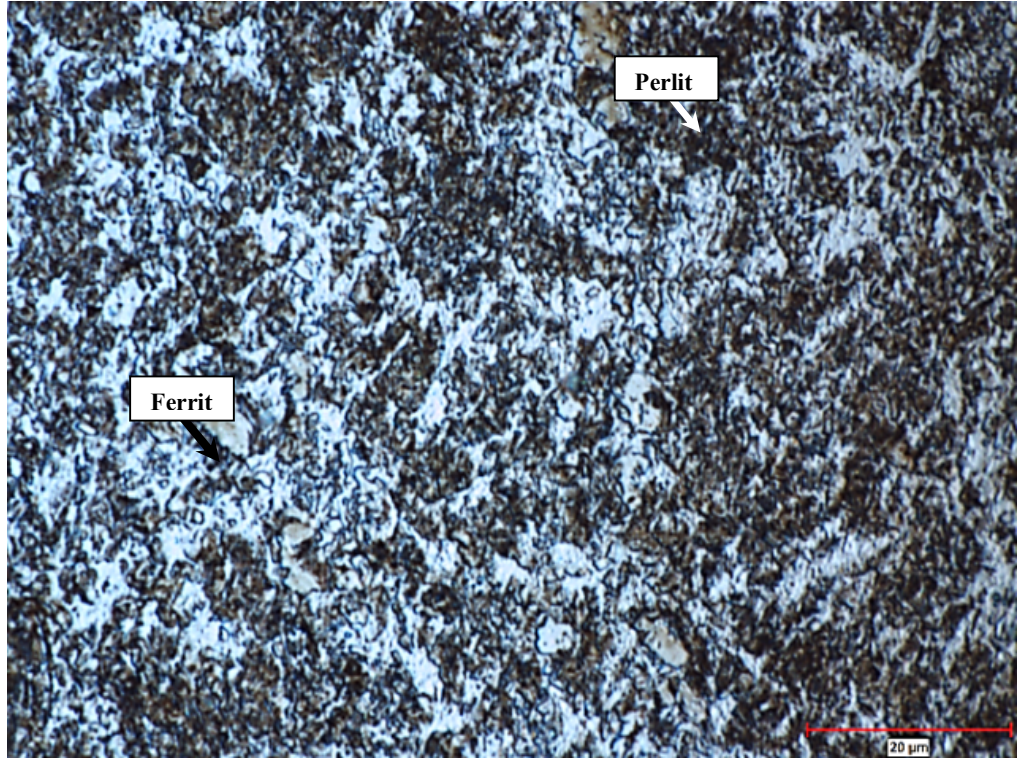


10 sn.de bir ölçülerek soğuma eğrileri elde edilmiştir ve 30MnB5 malzemenin üreticisinden temin edilen soğuma diyagramlarına, havada soğuma esnasında ölçülen 10 s.de bir lik sıcaklıklara göre soğuma eğrileri çizilmiştir (Şekil 4.26).

Havada soğuma işlemi koşulunda, elde edilen mikro yapı ferritik (beyaz) ve sementit lamellerini saran perlitik (siyah) bir içyapı içermektedir. Bu durumu, Şekil 4.26 a, b, c' de görülen soğuma eğrilerindeki yapılar da desteklemektedir. Fırında tutma süresi, sertlik ve çekme gerilmesi değerlerini önemli ölçüde etkilemiştir.

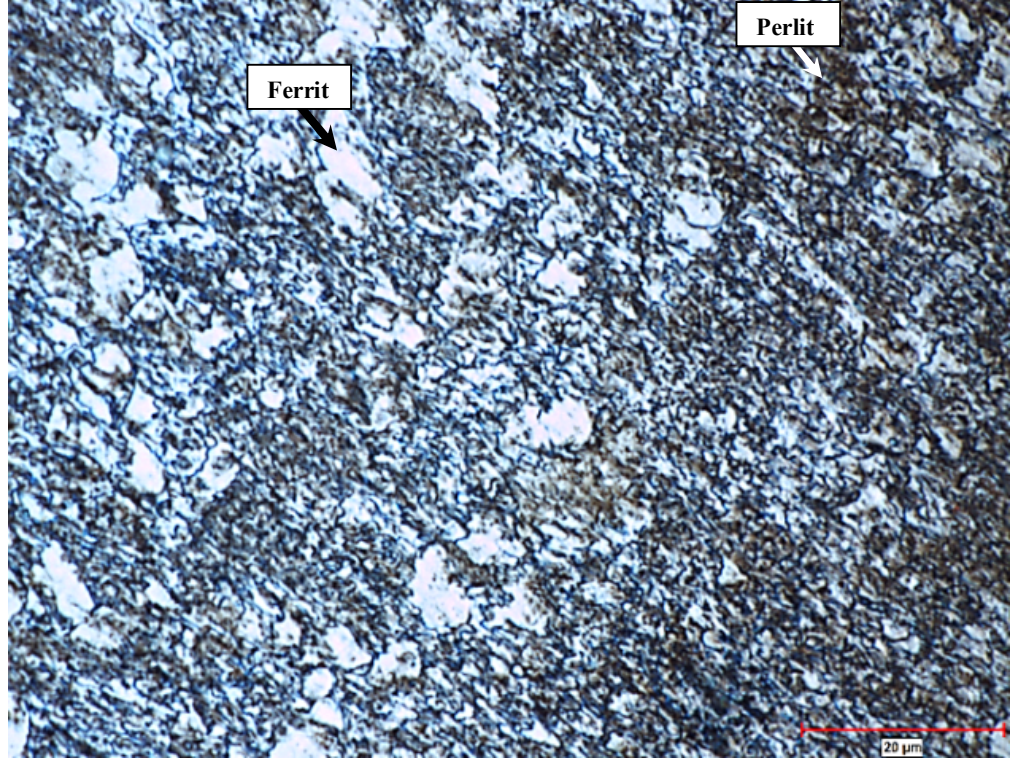
Sürenin 5. dk dan 15 dk. ya artması sonucu çekme dayanımı ve sertlikteki değişim, 15 dk.dan 30 dk. ya artmasına göre daha fazla olmuştur.

Fırında tutma süresinin 5 dk.dan 15 dk.ya artmasıyla, yapı daha mukavim hale gelmiş, çekme dayanımı ve sertlik artmıştır (Şekil 4.27 ve Şekil 4.28). Diğer taraftan, sürenin 30 dk. ya çıkartılmasıyla, çekme dayanımında büyük bir değişim gözlemlenmezken, sertlikte ise artış oluşmuştur. Bu durum, Şekil 4.26 c' den hareketle, perlit miktarının diğer tutma sürelerine nazaran daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

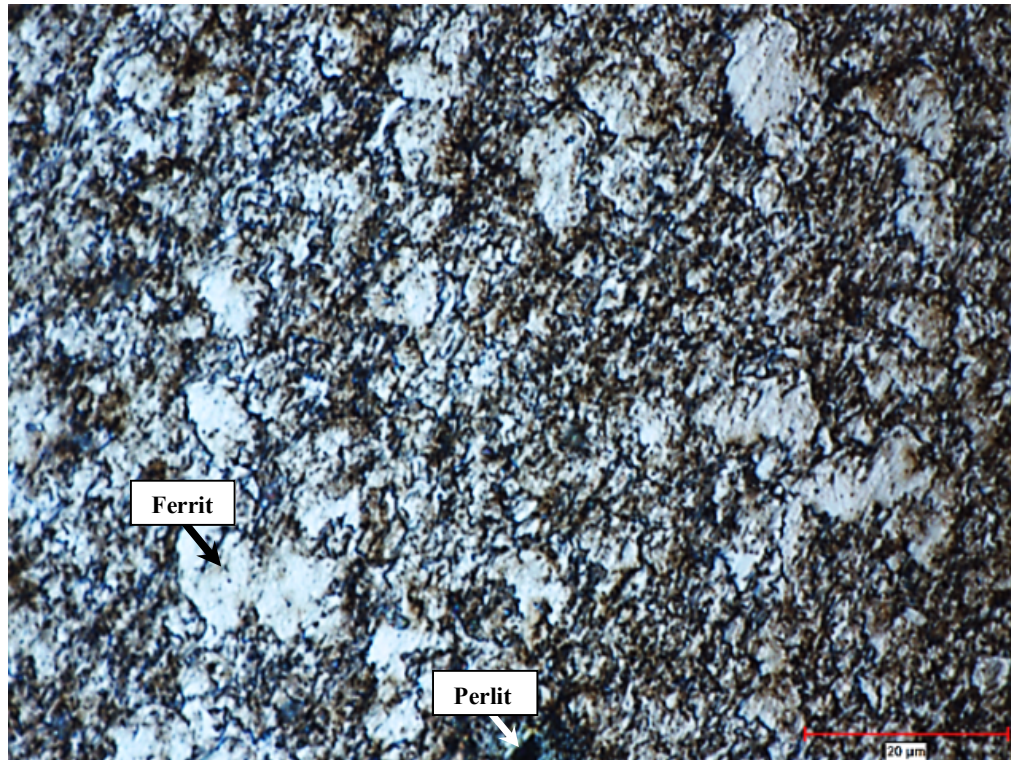


(a)H850-5dk



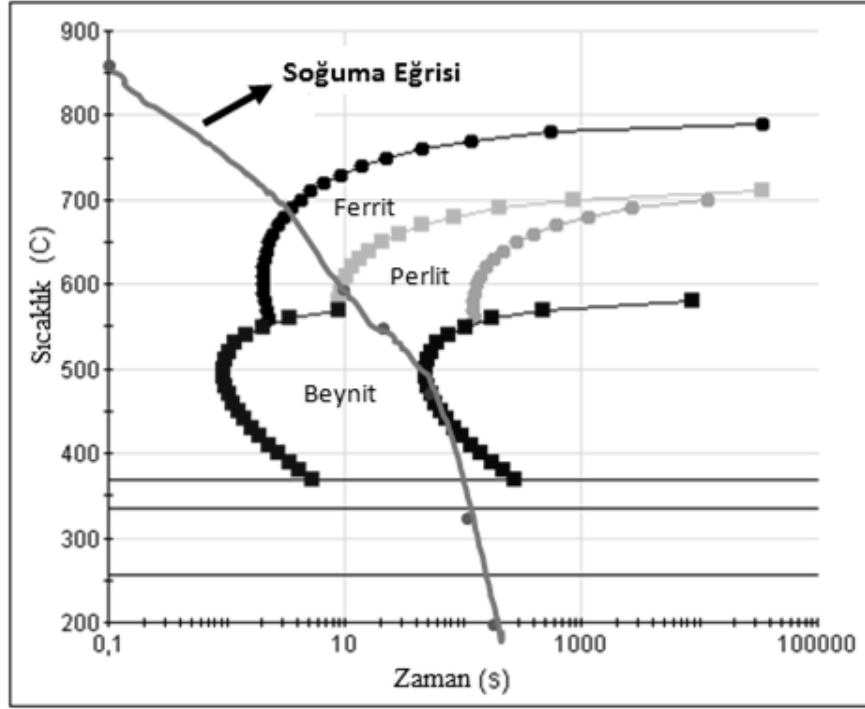


(b) H850-15dk



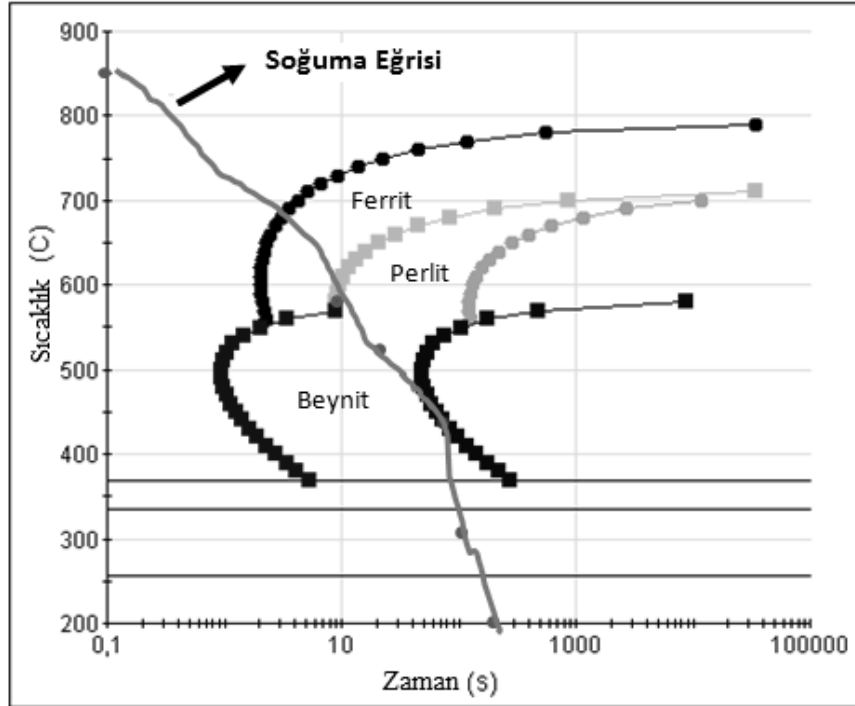
(c) H850-30dk

Şekil 4.25.850°C de a)5 dk b)15 dk.c) 30 dk. tutma sürelerinde havada soğutma sonucunda elde edilen iç yapı resimleri



Östenitleme: 850.0 C

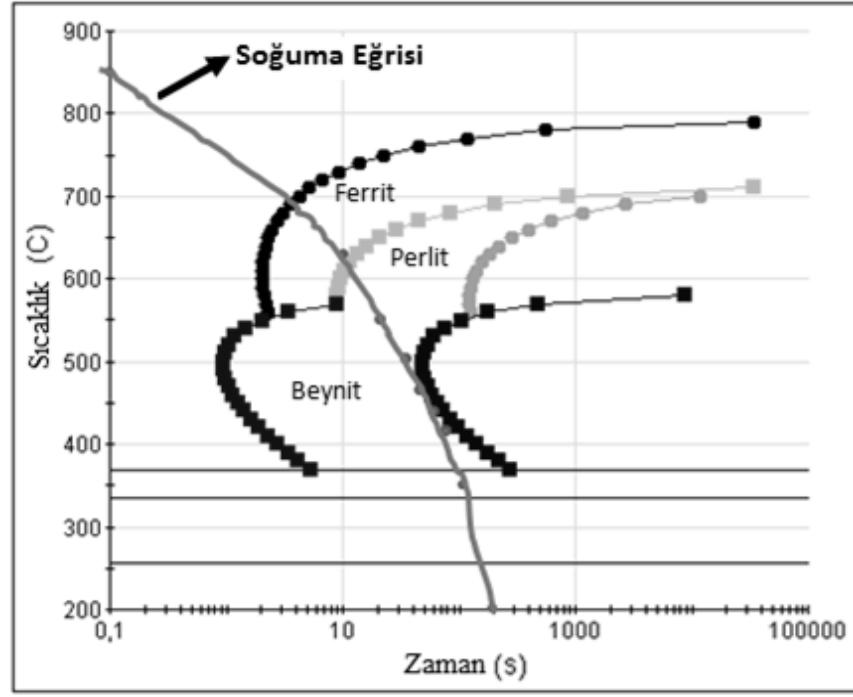
(a)



Östenitleme: 850.0 C

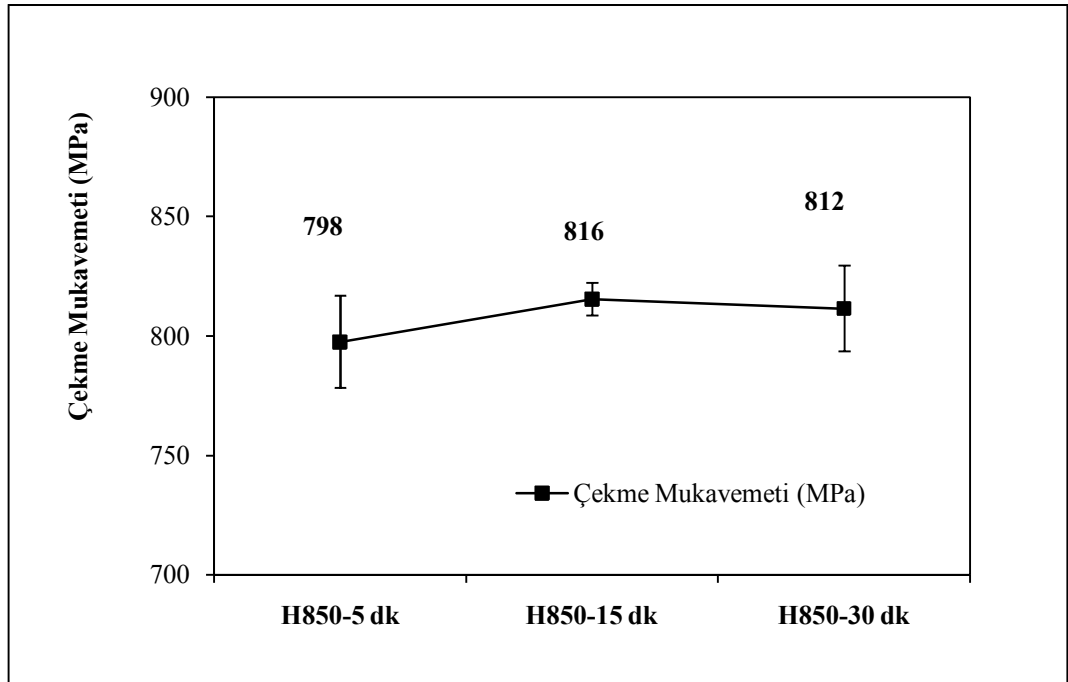
(b)



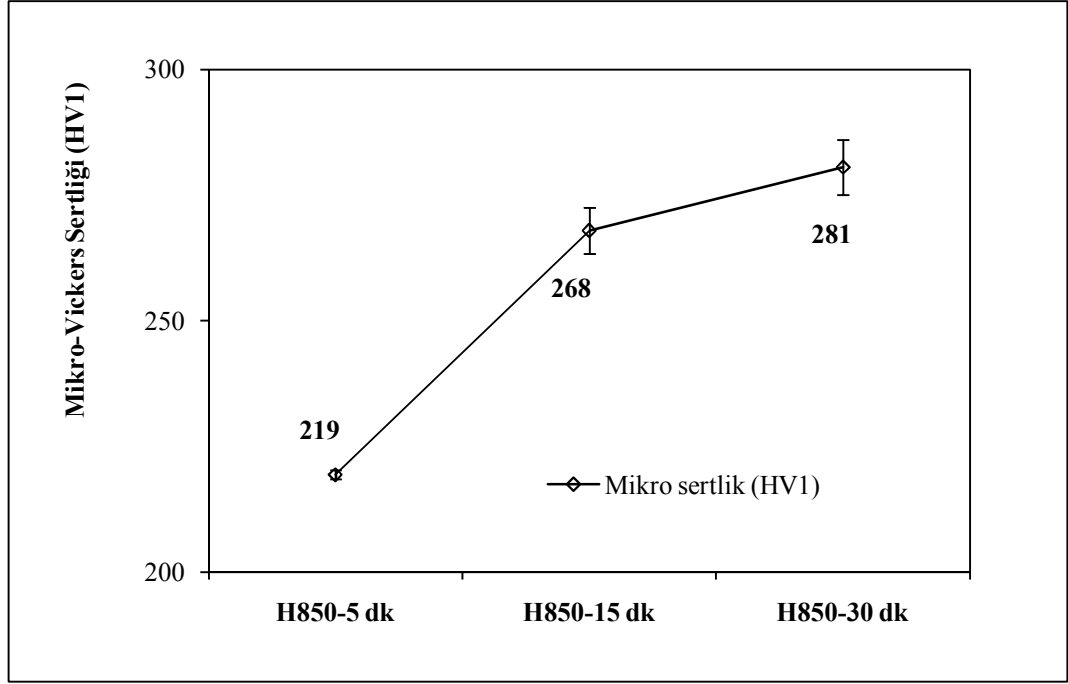


(c)

Şekil 4.26.850 °C de a)5 dk b)15 dk.c) 30 dk. tutma sürelerinde havada soğutma sonucunda oluşturulan ZSD diyagramları



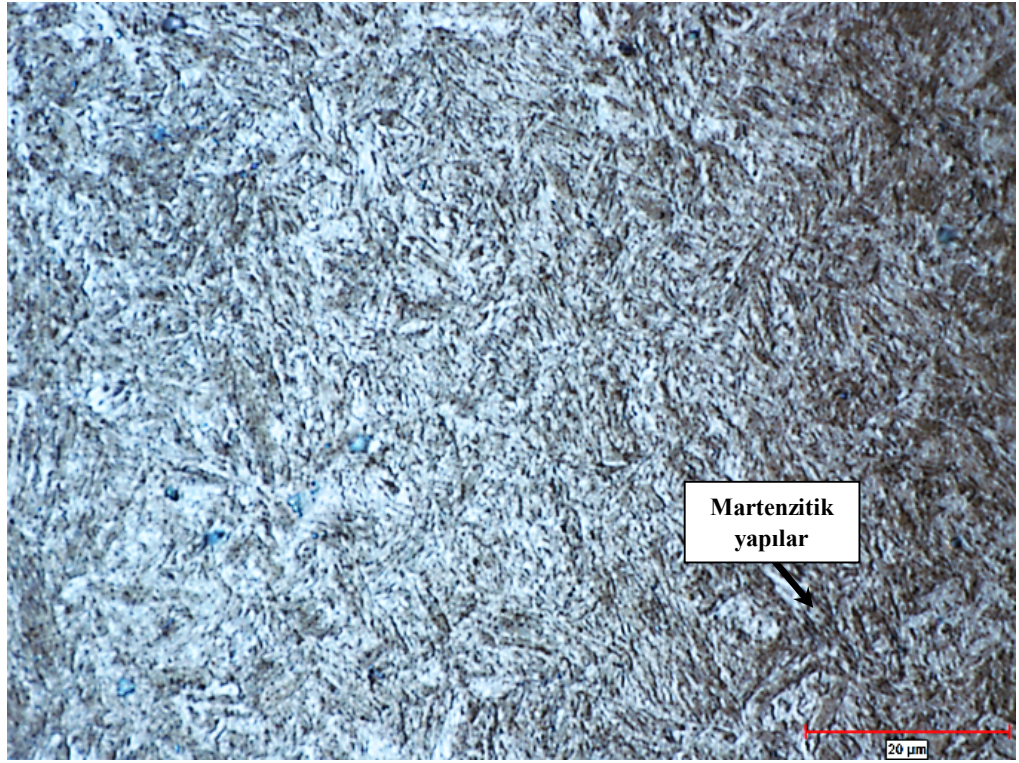
Şekil 4.27. 850°C de 5 -15 ve 30 dk. tutma sürelerinde havada soğutma sonucunda elde edilen çekme mukavemeti değerleri



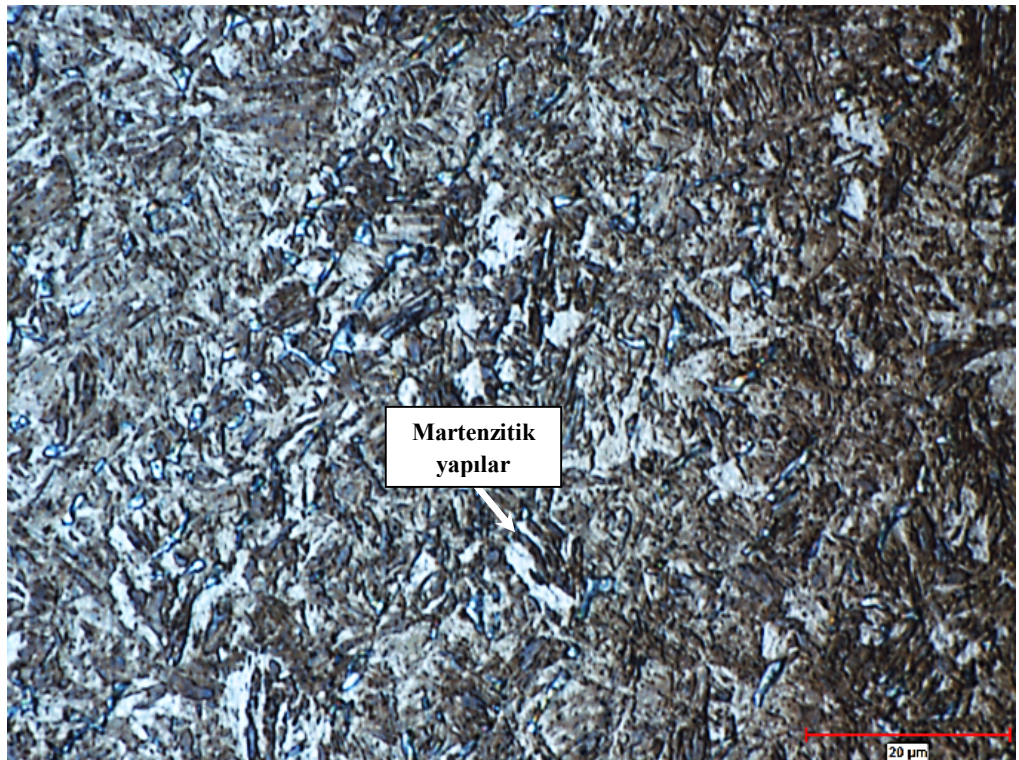
**Şekil 4.28.** 850°C de 5 -15 ve 30 dk. tutma sürelerinde havada soğutma sonucunda elde edilen sertlik değerleri

#### 4.2.1.2.Suda soğutma işlemi

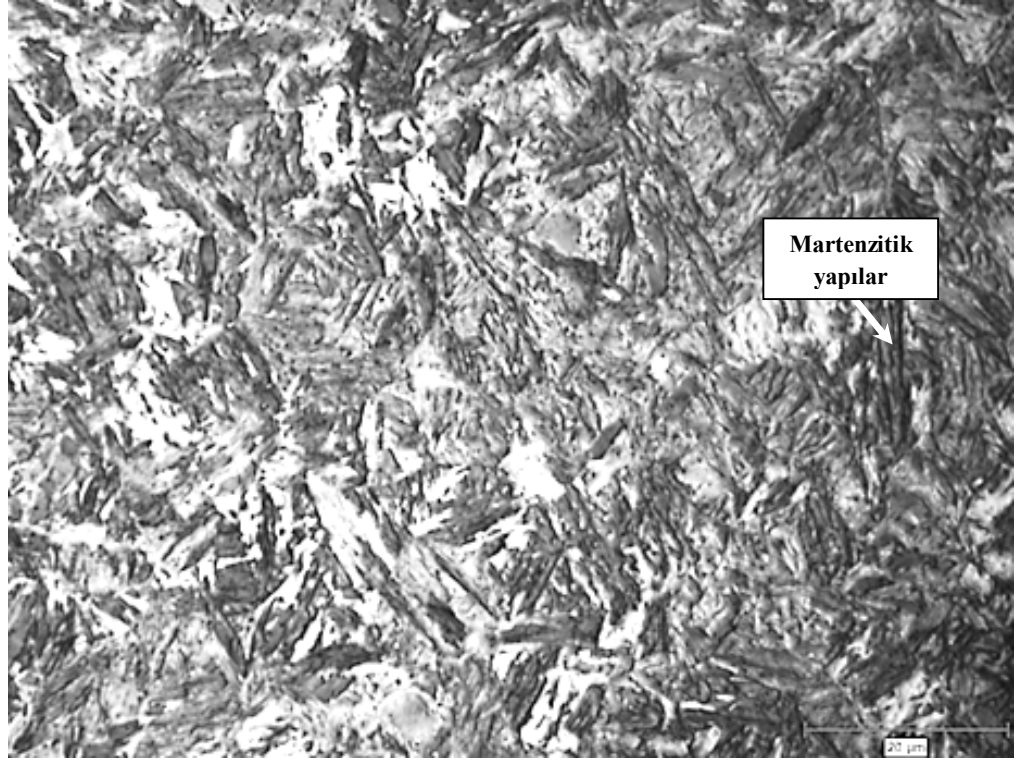
2,5 mm kalınlığındaki 30MnB5 malzemenin uygun soğutma ortamının belirlenmesi amacıyla, 850°C de 5-15 ve 30 dk. bekletilip suda soğutulmuşlardır. Lazer işaretlemeli infrared termometre ile ölçülen soğuma hızı, yaklaşık olarak 80°C/s dir. Bu işlem sonucu elde edilen mikro yapı resimleri Şekil 4.29 a, b, c' de görülmektedir. Buna göre, yapıların büyük kısmını martenzit ve eser miktarda ise beynit içermektedir. Fırında 5 dk. bekleme sonucu oluşan yapı ağırlıklı olarak kısa ve iğnemsiz martenzittir. (Şekil 4.29 a) Kısa süreli fırında bekletme işleminde, sertlik ve çekme mukavemeti değerleri uzun süreli bekletmeye göre daha düşüktür. Bu durum, 5 dk. ısıtma işlemiyle östenit yapının homojen bir hal almadığını ve bekleme süresinin yetersiz olduğunu göstermektedir. Bununla beraber, bekletme süresinin artmasıyla tabakalı yapı daha büyük ve belirgin bir hal almıştır (Şekil 4.29 c). 30 dk. bekletme işleminde, martenzit büyümesi sonucu sertlikteki ve çekme gerilmesindeki düşüş bunu desteklemektedir (Şekil 4.30). 30 dk. bekletme süresi ile elde edilen çekme mukavemeti ve sertlik değerleri, 15 dk.ya göre de daha düşük kalmıştır.



(a) S850-5dk

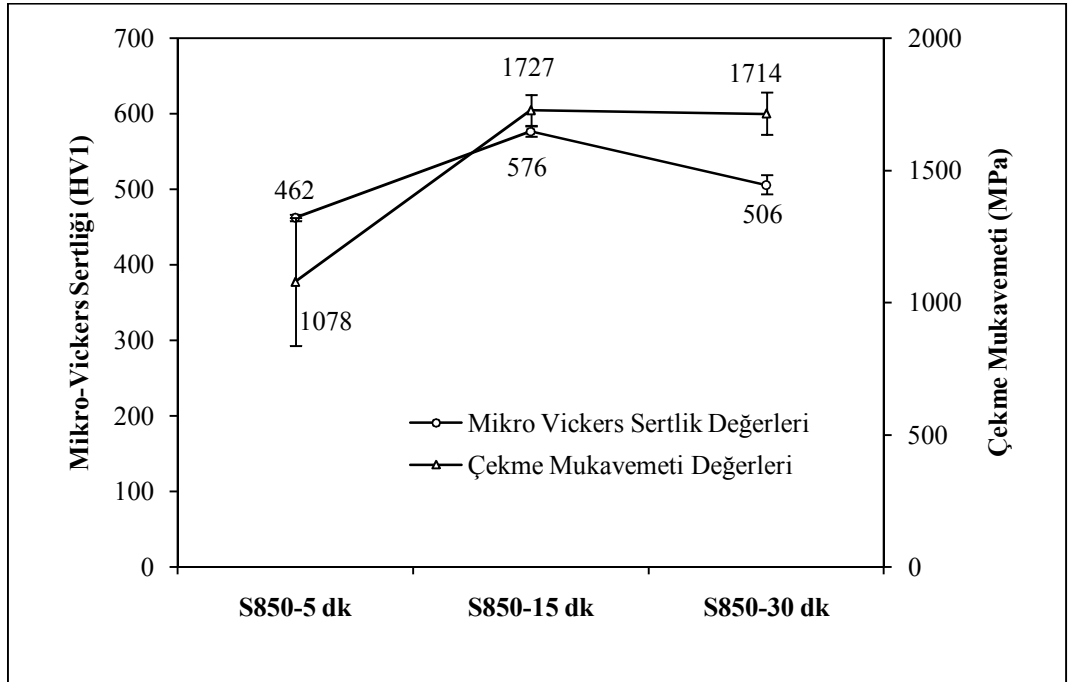


(b) S850-15dk



(c)S850-30dk

Şekil 4.29. 850°C de a)5 dk b)15 dk.c) 30 dk. tutma sürelerinde suda soğutma sonucunda elde edilen iç yapı resimleri



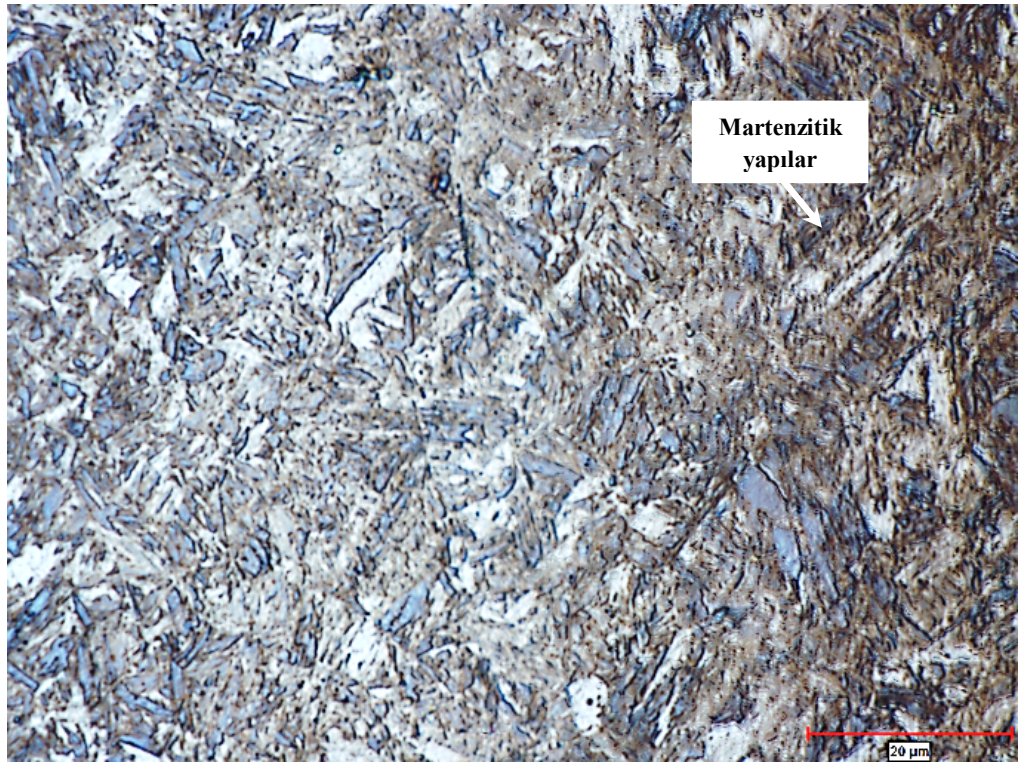
Şekil 4.30. 850 °C de 5 -15 ve 30 dk. tutma sürelerinde suda soğutma sonucunda elde edilen sertlik ve çekme mukavemeti değerleri



Yapılan ısıtma işlemleri ve mekanik deneyleri sonucunda, 850°C de 15 dk. fırında bekletme ve suda soğutma işlemiyle, optimum mekanik özellikler elde edilmiştir. Bu nedenden ötürü, suda soğutma işlemi ve 15 dk. bekletme parametreleri, en iyi mekanik özellikleri sağladığı için son belirlenecek parametre olan optimum ısıtma sıcaklığının belirlenmesi işleminde kullanılacaktır.

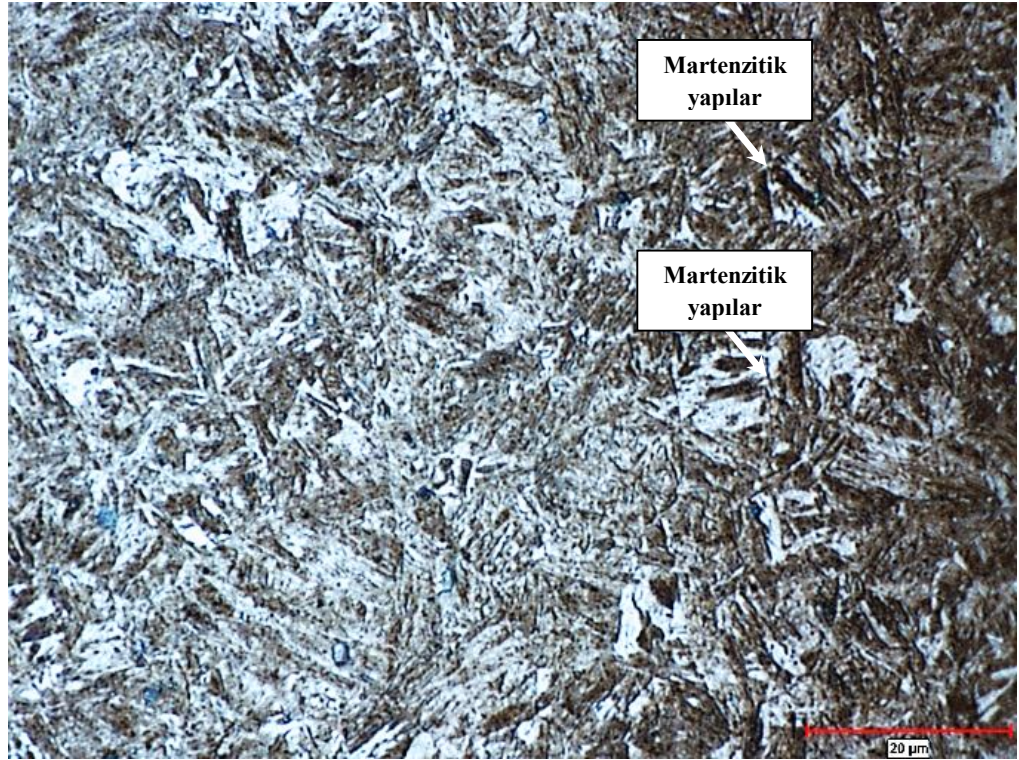
Bundan sonraki aşama, 800-850 °C sıcaklık aralığında farklı ısıtma sıcaklık değerleri deneyerek, optimum ısıtma sıcaklığının araştırılması olmuştur. Bu amaçla, 800° C, 825°C, 840°C ve 850°C da 15 dk. fırında bekletme işleminden sonra suda soğutma gerçekleştirilmiştir.

800°, 825°C, 840°C ve 850°C sıcaklıklarda 15 dk. bekletilerek suda soğutma sonucu elde edilen mikro yapılar Şekil 4.31 a, b, c, d' de görülmektedir. Bu fotoğraflardan yola çıkarak; yapıların martenzit ve eser miktarda beynitten oluştuğu söylenebilir.

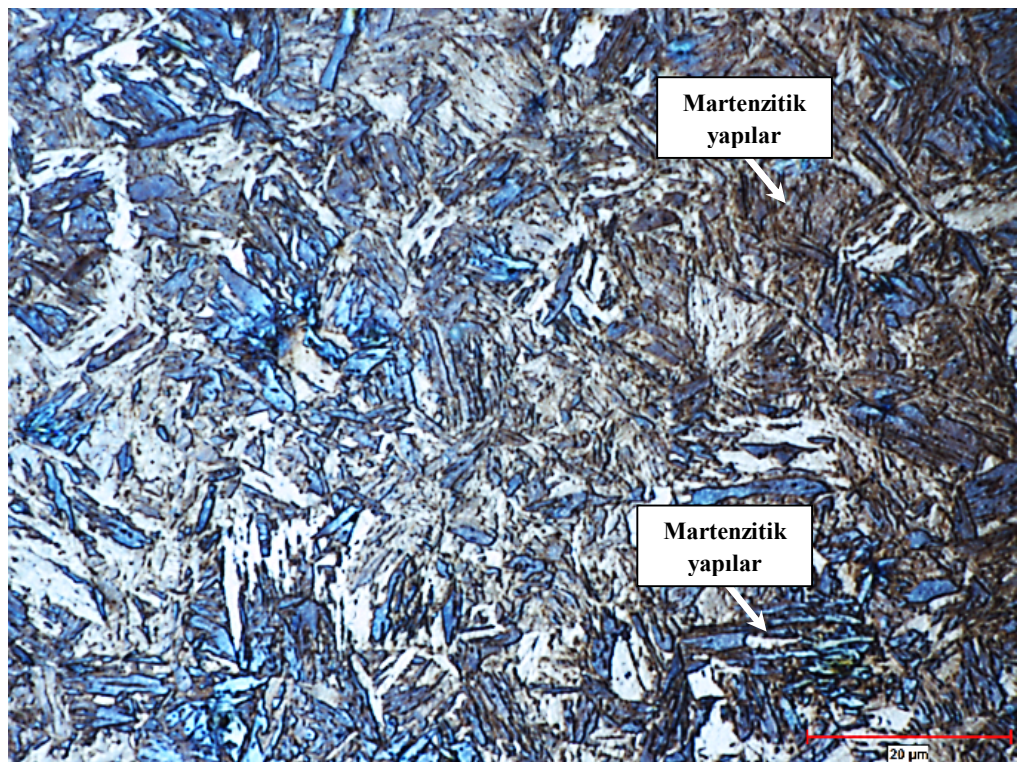


(a)S800-15 dk



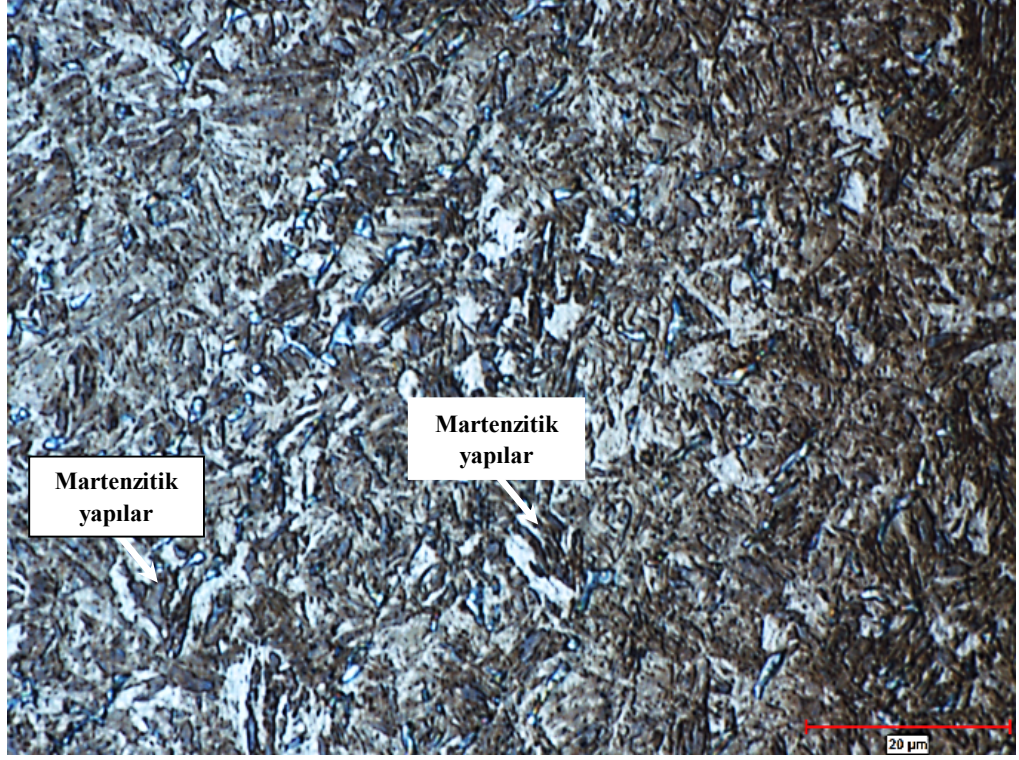


(b) S825-15 dk



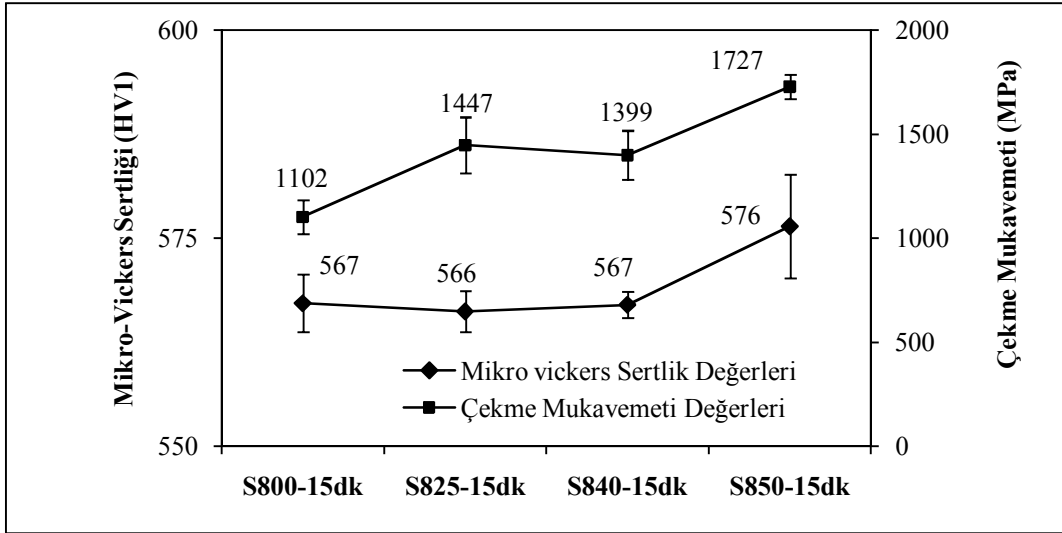
(c) S840-15 dk





(d) S850-15 dk

Şekil 4.31. (a) 800°C, (b) 825°C (c) 840°C (d) 850°C de 15 dk. bekletme ve suda soğutma sonucunda elde edilen iç yapı resimleri



Şekil 4.32.800°C, 825°C, 840°C, 850°C de 15 dk. bekletme ve suda soğutma sonucunda elde edilen sertlik ve çekme mukavemeti değerleri

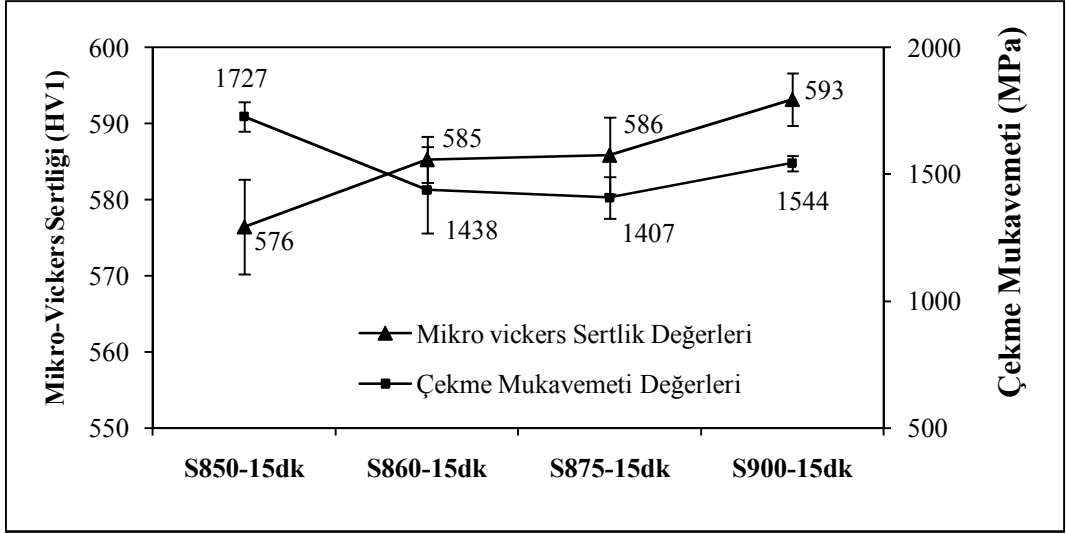
Şekil 4.32' de ise, 800°C, 825°C, 840°C, 850°C de 15 dk. bekletme ve suda soğutma işlemi sonucunda elde edilen sertlik ve çekme mukavemeti değerleri verilmiştir. Buna göre, ısı işlem sıcaklığı arttıkça çekme gerilmesi ve sertlik değerleri artan bir davranış sergilemişlerdir. Ayrıca, ısı işlem sıcaklığı arttıkça martenzit miktarı da artmıştır. Ancak, 800-850°C sıcaklık aralığında maksimum çekme gerilmesi ve sertlik değerinin görüldüğü sıcaklık 850 °C olmuştur.

Bundan sonraki diğer aşama, 850-900 °C sıcaklık aralığında farklı ısı işlem sıcaklık değerleri denenerek, yine optimum ısı işlem sıcaklığının araştırılması olmuştur. Bu amaçla, 850°, 860°C, 875°C ve 900°C de 15 dk. fırında bekletme işleminden sonra suda soğutma gerçekleştirilmiştir.

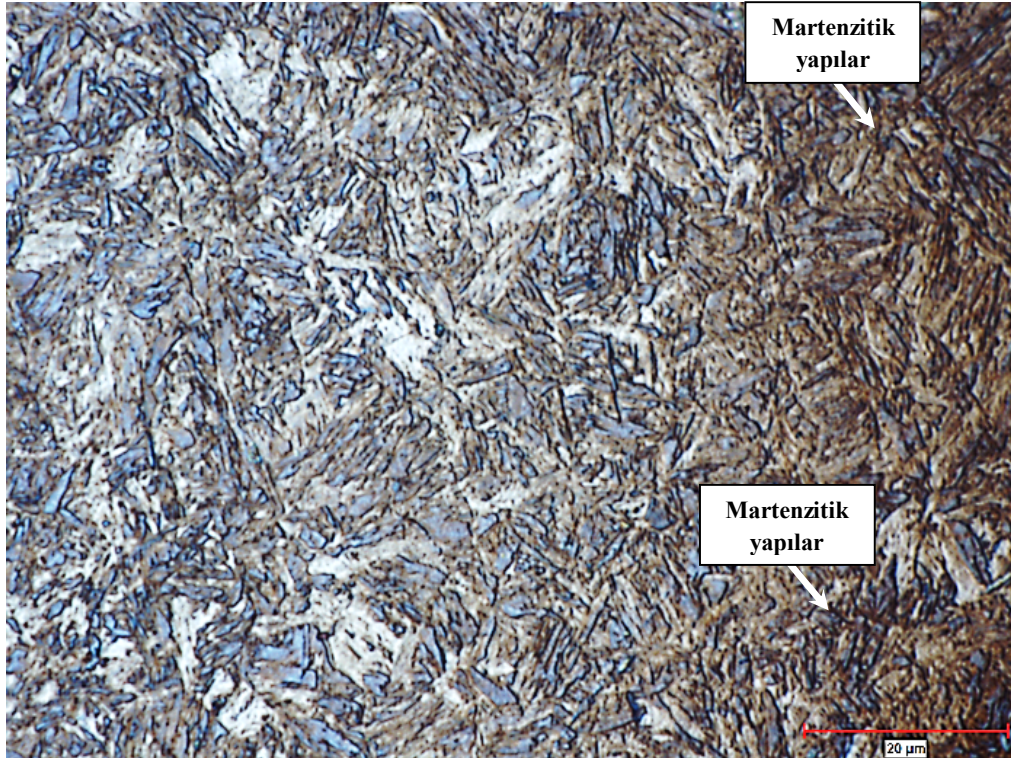
Şekil 4.33' de 850°, 860°C, 875°C ve 900°C de 15 dk. bekletme ve suda soğutma işlemi sonucunda elde edilen sertlik ve çekme mukavemeti değerleri verilmiştir. Buna göre, ısı işlem sıcaklığı arttıkça sertlik artma ve çekme mukavemeti azalma eğilimdedir. Isı işlem sıcaklığı arttıkça, yapı tamamen martenzit bir hal almıştır (Şekil 4.34). Çünkü bu dönüşüme bağlı olarak sertlik değeri artarken, çekme mukavemeti gevrek yapıdan dolayı azalmıştır. 850-900°C sıcaklık aralığında maksimum çekme gerilmesi değerinin görüldüğü sıcaklık yine 850 °C olmuştur.

800-900 °C aralığında gerçekleştirilen tüm ısı işlemler neticesinde, optimum ısı işlem sıcaklığı; 850 °C, optimum fırında bekletme süresi 15 dk. ve optimum soğuma ortamı olarak da su olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenden ötürü, gerçekleştirilen daha sonraki yorulma- serbest ağırlıklı düşme- kırılma tokluğu deneylerinde optimum özelliklerin sergilendiği parametrelerde ısı işlem yapılarak, ısı işlem görmüş ve görmemiş malzemelerin karşılaştırılması yapılacaktır.



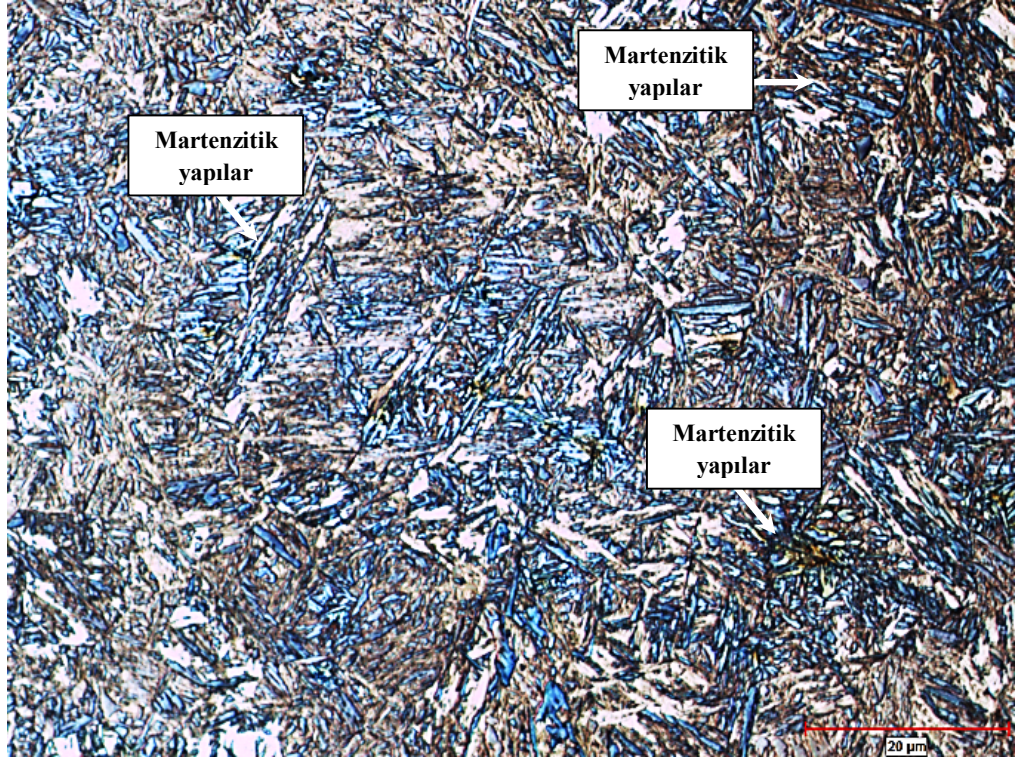


Şekil 4.33. 850°, 860°C, 875°C ve 900°C de 15 dk. bekletme ve suda soğutma sonucunda elde edilen sertlik ve çekme mukavemeti değerleri

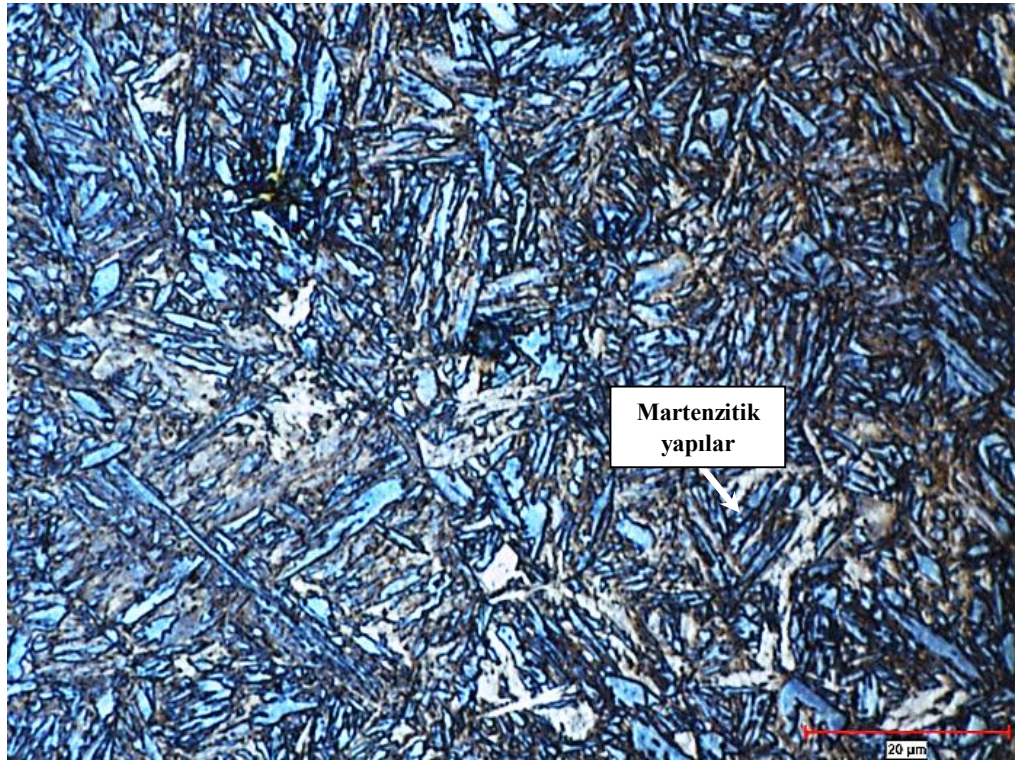


(a)S860-15 dk





(b) S875-15 dk



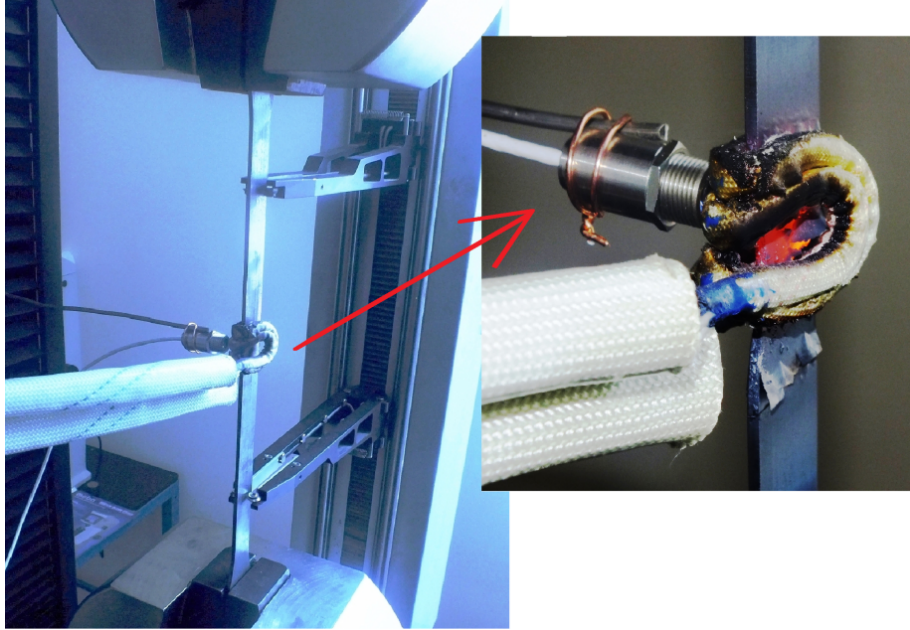
(c) S900-15 dk

Şekil 4.34.(a) 860°C, (b) 875°C (c) 900°C de 15 dk. bekleme ve suda soğutma sonucunda elde edilen iç yapı resimleri



#### 4.2.2. Sıcak Çekme Deneyleri

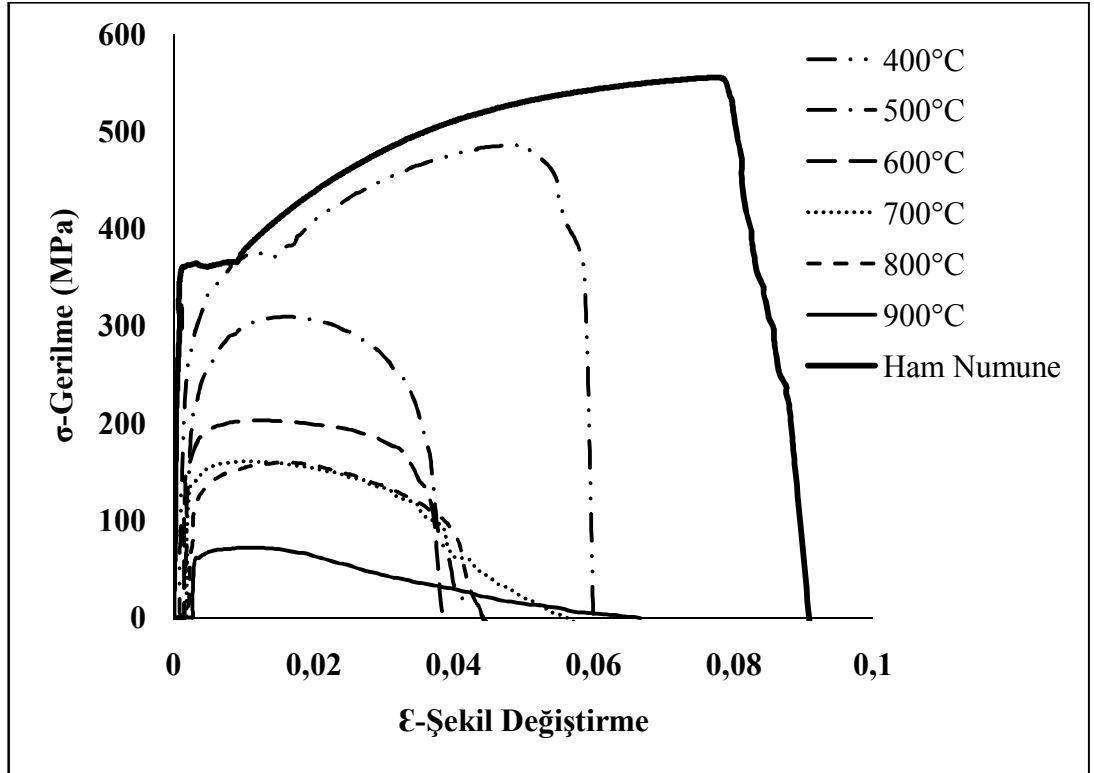
Sıcak çekme deneyleri, daha önce bahsedilen U test marka 25 tonluk çekme cihazıyla beraber çalışabilen indüksiyon ısıtma sistemi vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. 60 s. içerisinde istenen sıcaklığa ulaşan numunenin sıcaklığı bir sensör vasıtasıyla ölçülmüş ve  $\dot{\epsilon}=0,083 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızıyla çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.35’ de, 30MnB5 malzemenin gerçekleştirilen sıcak çekme deneylerine bir örnek verilmiştir.



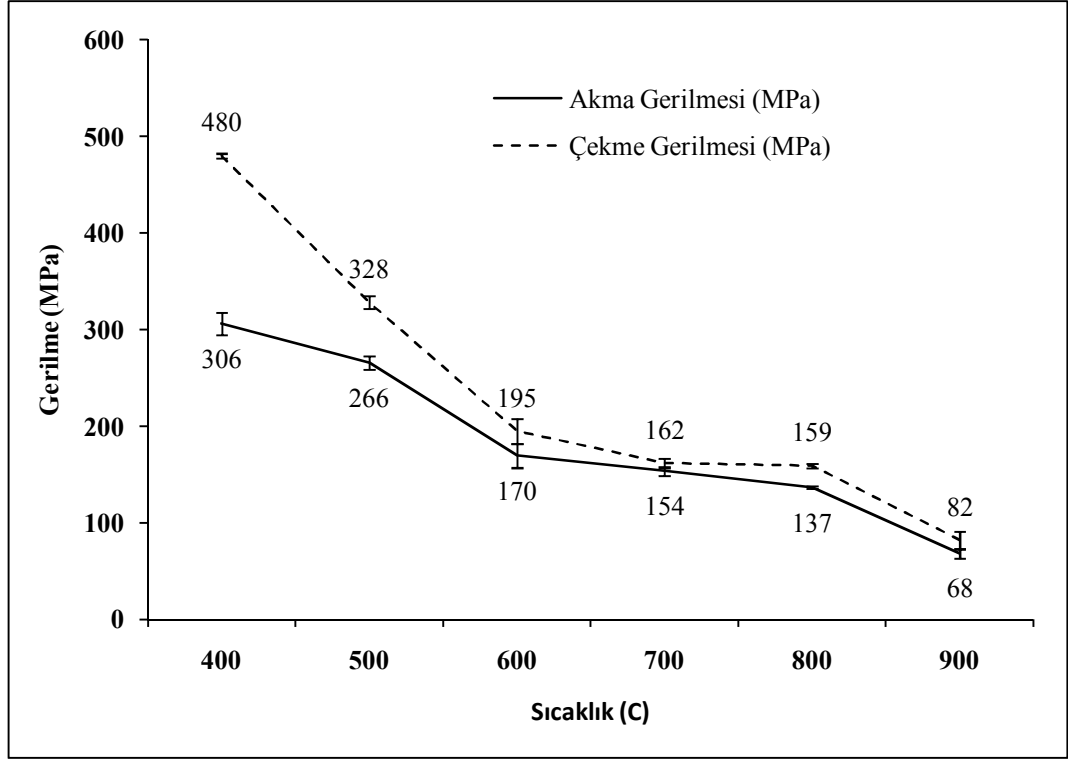
**Şekil 4.35.**30MnB5 malzemenin gerçekleştirilen sıcak çekme deneylerine bir örnek

Gerçekleştirilen çekme deneyleri sonucunda, malzemenin 400-500-600-700-800 ve 900 °C sıcaklıklarda  $\sigma$ - $\epsilon$  grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 4.36’ da, tüm sıcaklıklardaki  $\sigma$ - $\epsilon$  grafiklerine örnek verilmiştir. Ayrıca deneyde, akma ve çekme gerilmeleri değerleri de elde edilmiştir. Her bir sıcaklık için, 4 adet numunenin çekme testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.37’ de tüm sıcaklıklardaki ortalama akma ve çekme dayanımı değerleri görülmektedir. Bu şekle göre, sıcaklık arttıkça, 2,5 mm kalınlığındaki 30MnB5 malzemenin çekme ve akma dayanımları azalmıştır. 30MnB5 malzemenin oda sıcaklığındaki akma ve çekme dayanımı sırasıyla; 363 MPa ve 550 MPa iken,

maksimum sıcaklık olan 900°C ye ulaşıldığında ise bu değerler sırasıyla 68 ve 82 MPa' a düşmüştür. Bu durum, 30MnB5 malzemenin şekillendirilme davranışı üzerinde, sıcaklık parametresinin etkisinin büyük miktarda olduğunu göstermektedir. Sıcaklık arttıkça çekme dayanımı azaldığından dolayı, sıcak şekillendirme işlemi daha kolay olmaktadır.



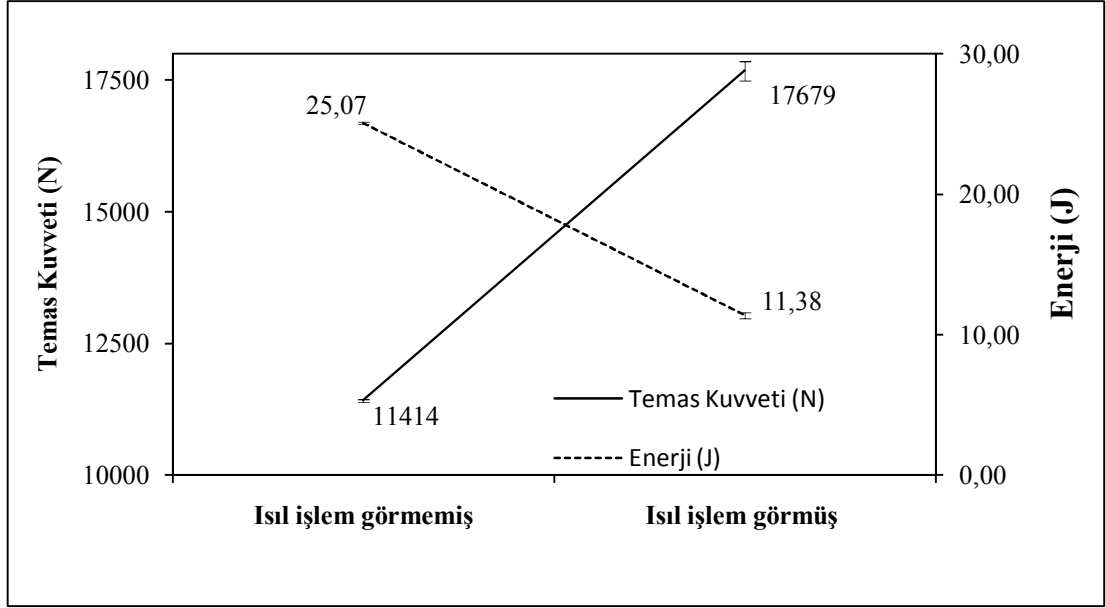
Şekil 4.36.30MnB5 malzemenin yüksek sıcaklıklardaki  $\sigma$ - $\epsilon$  grafikleri



Şekil 4.37. Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin ortalama akma ve çekme gerilmeleri değerleri

#### 4.2.3. Serbest Ağırlık Düşürme Deneyleri

Çalışmanın bu kısmında, 30MnB5 malzemenin optimum mekanik özelliklerinin elde edildiği, 850 °C de 15 dk. bekletme ve daha sonra suda soğutma işlemi uygulanmış numunelere, serbest ağırlık düşürme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ısı işlem görmemiş numunelere de serbest ağırlık düşürme deneyleri gerçekleştirilerek, ısı işlemi malzemenin darbe direnci üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmanın bu kısmında amaç, malzemenin darbe etkileri karşısındaki davranışları belirlenmektir.

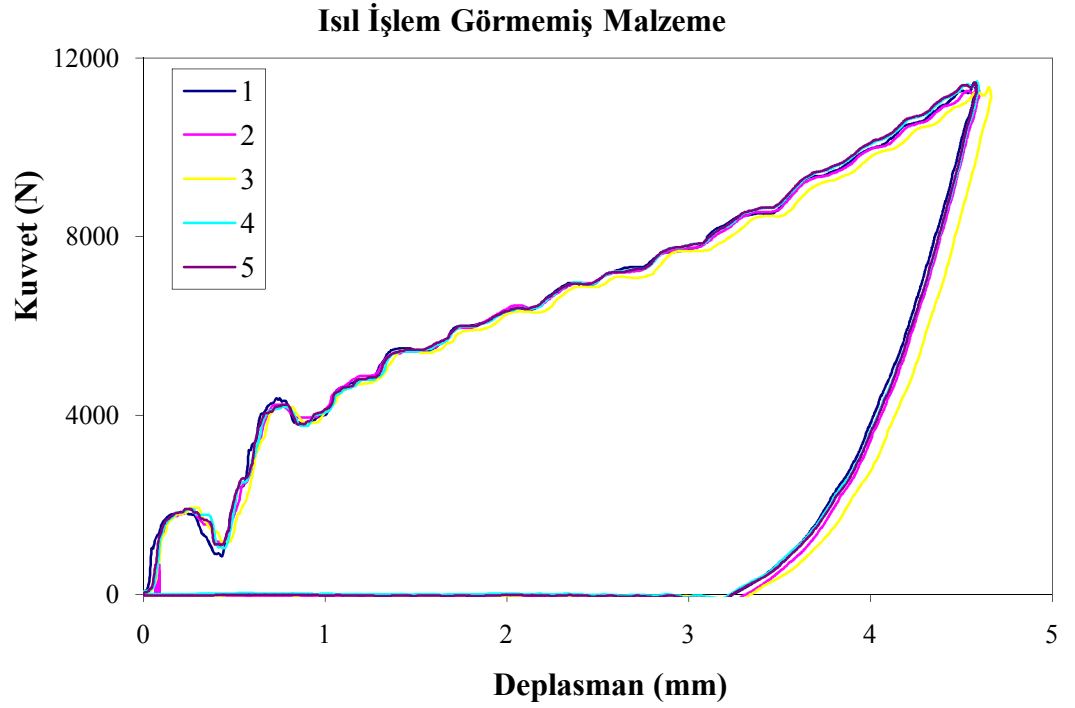


**Şekil 4.38.** 30MnB5 malzemenin ısıl işlem görmüş ve görmemiş durumları için temas kuvveti ve enerji değerleri karşılaştırması

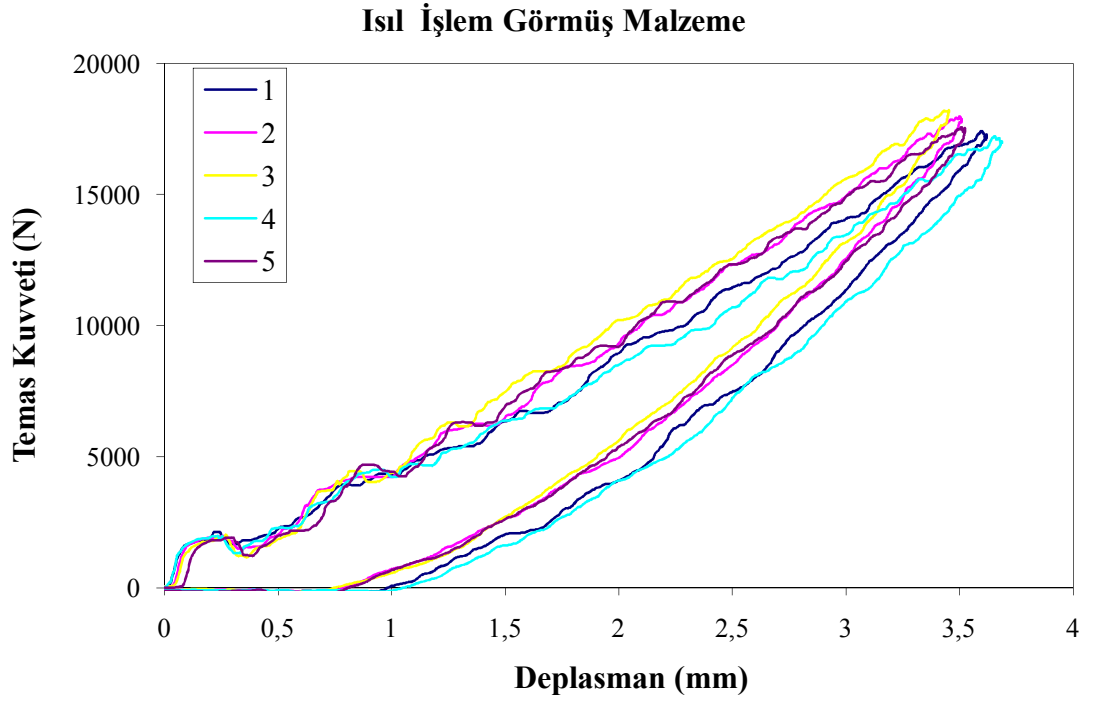
Gerçekleştirilen serbest ağırlık düşürme deneylerinde, ısıl işlem görmüş ve görmemiş durum için 5'er adet numuneye enerji değeri olarak 30 J uygulanmıştır. Malzemelerde oluşan temas kuvveti, malzemelerin absorbe ettiği enerji miktarı ve vurucu kütlenin hızı ölçülmüştür. Şekil 4.38' de, bu verilerin ortalama değerleri verilmiştir. Isıl işlem görmemiş durumda oluşan ortalama temas kuvveti 11414 N iken ısıl işlem sonucunda bu kuvvet değeri 17679 N a çıkmıştır. Ayrıca, ısıl işlem görmemiş durumda absorbe edilen enerji 25,07 J iken, ısıl işlem sonucunda bu değer 11,38 J' e düşmüştür ve ısıl işlem sonucu absorbe edilen enerjideki azalma miktarı yaklaşık olarak %55 civarındadır.

Tüm bu verilerden hareketle, 2,5 mm kalınlığındaki 30MnB5 malzemeye uygulanan ısıl işlem; temas kuvvetini artırırken, enerji absorbe etme yeteneğini ise düşürmüştür. Bu durum, suda soğutma işlemi sonucunda elde edilen gevrek martenzitik ve eser miktardaki beynitik yapıdan kaynaklanmaktadır. Isıl işlem öncesi sünek olan ferritik-perlitik yapı; ısıl işlem vasıtasıyla martenzit ağırlıklı yapıya dönüşmüştür ve bilindiği üzere, sünek yapıların absorbe ettiği enerji daha fazladır.

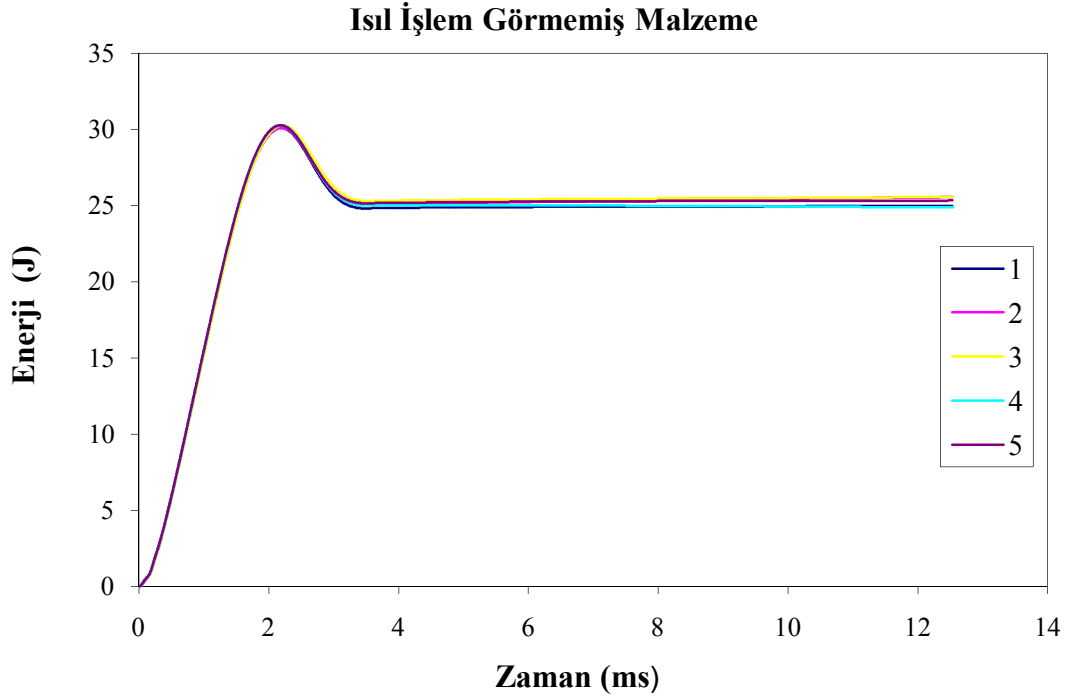
Şekil 4.39 ve Şekil 4.40’ da, 30MnB5 malzemenin ısıtılmış ve ısıtılmamış hali durumu için 5’ er numunenin kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir. Bu eğrilerin altında kalan alanlar, darbe süresinde malzeme tarafından absorbe edilen enerjiye karşılık gelmektedir. Bu durumda, ısıtılmamış numunelerin kuvvet-deplasman grafiği altında kalan alanların daha büyük olduğu ve dolayısıyla daha fazla enerji absorbe ettiği görülmektedir.



**Şekil 4.39.**Isıtılmamış 30MnB5 malzemenin kuvvet –deplasman grafiği



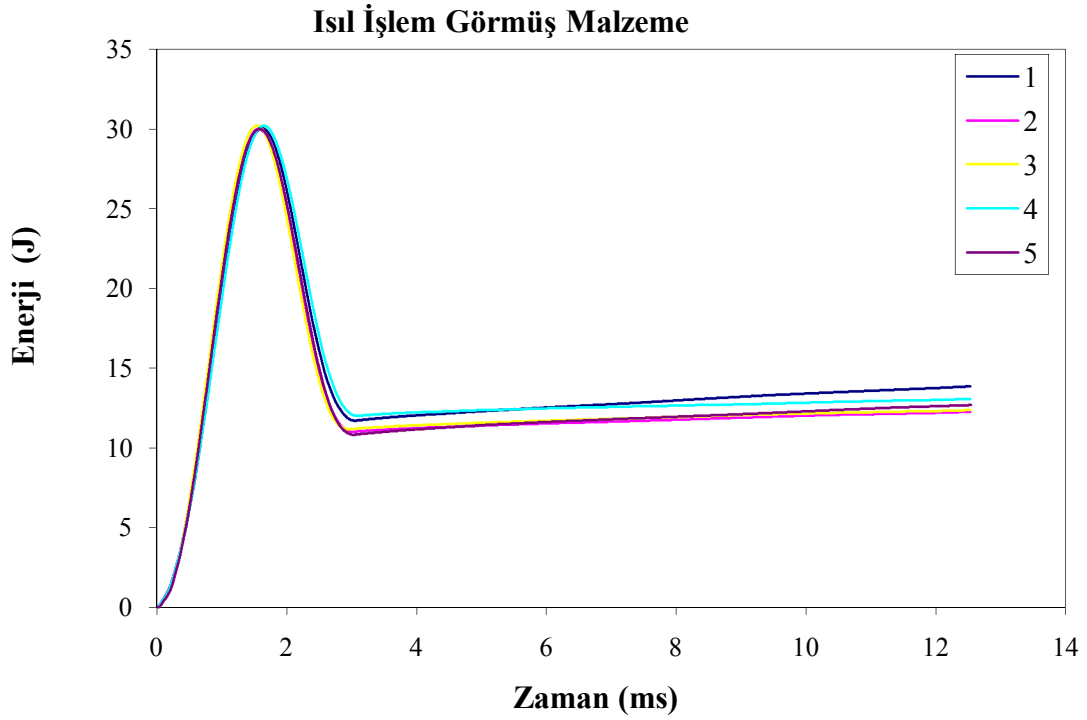
**Şekil 4.40.**Isıl işlem görmüş 30MnB5 malzemenin kuvvet –deplasman grafiği



**Şekil 4.41.**Isıl işlem görmemiş 30MnB5 malzemenin enerji –zaman grafiği

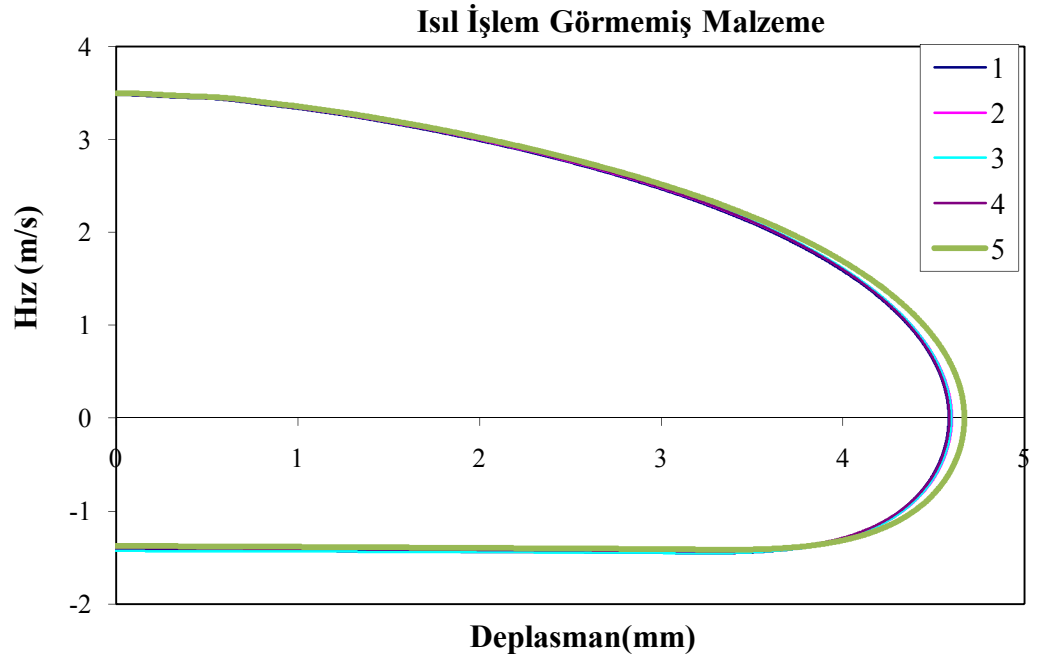


Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’de 30MnB5 malzemenin ısıtma işlemi görmüş ve görmemiş durumları için enerji-zaman grafikleri görülmektedir. Bu grafiklerden hareketle, ısıtma işlemi görmemiş numunenin yatayda izlediği sabit değer yani absorbe ettiği enerji yaklaşık olarak 25J, ısıtma işlemi görmüş numunenin yatayda izlediği sabit değer yani absorbe ettiği enerji yaklaşık olarak 10J dur. Bu durum, Şekil 4.38’ de verilen enerji değerleriyle örtüşmektedir.

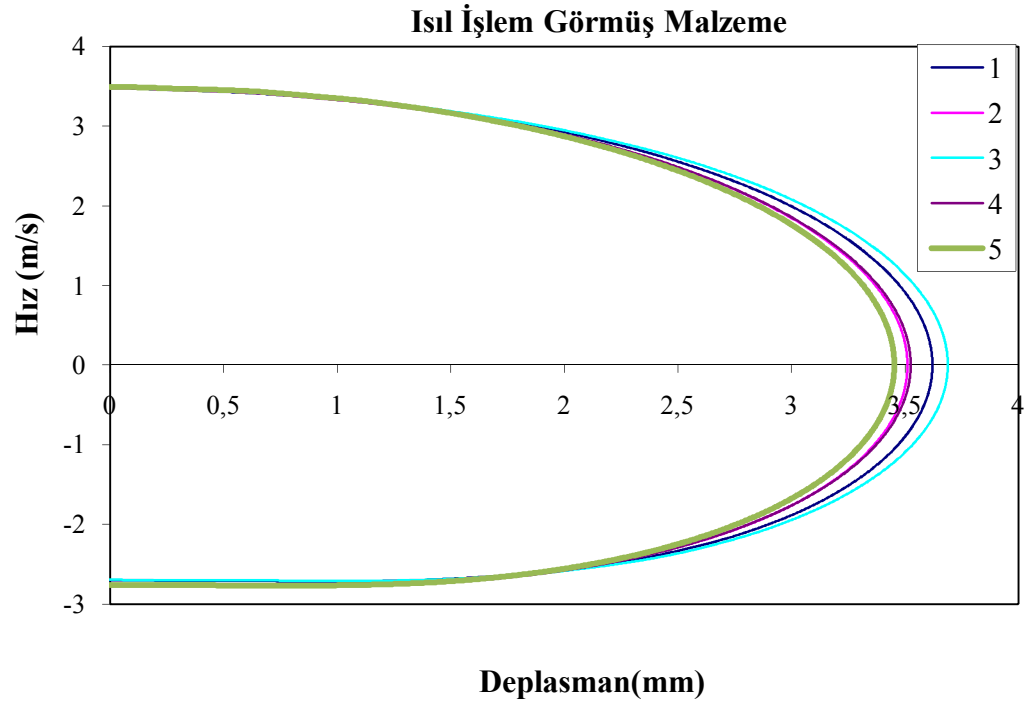


**Şekil 4.42.**Isıtma işlemi görmüş 30MnB5 malzemenin enerji –zaman grafiği

Şekil 4.43 ve Şekil 4.44’de, ısıtma işlemi görmemiş ve görmüş numuneler için vurucunun hız-deplasman grafikleri görülmektedir. Her iki şekilde de görüldüğü ve Al -Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzeme için de olduğu gibi, hızın en yüksek olduğu zaman, numune ile vurucu arasında temas anıdır. Belli bir süre sonra, hız azalarak sıfıra ulaşır ve deplasman maksimum olur. Daha sonra hız negatif değerler alır, bu durum çarpma ucunun geri sekmesini göstermektedir.



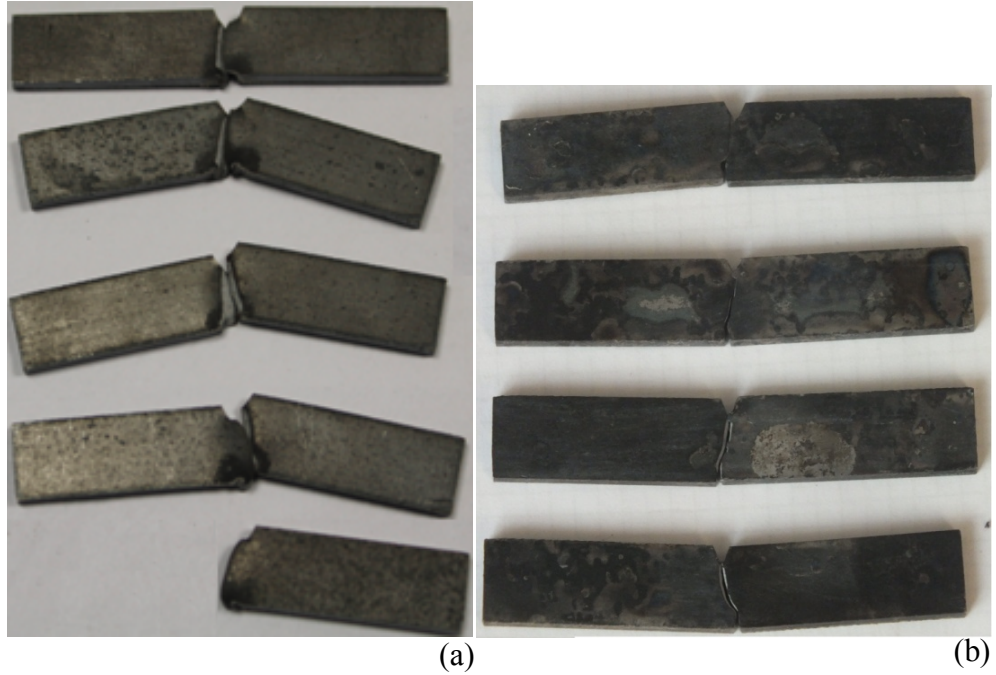
Şekil 4.43. Isıl işlem görmemiş 30MnB5 malzeme için vurucunun hız –deplasman grafiği



Şekil 4.44. Isıl işlem görmüş 30MnB5 malzeme için vurucunun hız –deplasman grafiği

#### 4.2.4. Charpy (Çentik darbe) Deneyleri

Dinamik yüklere karşı kırılma enerjisini belirlemek amacıyla 2,5 mm kalınlığındaki 30MnB5 malzemeye de çentik darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yine diğer malzemede olduğu gibi; optimum mekanik özelliklerin elde edildiği, 850 °C de 15 dk. bekletme ve daha sonra suda soğutma işlemi uygulanmış numunelere, ve ayrıca ısıtma işlemi görmemiş numunelere de bu deneyler gerçekleştirilip, ısıtma işleminin malzemenin ani uygulanan yük altında kırılması için gerekli enerji miktarları belirlenmiştir. Her bir grup için 5'er adet numuneye çentik darbe deneyi uygulanmıştır. Şekil 4.45' de, çentik darbe işlemi uygulanan ısıtma işlemi görmemiş ve ısıtma işlemi uygulanmış numunelere örnekler verilmiştir.

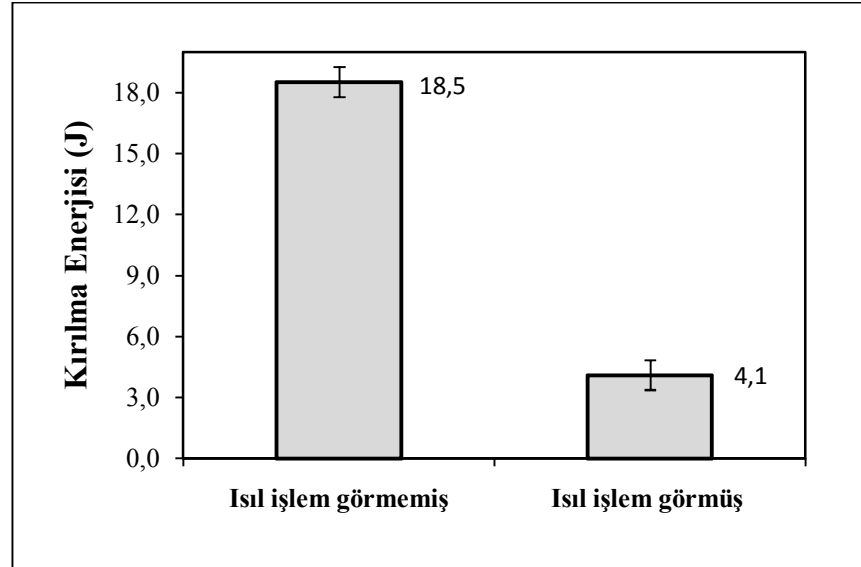


Şekil 4.45.Çentik darbe işlemi uygulanan (a) ısıtma işlemi görmemiş (b) ısıtma işlemi görmüş 30MnB5 numuneler

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda; ısıtma işlemi görmemiş numunelerde daha sünek bir kırılma, ısıtma işlemi görmüşlerde ise gevrek bir kırılma gözlemlenmiştir. Bu durum, Şekil 4.45 a' da gösterilen büzülerek kopma ve Şekil 4.45 b' de gösterilen büzülme olmadan

kopma durumuyla desteklenmektedir. Şekil 4.46' da verilen çentik darbe deney sonuçları değerlendirildiğinde ise; ısıtım işlem görmemiş numuneler için ortalama kırılma enerjisi 18,5 Joule iken ısıtım işlem sonucu bu değeri 4,1 Joule' e düşmüş ve yaklaşık %78 azalma gözlemlenmiştir. Bilindiği üzere, fazla süneklik göstermeyen malzemelerin darbe direnci enerjileri de düşüktür. Bu durum, 850 °C de 15 dk. bekletme ve daha sonra suda soğutma ısıtım işleminin kırılma enerjisini düşürdüğünü göstermektedir.

Enerji değeriindeki bu azalmanın sebebi; Bölüm 4.2.1.2' de araştırılan mikro yapı dönüşümünden kaynaklanmaktadır. Bilindiği üzere; ısıtım işlem öncesi mevcut olan ferritik-perlitik yapı; suda soğutma işlemi sonucunda elde edilen gevrek martenzitik ve eser miktarda beyritik yapıya dönüşmüştür. Bu durumdan ötürü, ısıtım işlem sonrası mikro yapı dönüşümünden dolayı, malzemenin kırılma enerjisinde değeri azalma olduğu söylenebilir.



Şekil 4.46.30MnB5 malzemenin ısıtım işlem görmüş ve görmemiş durumları için kırılma enerjisi değeriinin karşılaştırması

#### 4.2.5. Yorulma Deneyleri

Bölüm 4.2.1.2’ de 30MnB5 malzemenin optimum çekme dayanımı değerine 850 °C de 15 dk. bekletme ve daha sonra suda soğutma işlemiyle ulaşıldığı sonucuna varılmıştı. Bu bölümde ise, bahsedilen optimum durum (ısıl işlem görmüş) ve ısıl işlem görmemiş ham malzemenin Wöhler eğrileri ( $\sigma$ -N) elde edilmeye çalışılmıştır.

Malzemenin sonsuz ömür değeri olarak daha önce de belirtildiği gibi Akay (2005) ‘ın yapmış olduğu tez çalışmasında belirlenen  $2 \times 10^6$  çevrim değeri kabul edilmiştir. Ayrıca, yine bu tez çalışmasındaki gibi her bir gerilme değeri için 3 ya da 4 ölçüm gerçekleştirilmiştir.

Denklem 3.10’da belirtilen Y-sehim ifadesinde kullanılacak olan gerilme değerleri, Bölüm 3.1.2. ve Bölüm 4.2.1.2.’ de araştırılan akma gerilmesi, elastisite modülü değerleri ve belirlenen emniyet katsayılarına bağlı olarak elde edilip, dijital kumpas yardımıyla ayarlanmıştır.

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da testlerde uygulanan emniyet katsayısı, gerilme ve yorulma cihazı üzerinde ayarlanan sehim (çökme) değerleri verilmiştir.

**Çizelge 4. 5.**30MnB5 malzemenin ısıl işlem görmemiş durumu için emniyet katsayısı, gerilme ve sehim değerleri

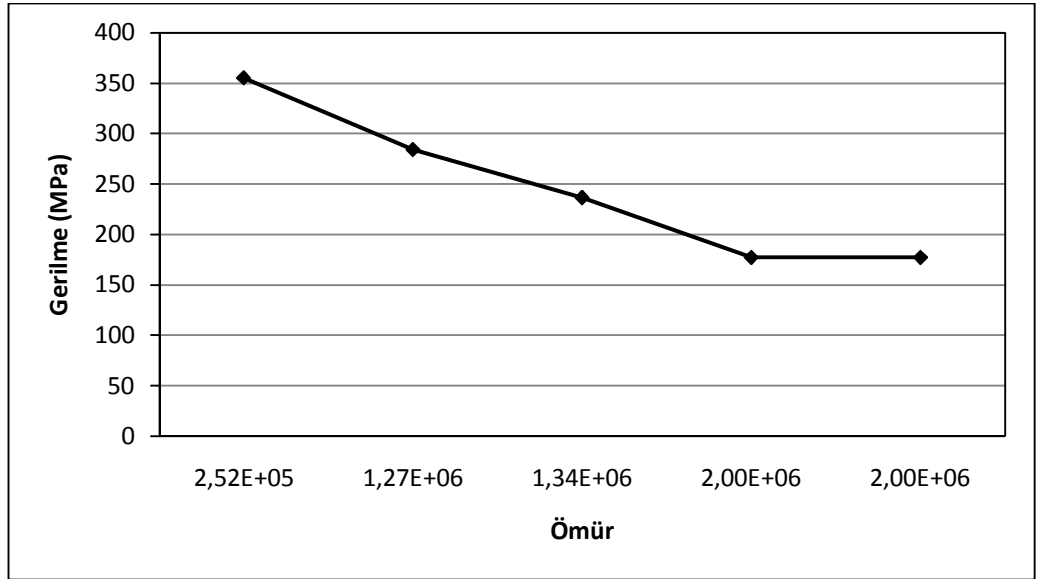
<b>Emniyet Katsayısı</b>	S=1	S=1,25	S=1,5	S=2
<b>Gerilme (<math>\sigma</math>)-MPa</b>	355 MPa	284 MPa	237 MPa	178 MPa
<b>Sehim (Y)-mm</b>	4,27 mm	3,41 mm	2,84 mm	2,13 mm

**Çizelge 4. 6.**30MnB5 malzemenin ısıl işlem görmüş durumu için emniyet katsayısı, gerilme ve sehim değerleri

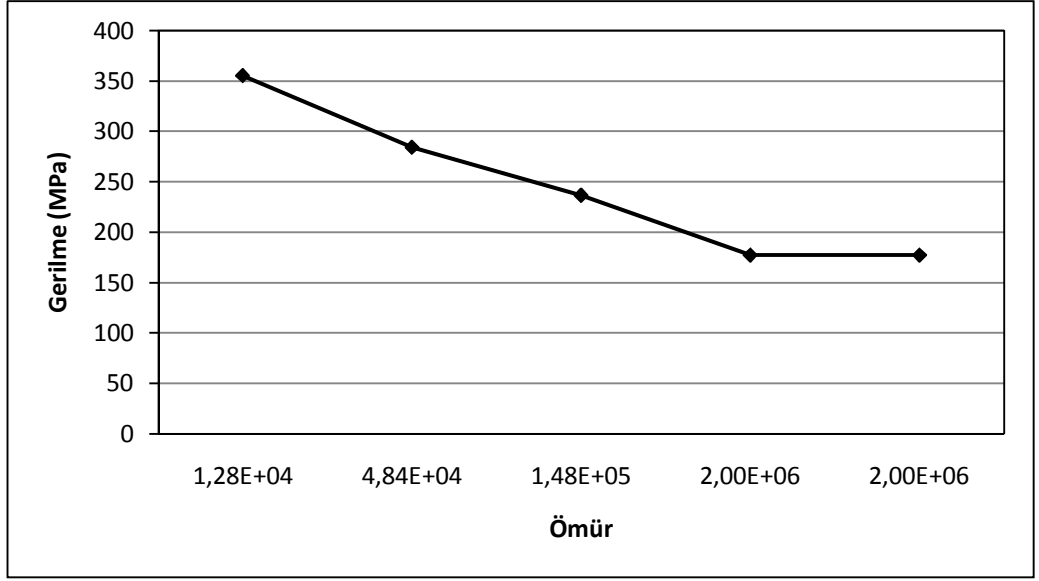
<b>Emniyet Katsayısı</b>	S=1	S=1,5	S=2	S=3
<b>Gerilme (<math>\sigma</math>)-MPa</b>	1024 MPa	683 MPa	512 MPa	341 MPa
<b>Sehim (Y)-mm</b>	12,3 mm	8,2 mm	6,15 mm	4,01 mm

Gerçekleştirilen yorulma deneyleri sonucunda, sonsuz ömür olarak kabul edilen  $2 \times 10^6$  çevrim değerine ısılsı işlemsiz durum için 178 MPa gerilme değerinde ve ısılsı işlem görmüş optimum durum içinse 341 MPa gerilme değerinde ulaşılmıştır. Bu sonuçlar; 850 °C de 15 dk. bekletme ve daha sonra suda soğutma ısılsı işlemin yorulma dayanımını arttırdığını ve daha yüksek gerilme değerlerinde sonsuz ömüre ulaşılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, 30MnB5 malzemeye ısılsı işlem uygulanması ile kırılmadan taşınabilecek yorulma dayanımını yaklaşık olarak 1,92 kat artmıştır.

Bununla beraber, başlangıçta ferrit + perlit mikro yapısına sahip 30MnB5 malzemenin yorulma ömrünün, ısılsı işlem sonrası elde edilen martenzit ve eser miktardaki beynitik mikro yapısına göre daha düşük ve ısılsı işlemin yorulma üzerindeki etkisinin önemli derecede olduğu sonucuna varılabilir. Deneyler sonucunda oluşturulan Şekil 4.47 ve Şekil 4.48' de verilen Wöhler eğrilerinden ( $\sigma$ -N) de bu durum açıkça görülebilmektedir. Ayrıca bu şekillere göre, uygulanan gerilme arttıkça, yorulma ömrü de azalmaktadır.



Şekil 4.47.30MnB5 malzemenin ısılsı işlem görmemiş durumu için Wöhler eğrisi ( $\sigma$ -N)



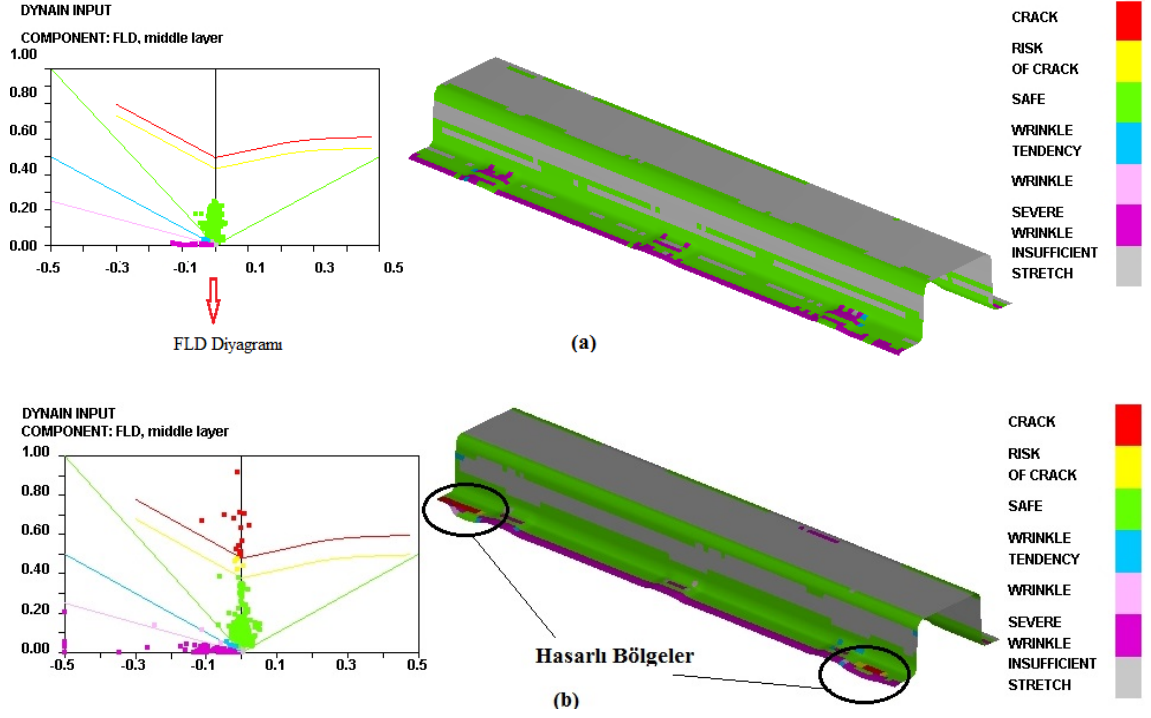
Şekil 4.48. 30MnB5 malzemenin ısıtılmış durumu için Wöhler eğrisi ( $\sigma$ -N)

#### 4.2.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi Çalışmaları

Şekil 4.49' da; 2,5 mm kalınlığındaki 30MnB5 malzemenin sıcak ve soğuk şekillendirme halleri için FLD diyagramı verilmiştir. Yapılan sıcak şekillendirme sonucunda, daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi FLD diyagramında kırmızı ya da sarı bölgeler mevcut olmadığı için sac malzeme de herhangi bir yırtılma problemiyle karşı karşıya olunmadığı ve sorunsuzca şekillendirme gerçekleştirilebileceği sonucuna varılmıştır (Şekil 4.49 a).

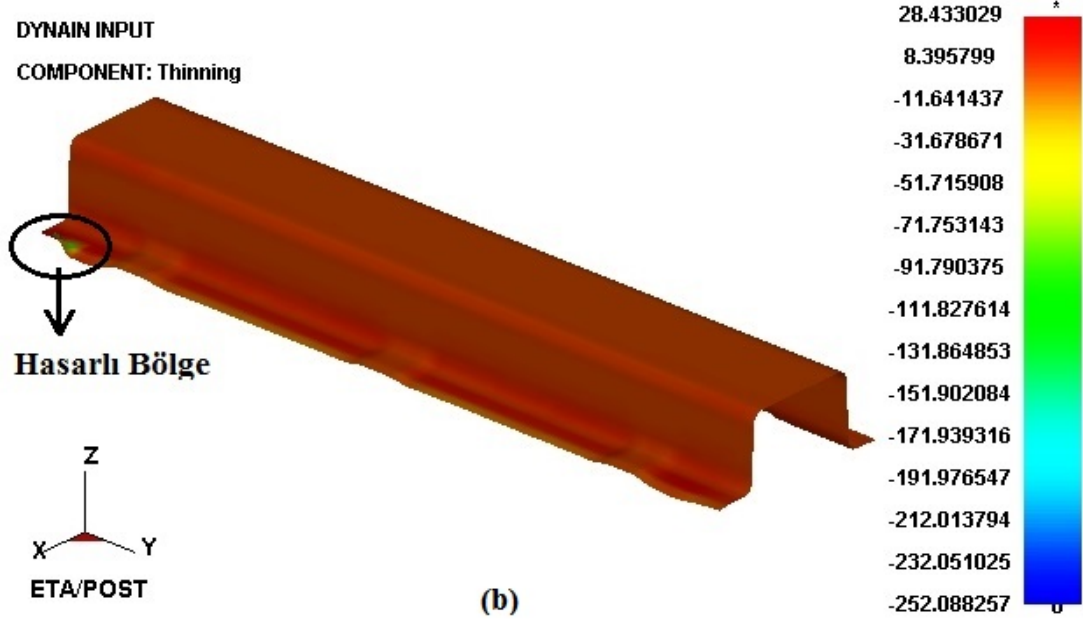
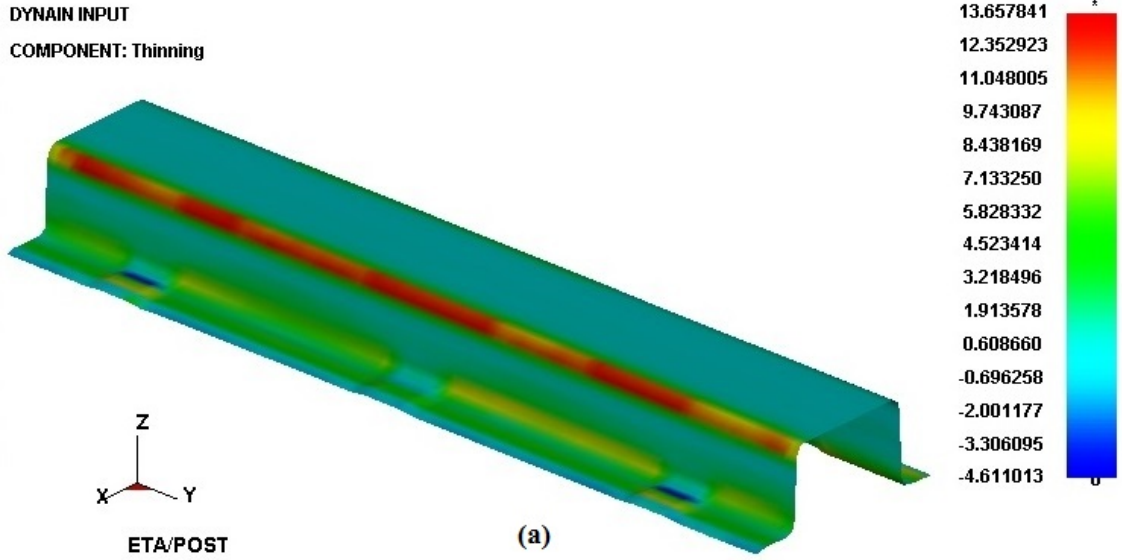
Ancak diğer taraftan 30MnB5 malzemenin soğuk olarak şekillendirilmesi esnasında FLD grafiğinde kırmızı ve sarı bölgeler oluşmuştur (Şekil 4.49 b). Böylelikle soğuk şekillendirme esnasında, yırtılma problemiyle karşılaşılacağı sonucuna varılmıştır.





Şekil 4.49. 30MnB5 malzemenin a) Sıcak şekillendirme sonucu (b) Soğuk şekillendirme sonucu FLD diyagramı

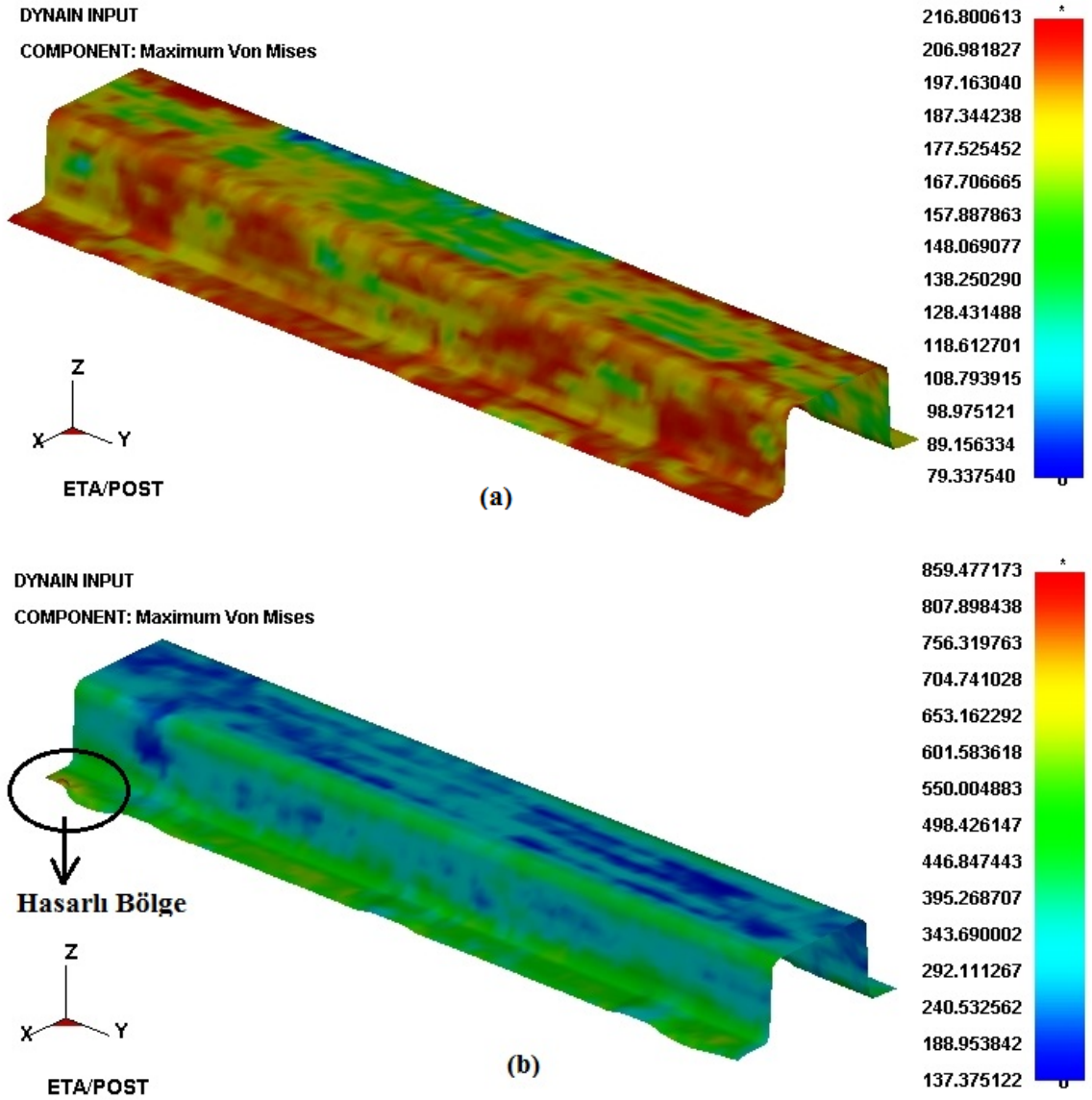
Şekil 4.50 a' ye göre, 30MnB5 malzemenin sıcak şekillendirme sonucu incelme durumu değerlendirildiğinde; maksimum incelmenin yaklaşık olarak % 13 ile parçanın üst kenar bölgelerinde olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak bu bölgeler, FLD diyagramında kırmızı ya da sarı renk olmadığından dolayı her hangi bir risk içermeyerek bu miktardaki incelmenin olumsuz olmadığı sonucu çıkarılmaktadır. Diğer taraftan Şekil 4.50 b' de 30MnB5 malzemenin soğuk olarak şekillendirilmesi sonucu elde edilen kalınlık değişimi verilmiştir. Soğuk şekillendirme sonucu maksimum incelme değeri yaklaşık olarak % 28 olup prototip parçanın uç kısmındadır.



**Şekil 4.50.**30MnB5 malzemenin (a) Sıcak şekillendirme sonucu (b) Soğuk şekillendirme sonucu kalınlık azalması dağılımı

İncelenecek diğer önemli bir sonuç olan, şekillendirme sonrası oluşan Von-Mises gerilmeleri Şekil 4.51’ de verilmiştir. Sıcak şekillendirme için en büyük gerilme değeri yaklaşık olarak 216,8 MPa olup, incelme riskinin fazla olduğu bölgelerde meydana geldiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.51 a). Ayrıca, FLD diyagramında da herhangi bir yırtılma riski olmadığı için, bu gerilme değeri her hangi bir risk oluşturmamaktadır.

Diğer taraftan Şekil 4.51 b' de soğuk şekillendirilme işlemi sonunda parçanın Von Mises gerilme değerleri görülmektedir. Maksimum gerilme değeri, yaklaşık olarak 859,5 MPa olup FLD diyagramında hasarlı bölge olarak belirlenen kısımda oluşmuştur ve sıcak şekillendirmeye göre bu değer yaklaşık olarak 4 katına çıkmıştır.



Şekil 4.51.30MnB5 malzemenin şekillendirme (a) Sıcak şekillendirme sonucu (b) Soğuk şekillendirme sonucu gerilme dağılımı

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

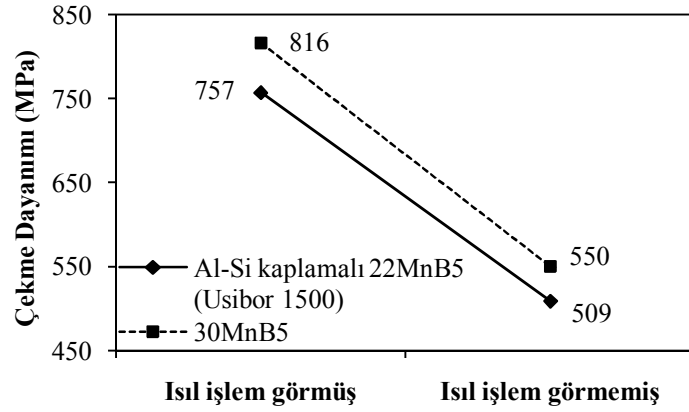
Bu tez çalışmasında; iki farklı bor alaşımlı (Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) ve 30MnB5), sıcak şekillendirilebilir ve ultra yüksek mukavemetli çeliğin farklı ısıl işlemlerle elde edilen mekanik özellikleri incelenip, optimum dayanım değerinin ulaşıldığı parametreler belirlenmiştir. Daha sonraki aşamada ise; optimum dayanımın elde edildiği parametrelerde serbest ağırlıklı düşürme, çentik darbe ve yorulma deneyleri uygulanıp, malzemenin ısıl işlem görmemiş ham hali için de aynı deneyler uygulanarak karşılaştırılması yapılmıştır.

Yapılan çalışmalar ışığında;

1) Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin havada soğutma işlemi için maksimum dayanım değeri 950°C de fırında 15 dakika bekletme işlemiyle 757 MPa olarak elde edildi. Malzemenin ham hali için çekme dayanımı ise, 509 MPa olduğundan, bahsedilen malzemenin havada soğutulması işlemiyle çekme dayanımının arttığı sonucuna ulaşıldı. Bu artış değerinin ise, yaklaşık olarak 1,49 kat olduğu tespit edildi. Mukavemetteki bu değişimin; ham haldeki ferrit+ perlitik yapının, ferrit+ beynit ve eser miktarda martenzite dönüşümünden ileri geldiği belirlendi. Ancak mukavemetteki bu artış daha sonraki maddelerde açıklanacak olan suda soğutma işlemine kıyasla yeterli değildir.

30MnB5 malzemelerinin fırında ısıtılıp havada soğutulması işleminde maksimum dayanım değeri 850°C de fırında 15 dakika bekletme işlemiyle 816 MPa olarak elde edildi. Malzemenin ham durumu için çekme dayanımı değeri, 550 MPa dır. Bu malzemeye uygulanan havada soğutma işlemi çekme dayanımını arttırdı ve bu artışın yaklaşık olarak 1,48 kat olduğu belirlendi. Ancak mukavemetteki bu artış daha sonraki maddelerde açıklanacak olan suda soğutma işlemine göre yeterli değildir.

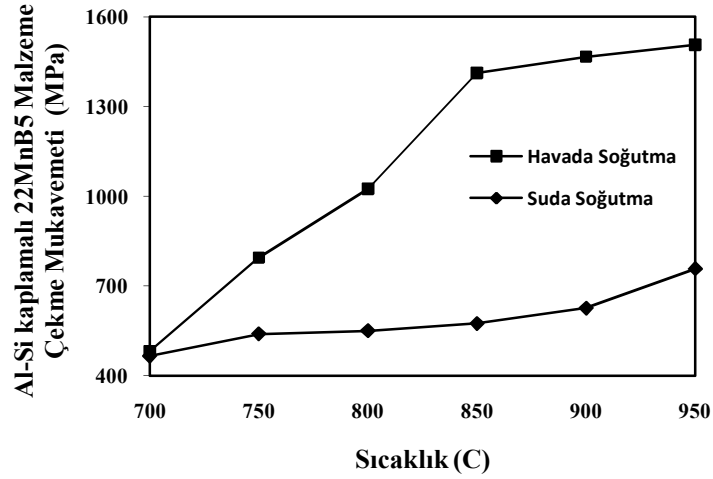
Tüm bu deneylere göre; düşük karbonlu, bor alaşımlı ve sıcak şekillendirilebilir çeliklere havada soğutma işlemi uygulandığı takdirde mukavemet artışı sağlandığı ve bu artışın yaklaşık olarak 1,5 kat olduğu tespit edildi.



**Şekil 5. 1.** Havada soğutma işlemiyle elde edilen optimum çekme dayanımı değerleri

2) Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzeme için havada soğutma işlemiyle elde edilen çekme dayanımı değerleri 700H, 750H, 800H, 850H, 900H ve 950H numuneleri için sırasıyla 465 MPa, 540 MPa, 550 MPa, 575 MPa, 626 MPa ve 757 MPa dır. Bu malzemenin suda soğutma işlemleriyle elde edilen dayanım değerleri ise; 700S, 750S, 800S, 850S, 900S ve 950S numuneleri için sırasıyla 482 MPa, 795 MPa, 1024 MPa, 1412 MPa, 1467 MPa ve 1506 MPa dır. Bu sonuçlara göre Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemeye uygulanan su verme işlemiyle elde edilen maksimum dayanım değerlerinin, havada soğutulma işlemiyle elde edilen maksimum değere göre daha yüksek olduğu sonucuna varıldı.

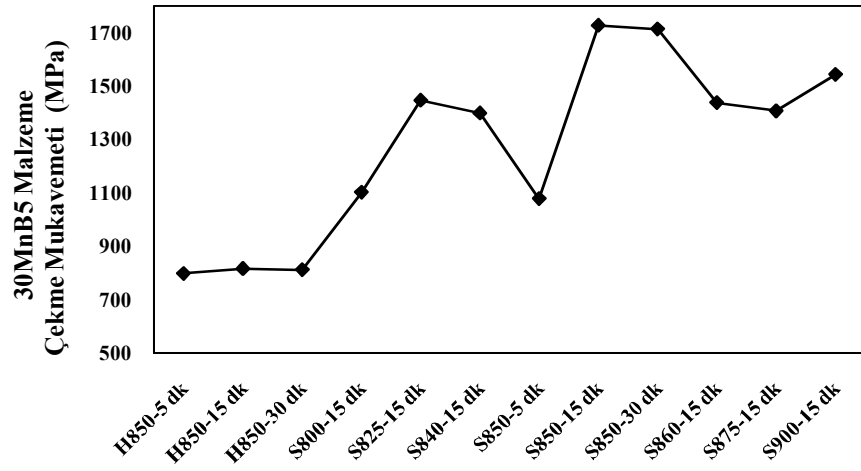
Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzeme için optimum çekme dayanımı 950°C de fırında 15 dakika bekletme ve suda soğutma işlemiyle elde edildi ve ham hale göre çekme dayanımı yaklaşık olarak 3 katına ve sertliği yaklaşık olarak 2,7 katına arttı. Mukavemet ve sertlikteki olumlu değişimin nedeni olarak; başlangıçta (ısıl işlem görmemiş ham halde) ferritik+ perlitik olan mikro yapının martenzitik yapıya dönüşmesi olarak belirlendi.



**Şekil 5. 2.** Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemenin suda ve havada soğutma sonucu elde edilen çekme dayanımı değerleri

30MnB5 malzeme için havada soğutma işlemiyle elde edilen çekme dayanımı değerleri H850-5 dk, H850-15 dk ve H850-30 dk numuneleri için sırasıyla 798 MPa, 816 MPa ve 812 MPa dır. Bu malzemenin suda soğutma işlemleriyle elde edilen dayanım değerleri ise; S850-5 dk, S850-15 dk, S850-30 dk, S800-15 dk, S825-15 dk, S840-15 dk, S860-15 dk, S875-15 dk, S900-15 dk numuneleri için sırasıyla 1078 MPa, 1727 MPa, 1714 MPa, 1102 MPa, 1447 MPa, 1399 MPa, 1438 MPa, 1407 MPa ve 1544 MPa dır. Bu sonuçlara göre 30MnB5 malzemeye uygulanan su verme işlemiyle elde edilen maksimum dayanım değerlerinin, havada soğutma işlemiyle elde edilen maksimum değere göre daha yüksek olduğu sonucuna varıldı.

30MnB5 malzeme için elde edilen optimum çekme dayanımı 850°C de fırında 15 dakika bekletme ve suda soğutma işlemiyle elde edildi. Bu işlemle, malzemenin ham haline göre çekme dayanımı 4,8 katına ve sertliği ise 3,1 katına arttı. Mukavemet ve sertlikteki olumlu değişimin nedeni olarak; ham halde bulunan ferritik+ perlitik mikro yapının, martenzit ve eser miktarda beynit yapısına dönüşmesi olarak belirlendi.



**Şekil 5. 3.** 30MnB5 malzemenin suda ve havada soğutma sonucu elde edilen çekme dayanımı değerleri

Tüm bu deneylere göre; düşük karbonlu, bor alaşımlı ve sıcak şekillendirilebilir çeliklere suda soğutma işlemi uygulandığı takdirde havada soğutma ile elde edilen maksimum dayanım değerine göre daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşıldığı tespit edildi. Bu durum; düşük karbonlu, bor alaşımlı ve sıcak şekillendirilebilir çeliklere uygulanan ısı işlemlerde soğutma ortamının ve dolayısıyla soğuma hızının büyük önem taşıdığını göstermektedir. Düşük karbonlu, bor alaşımlı ve sıcak şekillendirilebilir çelik malzemeler eğer yavaş soğutulurlar ise, hızlı soğutulmalarına nazaran daha düşük mukavemet değerlerine ulaşacakları sonucuna varılmıştır.

- 3) Serbest ağırlık düşürme deneylerinde tüm numunelere 30 Joule lik enerji uygulanmıştır. Isıl işlem uygulanmış Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) ve 30MnB5 malzemelere gerçekleştirilen deneyler sonucunda, malzemelerin enerji absorbe yeteneğinin ham hallerine göre azaldığı sonucuna varıldı. Bu azalma değerlerinin; Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemede yaklaşık olarak % 60 ve 30MnB5 malzemede yaklaşık olarak % 55 olduğu belirlendi. Bu azalmanın sebebi olarak, suda soğutma işlemi sonucunda elde edilen ve ferrit+perlit mikro yapısına göre daha gevrek olan martenzitik yapıdan kaynaklandığı tespit edildi. Isıl işlem uygulanmış Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) ve 30MnB5 malzemelerin birim darbe enerjisi değerlerinin sırasıyla; 453782 J/m<sup>3</sup> ve 232245

$J/m^3$  olduğu belirlendi. Bu durum, suda soğutma işlemi uygulanan Al-Si kaplamalı 22MnB5'nin (Usibor 1500), 30MnB5 malzemeye göre daha yüksek enerji absorbe etme yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu durumun sebebi olarak, Al-Si kaplamalı 22MnB5'nin (Usibor 1500), 30MnB5 malzemeye göre daha yumuşak olmasıdır. Çünkü ısı işlem görmüş Al-Si kaplamalı 22MnB5 malzemenin sertlik değeri 511HV1 ve 30MnB5 malzemenin ki ise; 576 HV1 dir.

- 4) Çentik darbe deneyi uygulanan V çentikli ısı işlem uygulanmış numunelerin kırılma enerjisinin, ısı işlem görmemiş ham numunelere kıyasla Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) malzemede yaklaşık olarak % 42 ve 30MnB5 malzemede yaklaşık olarak %78 azaldığı tespit edildi. Bu durum; düşük karbonlu, bor alaşımlı ve sıcak şekillendirilebilir çelik malzemelerde suda soğutma işleminin dinamik yüklere karşı direnci azalttığını gösterir. Ayrıca deneyler esnasında, ısı işlem görmemiş numunelerde daha sünek bir kırılma (büzülerek kopma), ısı işlem görmüşlerde ise gevrek bir kırılma (büzülme olmadan kopma) olduğu belirlenmiştir. Dinamik yük direncindeki azalma ve gevrek kırılmanın sebebi olarak, malzemelerin ısı işlem görmemiş haldeki ferritik+ perlitik mikro yapının ısı işlemle birlikte martenzitik içyapıya dönüşümüdür.

Isıl işlem uygulanmış Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) ve 30MnB5 malzemelerin birim kırılma enerjisi değerlerinin sırasıyla;  $8,78 J/cm^3$  ve  $2,99 J/cm^3$  olduğu belirlendi. Bu durum, suda soğutma işlemi uygulanan Al-Si kaplamalı 22MnB5'nin (Usibor 1500), 30MnB5 malzemeye göre daha yüksek kırılma direncine sahip olduğunu göstermektedir. Sebebi ise, suda soğutma işlemi uygulanan Al-Si kaplamalı 22MnB5'nin (Usibor 1500), 30MnB5 malzemeye göre daha sert olmasıdır.

- 5) Düzlemsel eğilme gerilmeli yorulma deneyleri sonucunda, malzemelerin Wöhler eğrileri ( $\sigma-N$ ) oluşturulmuştur. Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) ve 30MnB5 malzemelere suda soğutma işlemi uygulanmasıyla,  $2 \times 10^6$  olarak belirlenen sonsuz ömür değerinin ulaşıldığı gerilme değerlerinin sırasıyla 2,8 ve 1,92 kat arttığı belirlendi. Deneyler sonucunda düşük karbonlu, bor alaşımlı ve sıcak şekillendirilebilir çelik malzemelerin suda soğutma işleminin, belirlenen sonsuz ömür için yorulma dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca martenzit mikro



yapısına sahip durumun, ferrit + perlit mikro yapısına ait duruma göre daha iyi olduğu bulundu.

6) Seçilen prototip kalıp için sıcak şekillendirme simülasyonunda kullanılmak üzere, malzemelerin sıcak çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde malzemelerin sıcaklığa bağlı olarak akma ve çekme gerilmeleriyle,  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrileri elde edilmiştir. Sıcaklık arttıkça çekme ve akma dayanımlarının azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, artan sıcaklıkla beraber malzeme sünek bir hal aldığı için yüksek sıcaklıkta şekillendirme esnasında uygulanan kuvvet azalacağından dolayı gerçek üretimin şekil verilebilme açısından daha da kolaylaşacağı sonucuna varılmıştır.

7) Dynaform isimli sonlu elemanlar programında gerçekleştirilen sıcak (termomekanik) ve soğuk şekillendirme simülasyonunda iki farklı malzeme için FLD, kalınlık azalması ve Von-Mises gerilme dağılımı değerleri elde edilmiştir. Gerçekleştirilen sıcak şekillendirme analizleri sonucunda, herhangi bir yırtılma riski ya da yırtılma gözlemlenmediği için, seçilen prototip kalıbın sıcak şekillendirilmesi işleminin sorunsuzca gerçekleştirilebileceği ve seri üretiminin sorunsuzca yapılabileceği sonucuna varıldı. Ancak diğer taraftan, aynı malzemelerin soğuk şekillendirmesi esnasında yırtılma problemiyle karşılaşarak yüksek gerilme değerleri elde edilmiştir.

Tüm veriler sonucunda, düşük karbonlu, bor alaşımlı ve sıcak şekillendirilebilir çeliklerin sıcak şekillendirme işlemi soğuk şekillendirmeye göre nihai ürünün sorunsuzca elde edilmesi açısından daha risksiz bir yöntemdir. Ayrıca, bu sonuçlara göre bahsedilen malzemelerin soğuk şekillendirilmesi gerçek üretim için uygun olmayıp ve tercih edilen bir yöntem de değildir.

8) Tüm optimum koşullar ile ısıl işlem görmemiş durumların genel olarak değerlendirilmesi yapıldığında ısıl işlem uygulaması ile çekme dayanımı, sertlik ve yorulma dayanımı değerlerinde artma, enerji absorbe etme yeteneği ve kırılma enerjisi değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Bu durumdan dolayı, tez kapsamında bahsedilen malzemelerin endüstride kullanılacak olan montaj parçalarında bu veriler göz önünde bulundurularak seri üretim gerçekleştirilmelidir.

9) Ayrıca, bor alaşımlı ve sıcak şekillendirilebilir alternatif yeni çelik malzemelerin üretimi için sıcak ya da soğuk haddeleme ya da farklı üretim yöntemleri denenmelidir. Aynı sac kalınlığı için, malzemenin ihtiva edeceği bor miktarı değiştirilerek, bor elementinin sıcak şekillendirme üzerindeki etkisi mekanik özellikleri ve mikro yapı açısından incelenmelidir. Bu esnada, farklı ısıl işlem metodları denenmeli ve optimum dayanım değerlerinin elde edileceği parametreler belirlenmelidir. Diğer taraftan belirlenen optimum koşullar için gerçek sıcak şekillendirme üretimleri gerçekleştirilmelidir. Nihai ürünün farklı bölgelerinden alınan numunelerin mekanik özellikleriyle, optimum koşullardaki mekanik özellikler karşılaştırılmalı ve gerçek üretim bu değerleri karşılamıyorsa iyileştirme çalışmaları yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Abbasi, M., Saeed-Akbari, A., Naderi, M. 2012.** The effect of strain rate and deformation temperature on the characteristics of isothermally hot compressed boron-alloyed steel, *Materials Science and Engineering: A*, 538: 356–363.
- Abdulhay, B., Bourouga, B. Dessain, C., Brun G., Wilsius, J. 2009.** Experimental study of heat transfer in hot stamping process, *International Journal of Material Forming*, 2(1): 255-257.
- Akerstrom, P. 2006.** Modeling and simulation of hot stamping, *Doktora Tezi*, University of Lulea, Lulea.
- Ağyel, T., Yaşar, M. 2009.** Metalik sacların hidrolik şekillendirme ile şekillendirilebilirliğinin teorik ve deneysel incelenmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye.
- Ağyel, T. 2009.** Metalik sacların hidrolik şekillendirme ile şekillenebilirliğinin teorik ve deneysel incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Teknik Eğitim Böl. Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük.
- Akay, S. K. 2005.** Otomotiv endüstrisinde kullanılan çift fazlı çeliklerin fiziksel özelliklerinin araştırılması. *Doktora Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Bursa.
- Akgün, Y. 2010.** Onarılmış kompozit plakların darbe davranışları. *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Mekanik Anabilim Dalı, İzmir.
- Anonim, 2012.** Çeliğin ısıl işlemleri. [http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme1/Celigin\\_iscal\\_islemleri.pdf](http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme1/Celigin_iscal_islemleri.pdf) (Erişim tarihi: 24.11.2012).
- Anonim, 2012.** Hot-stamped steel creates new applications for production laser cutting. <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2010/03/hot-stamped-steel-creates-new-applications-for-production-laser-cutting/> (Erişim tarihi: 20.08.2012).
- Anonim, 2012.** Kantitatif Metalografi Deney Föyü. <http://mf.omu.edu.tr/malzeme/files/2012/02/Nicel-Kantitatif-Metalografi.pdf> (Erişim tarihi: 18.12.2012).
- Anonim, 2012.** Quenchable boron steels. [http://www.arcelormittal.com/fce/prd\\_web/A54\\_EN.html](http://www.arcelormittal.com/fce/prd_web/A54_EN.html)-(Erişim tarihi: 24.11.2012).
- Anonim, 2012.** Outstanding abrasion resistance heat treatable boron steel grades offer excellent resistance against abrasive wear. [http://www.arcelormittal.com/fce/repository/Brochures/BoronGrades\\_brochure\\_EN.pdf](http://www.arcelormittal.com/fce/repository/Brochures/BoronGrades_brochure_EN.pdf) - (Erişim tarihi: 20.08.2012).

**Anonim, 2012.** Steels for hot stamping. [http://www.arcelormittal.com/automotive/saturnus/sheets/E\\_EN.pdf](http://www.arcelormittal.com/automotive/saturnus/sheets/E_EN.pdf).- (Erişim tarihi: 20.08.2012).

**Anonim, 2012.** Steel forming and heat treating handbook. [http://www.gorni.eng.br/e/Gorni\\_SFHTHandbook.pdf](http://www.gorni.eng.br/e/Gorni_SFHTHandbook.pdf)- (Erişim tarihi: 24.11.2012).

**Anonim, 2012.** 30MnB5 Boron alloyed quenched and tempered steel. [http://www.salzgitter-flachstahl.de/MDB/downloadcenter\\_en/Hot\\_rolled\\_products\\_Steel\\_grades/Quenched\\_and\\_tempered\\_steels/Boron\\_alloyed\\_quenched\\_and\\_tempered\\_steel\\_30MnB5.pdf](http://www.salzgitter-flachstahl.de/MDB/downloadcenter_en/Hot_rolled_products_Steel_grades/Quenched_and_tempered_steels/Boron_alloyed_quenched_and_tempered_steel_30MnB5.pdf)- (Erişim tarihi: 20.08.2012).

**Aytar, Ö.B. 2012.** Borlanmış düşük karbonlu mikro alaşımlı çeliklerin magnetik ve mekaniksel özelliklerinin incelenmesi. *Doktora Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Isparta.

**Barcellona, A., Palmeri, D. 2009.** Effect of plastic hot deformation on the hardness and continuous cooling transformations of 22mnb5 microalloyed boron steel, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 40(5): 1160-1174.

**Bardelcik, A., Salisbury, P.C., Winkler, S., Wells, M. A., Worswick, M. J. 2010.** Effect of cooling rate on the high strain rate properties of boron steel. *International Journal of Impact Engineering*, 37: 694-702.

**Bardelcik, A., Worswick, M.J., Winkler, S., Wells, M.A. 2012.** A strain rate sensitive constitutive model for quenched boron steel with tailored properties, *International Journal of Impact Engineering*, 50: 49-62.

**Bariani , P.F., Bruschi, S., Ghiotti, A., Turetta, A. 2008.** Testing formability in the hot stamping of HSS (High Strength Steels), *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1): 265-268.

**Bai-liang, Z., Zhong-de, S., Chao, J., Wen-juan, R. 2010.** Numerical simulation of hot stamping technology for automotive structural parts, International Conference on Advanced Technology of Design and Manufacture (ATDM 2010), 23-25 November 2010, Beijing, China.

**Borsetto, F., Ghiotti, A., Bruschi, S. 2009.** Investigation of the high strength steel Al-Si coating during hot stamping operations, *Key Engineering Materials*, 410-411: 289-296.

**Bosetti, P., Bruschi, S., Stoehr, T., Lechler, J., Merklein, M. 2010.** Interlaboratory comparison for heat transfer coefficient identification in hot stamping of high strength steels, *International Journal of Material Forming*, 3(1): 817-820.

**Cai, Y., Halim, F.S., Li, G., Chen, S. 2011.** Hot stamping simulation and austenite decomposition modeling of an automobile cross member, *Procedia Engineering*, 15: 4902-4907.

**Chang Y., Meng, Z., Ying, L., Li, X., Ma, N., Hu, P. 2011.** Influence of hot press forming techniques on properties of vehicle high strength, *Journal of Iron and Steel Research International*, 18(5):59-63.

**Choi., H. S., Kim, B. M., Nam, K. J., Ha, S. Y., Cha, S. H., Kang, C. G. 2011.** Development of hot stamped center pillar using form die with channel type indirect blank holder, *International Journal of Automotive Technology*, 12(6): 887-894.

**Çarboğa, C. 2012.** Türk çelik sektöründe alaşım elementi olarak borun kullanımı, International Iron & Steel Symposium, 02-04 April 2012, Karabük, Türkiye.

**Çapan, L. 2003.** Metallere plastik şekil verme, Çağlayan Kitapevi, s. 354-358.

**Doğan, M.A. 2008.** Düşük enerjili serbest ağırlık düşme test düzeneği tasarım ve imalatı, Düşük Enerji Seviyelerinde Darbe Testi Yapılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara.

**Dongwei, F., 2008.** Literature review of hot press forming. Materials Design Laboratory Graduate Institute of Ferrous Technology Pohang University of Science and Technology, [http://mdl.webteem.co.kr/jdboard/jdform/prens/20080922031752\\_11219\\_15.pdf](http://mdl.webteem.co.kr/jdboard/jdform/prens/20080922031752_11219_15.pdf) - (Erişim tarihi: 20.08.2012).

**Er, Ü. 2011.** 15b35h borlu çeliğinin kuru kayma koşullarında sürtünme ve aşınma davranışının incelenmesi. *DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25: 75-82.

**Eren, H. 2005.** Ferritik paslanmaz çeliğin korozyon davranışına karbür yapıcı alaşım elementlerinin etkilerinin incelenmesi. *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ.

**Ekici, R. 2004.** Alüminyum esaslı SiC partikül takviyeli metal matriksli kompozit malzemelerin darbe davranışlarının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri.

**Fırat, M., 2006.** Yüksek mukavemetli saclarda şekillendirilebilirlik ve geri esneme. Bursa Kalıp Teknolojileri ve Yan Sanayi Fuarı, [http://www.mehmetfirat.net/Pres\\_and\\_Lec/14\\_present\\_lect.pdf](http://www.mehmetfirat.net/Pres_and_Lec/14_present_lect.pdf)-(Erişim tarihi: 20.08.2012).

**Gavas, M. 2005.** Al-1050 alaşimli alüminyum sacın çekme oranı limiti al-1050 alaşimli alüminyum sacın çekme oranı limitinin belirlenmesi, *Teknoloji*, 8 (2): 215-221.

**Geiger, M., Merklein, M., Lechler, J. 2008.** Determination of tribological conditions within hot stamping, *Production Engineering*, 2(3): 269-276.

**George, R., Bardelcik, A., Worswick, M.J. 2012.** Hot forming of boron steels using heated and cooled tooling for tailored properties, *Journal of Materials Processing Technology*, 212(11): 2386-2399.

**Güleç, Ş., Aran, A.1995.** Malzeme bilgisi Cilt 2.İ.T.Ü Makine Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul, Türkiye, s. 36-43.

**Hayat, F. 2010.** Trip çeliklerinin otomotiv endüstrisinde kullanımının incelenmesi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 25(4): 701-712.

**Hongtu, S., Ping, H., Ning, M., Guozhe S., Bo, L., Dinglu, Z. 2010.** Application of hot forming high strength steel parts on car body in side impact, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 23(2).

**Hu, P., Ma, N., Liu, L.-z., Zhu, Y.-g. 2012.** The Basic Mechanical Properties and Experimental Verification for Hot Forming Steel. SpringerVerlag. [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4471-4099-3\\_4](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4471-4099-3_4)-(Erişim tarihi: 17.12.2012).

**Ikeuchi, K., Yanagimoto, J. 2011.** Valuation method for effects of hot stamping process parameters on product properties using hot forming simulator, *Journal of Materials Processing Technology*, 211(8): 1441–1447.

**Jang J., Lee, J., Joo, B., Moon Y. 2009.** Flow characteristics of aluminum coated boron steel in hot press forming, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19(4): 913-916.

**Jong, Y., Lee, Y., Kim, D., Kang, M., Hwang, I., Lee, W. 2011.** Microstructural evolution and mechanical properties of resistance spot welded ultra high strength steel containing boron, *Materials Transactions*, 52(6): 1330-1333.

**Kalpakistan, S., Schmid,R., S. 2003.** Manufacturing processes for engineering materials, Prentice Hall, s. 341-371.

**Karalı, M. 2007.** Derin sac çekme işleminde kalıp boşluğunun cidar kalınlık değişimine etkilerinin sonlu elemanlar analizi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2007 (1): 55-60.

**Kim, C., Kang, M. J., Park, Y. D. 2011.** Laser welding of Al-Si coated hot stamping steel, *Procedia Engineering*, 10: 2226–2231.

**Koç, A. 2007.** AISI 4142 çeliğinin ısıtma işlem ve ergitme yöntemleriyle yüzey modifikasyonu sonucu mekanik davranışlarının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ.

**Kolleck, R., Veit, R., Merklein, M., Lechler, J., Geiger, M. 2009.** Investigation on induction heating for hot stamping of boron alloyed steels, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1): 275–278.

**Kurumahmut, O. 2009.** 22mnb5 çelik sacların elektrikli ısıtma ile sıcak şekillendirilmesinin deneysel analizleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

- Lee, S., Ronevich, J.A, Krauss, G., Matlock, D.K. 2010.** Hydrogen embrittlement of hardened low-carbon sheet steel, *ISIJ International*, 50(2): 294-301.
- Liu, H.S., Xing, Z.W., Bao, J., Song, B.Y. 2009.** Investigation of the hot-stamping process for advanced high-strength steel sheet by numerical simulation, *Journal of Materials Engineering and Performance* , 19(3): 325-334.
- Liu, H., Bao, J., Xing, Z., Zhang, D., Song, B., Lei, C. 2011.** Modeling and fem simulation of quenchable high strength steels sheet metal hot forming process, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20(6): 894-902.
- Liu, H., Liu, W., Bao, J., Xing, Z., Song, B., Lei, C. 2011.** Numerical and experimental investigation into hot forming of ultra high strength steel sheet, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20(1): 1-10.
- Liu, H., Jin, X., Dong, H., Shi, J. 2011.** Martensitic microstructural transformations from the hot stamping, quenching and partitioning process, *Materials Characterization*,. 62(2):223-227.
- Merklein, M., Lechler, J. 2006.** Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1-3): 452-455.
- Merklein, M., Lechler, J., Stoehr, T. 2009.** Investigations on the thermal behavior of ultra high strength boron manganese steels within hot stamping, Chair of Manufacturing Technology University Erlangen-Nuremberg, [http://web.univ-ubs.fr/limatb/EG2M/Disc\\_Seminaire/ESAFORM\\_09/data/pdf/paper155grrsq.pdf](http://web.univ-ubs.fr/limatb/EG2M/Disc_Seminaire/ESAFORM_09/data/pdf/paper155grrsq.pdf) (Erişim tarihi: 21.08.2012).
- Min, J., Lin, J., Min, Y., Li, F. 2012.** On the ferrite and bainite transformation in isothermally deformed 22MnB5 steels, *Materials Science and Engineering: A*, 550: 375–387.
- Mori, K., Ito, D. 2009.** Prevention of oxidation in hot stamping of quenchable steel sheet by oxidation preventive oil, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1): 267-270.
- Mori , K., Maeno, T., Maruo, Y. 2012.** Punching of small hole of die-quenched steel sheets using local resistance heating, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1): 255-258.
- Mori, K., Maki, S., Tanaka, Y. 2005.** Warm and hot stamping of ultra high tensile strength steel sheets using resistance heating, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54(1): 209-212.
- Naderi, M., Durrenberger, L., Molinari, A., Bleck, W. 2008.** Constitutive relationships for 22MnB5 boron steel deformed isothermally at high temperatures, *Materials Science and Engineering: A*, 478(1-2):130-139.

- Naderi, M., Ketabchi, M., Abbasi, M., Bleck, W. 2011.** Analysis of microstructure and mechanical properties of different boron and non-boron alloyed steels after being hot stamped, *Procedia Engineering*, 10: 460–465.
- Naderi, M., Ketabchi, M., Abbasi, M., Bleck, W. 2011.** Analysis of microstructure and mechanical properties of different high strength carbon steels after hot stamping, *Journal of Materials Processing Technology*, 211(6): 1117–1125.
- Naderi, M., Saeed-Akbari, A., Bleck, W. 2008.** The effects of non-isothermal deformation on martensitic transformation in 22MnB5 steel, *Materials Science and Engineering A*, 487-1-2: 445-455.
- Naderi, M., Uthaisangsuk, V., Prah, U., Bleck, W. 2007.** A numerical and experimental investigation into hot stamping of boron alloyed heat treated steels, *Steel Research Int.*, 79(2): 77-84.
- Nalbant, M., Palalı A. T. 2011.** Effects of different material coatings on the wearing of plowshares in soil tillage, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 35: 215-223.
- Nikravesh, M., Naderi, M., Akbari, G.H. 2012.** Influence of hot plastic deformation and cooling rate on martensite and bainite start temperatures in 22MnB5 steel, *Materials Science and Engineering: A*, 540: 24–29.
- Önal, A.S., Güler, H. 2012.** Sıcak şekillendirme prosesi. *TMMOB MMO Mühendis ve Makine Dergisi*, 53(626): 66-70.
- Öztürk, F., Toros, S., Esener, E., Uysal, E. 2009.** Otomotiv endüstrisinde yüksek mukavemetli çeliklerinin kullanmanın incelenmesi. *Mühendis ve Makine*, 50(596): 44-49.
- Saygın, M. 2006.** AISI 1020 çeliklerinde borlamanın yorulma dayanımına etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Sertkaya, E. 2010.** Aynı kalınlıktaki tek ve çok katmanlı sacların derin çekme özelliklerinin incelenmesi ve karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Kütahya.
- So, H., Faßmann, D., Hoffmann, H., Golle, R., Schaper, M. 2012.** An investigation of the blanking process of the quenchable boron alloyed steel 22MnB5 before and after hot stamping process, *Journal of Materials Processing Technology*, 212(2): 437–449.
- Steinbeiss, H., So, H., Michelitsch, T., Hoffmann, H. 2007.** Method for optimizing the cooling design of hot stamping tools. *Production Engineering*, 1(2):149-155.
- Subaşı, M., Karataş, Ç. 2010.** AISI 4140 çeliğinde sertlik, yorulma dayanımı ilişkisi. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1):21-27.



**Suehiro, M., Maki, J., Kusumi, K., Ohgami, M., Miyakoshi, T. 2003.** Properties of aluminum-coated steels for hot-forming, *Nippon Steel Technical Report*, <http://www.nsc.co.jp/en/tech/report/pdf/n8805.pdf>-(Erişim tarihi: 20.08.2012).

**Tekkaya, E., Karbasian, H., Homberg, W., Kleiner, M. 2007.** Thermo-mechanical coupled simulation of hot stamping components for process design, *Production Engineering*, 1(1): 85-89.

**Totten, G. E. 2006.** Steel heat treatment: metallurgy and technologies, CRC Press, Oregon, USA, s.848.

**Tungtrongpaibroj, J., Uthaisangsuk, V., Bleck, W. 2009.** Determination of yield behaviour of boron alloy steel at high temperature, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 19(1): 29-38.

**Turetta, A., Bruschi, S., Ghiotti, A. 2006.** Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations, *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1-3): 396-400.

**Xing, Z.W., Bao, J., Yang, Y.Y. 2009.** Numerical simulation of hot stamping of quenchable boron steel, *Materials Science and Engineering: A*, 499(1-2): 28-31.

**Yazıcı, A. 2011.** Investigation of the reduction of mouldboard ploughshare wear through hot stamping and hardfacing processes, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 35: 461-468.

**Yazıcı, A. 2011.** Wear behavior of carbonitride-treated ploughshares produced from 30MnB5 steel for soil tillage applications, *Metal Science and Heat Treatment*, 53(5-6): 248-253.

**Yanagida, A., Azushima, A. 2009.** Evaluation of coefficients of friction in hot stamping by hot flat drawing test, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1): 247-250.

**Yenice, M., M. 2006.** Bükme ile şekillendirilen saclarda geri yaylanma davranışının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Anabilim Dalı, Bursa.

**Ying, X., Zhong-de, S., Mi-lan, Z., Chao, J. 2010.** Experiment studies on crack phenomena of hot stamping parts, International Conference on Advanced Technology of Design and Manufacture (ATDM 2010), 23-25 November 2010, Beijing, China.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Hande GÜLER  
Doğum Yeri: Bursa  
Yabancı Dili: İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise: Bursa Erkek Lisesi Yabancı Dil Ağırlıklı/ 1996-2000

Lisans: Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü (Bölüm 3.sü)/ 2001-2005

Yüksek Lisans: Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü/ 2006-2008

Çalıştığı Kurum ve Yıl: Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü- Araştırma Görevlisi/ (2006-).

İletişim (e-posta): handeguler@uludag.edu.tr

### Yayımları\*:

Güler, H., Ertan, R.,Özcan, R. 2012. Influence of Heat Treatment Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Boron-Alloyed Steels, *Materials Testing*, 9: 619-624.

Güler, H., Özcan, R. 2012. Comparison of the Mechanical Properties of Rotary Embossing and Restoration Processes, *JOM*, 64 (8):911-915.

Güler, H., Özcan, R. 2012. Effects of the Rotary Embossing Process on Mechanical Properties in Aluminum Alloy 1050 Sheet, *Met. Mater. Int.*, 18(2): 225-230.

Önal, A.S., Güler, H. 2012. Sıcak Şekillendirme Prosesi. *TMMOB MMO Mühendis ve Makine Dergisi*, 53(626): 66-70.

Güler, H., Sezer, Ş.F.,Ülkü, S.2010. Binalarda yapı fiziği problemleri: Bursa'da Bir Kamu Kurumu Örneği, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15 (2): 53-64.

Güler, H. 2008. İnce Sacların Desenleme Yöntemi İle Mukavemetinin Arttırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa.

Güler H., Ülkü S. 2007.Bitişik Nizamlı Villa Tipi Konutlarda Yapısal Konfor Koşulları Üzerine Bir Araştırma,*Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 12 (2): 97-107.