İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOCOL 22MnB5 ÇELİĞİNİN BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Müh. Mustafa USLU

Anabilim Dalı: MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı: MALZEME ve İMALAT

HAZİRAN 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOCOL 22MnB5 ÇELİĞİNİN BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa USLU
(503031311)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2007

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. H.Oktay BODUR**
Diğer Jüri Üyeleri	**Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU**
	Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, destekleyen kıymetli hocam Prof. Dr. Oktay BODUR'a, çalışmam süresince sunduğu olanaklardan ötürü Maslak İTÜ KOSGEB MetalForm Müh. Tasarım İml. San. Ltd. Şti.'ne ve balistik deneylerin yapılmasında verdiği destek sebebiyle Atlas Güvenlik firmasına teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmam süresince bir an olsun desteklerini esirgemeyen başta anneme, aileme ve arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Haziran 2007 Mustafa USLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ İi
KISALTMALAR V
TABLO LİSTESİ Vİ
ŞEKİL LİSTESİ Vİi
SEMBOL LİSTESİ X
ÖZET Xİi
SUMMARY Xİİİ

1. GİRİŞ 1

1.1. İç Balistik 1
1.2. Dış Balistik 2
1.3. Etki Balistiği 3
1.3.1. Yerçekimi 3
1.3.2. Sürtünme 3

2. BALİSTİK DARBE OLUŞUMU VE KIRILMA MEKANİĞİ 6

2.1. Mermi Ucu Geometrisi 8

3. ÖLÇÜM METODLARI 14

3.1. Anlık Ölçüm Yöntemleri 15
3.1.1. Yüksek Hızda Fotoğraflama 15
3.1.1.1. Manyeto-Optik Objektif 16
3.1.1.2. Elektro-Optik Objektif 16
3.1.1.3. Elektronik Görüntü Tipleri 17
3.1.1.4. Flaş Çekme 17
3.1.1.5. Stroboskobik Görüntüleme 17
3.1.2. Balistik Kronograf 18
3.1.3. Optik Sensörler 18
3.1.3.1. Optik Dedektör 19
3.1.4. Mikro-Hızlı Sensörler 19
3.2. Sürekli Ölçüm Yöntemleri 20
3.2.1. Lazer İnterferometreleri 20
3.2.1.1. Giriş 21
3.2.1.2. Sistemin Çalışma Prensibi 21
3.2.1.3. Lazer İnterferometreleri Kalibrasyonu 22
3.2.1.4. Lazer İnterferometreleri Kullanım Alanları 22
3.2.2. Kuvvet Ölçer ve İvme Ölçerler 25
3.2.3. Hız İnterferometreleri 26
3.2.3.1. Giriş 28
3.2.3.2. Doppler Etkisi 29
3.2.3.3. Lazer Doppler Ölçüm Aleti 29
3.2.4. Lazer Işını Çizgisi Hız Sensörü (LLVS) 31
3.2.4.1. Giriş 31
3.2.4.2. Deneysel 33
3.2.5. Artık Penetrasyon, Kritik Açı ve Ters Balistik Test Yöntemleri 39

3.2.5.1. Kritik Açı Testi 47
3.2.5.2. Ters Balistik Test Yöntemleri 48
3.2.5.3. Terminal Balistik Test 49

4. BOR ÇELİĞİ 50

4.1. Bor ve Özellikleri 50
4.2. Bor Çelikleri 51
4.3. Docol Bor Çelikleri 54
4.3.1. Zaman Sıcaklık Soğuma Diyagramı 56
4.3.2. Yağ İle Soğutma 57
4.3.3. Emülsiyonlu Soğutma 58
4.3.4. Polimer İçerikli Soğutma 58
4.3.5. Su İle Soğutma 58
4.3.6. Tavlama 58
4.3.7. Hidrojen Elenmesi 59
4.3.8. Makasla Kesme 59
4.3.9. Zımbalama 61
4.3.10. Uygun Takım Malzemesi 61

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 62

5.1. Elektrikle Isıtma Prosesi 63
5.1.1. Deney Şartları 66
5.1.1.1. Deney Şartları 66
5.2. Balistik Deneyi 74
5.2.1. 3800 Amperlik Numune 75
5.2.2. 3900 Amperlik Numune 77
5.2.3. 4000 Amperlik Numune 79
5.2.4. 4100 Amperlik Numune 81
5.2.5. 4200 Amperlik Numune 83
5.2.6. 4200 Amperlik Havayla Soğutulmuş Numune 85
5.2.7. 4300 Amperlik Çift Soğutmalı Numune 87
5.2.8. Sonuçlar 89
5.3. Sertlik Deneyi 89
5.4. Mikroyapı İncelemesi 91
5.4.1. 3800 Amperlik Numune 91
5.4.2. 3900 Amperlik Numune 97
5.4.3. 4000 Amperlik Numune 102
5.4.4. 4100 Amperlik Numune 106
5.4.5. 4200 Amperlik Numune 108
5.4.6. 4200 Amperlik Hava Soğutmalı Numune 110
5.4.7. 4300 Amperlik Numune 112
5.4.8. Çekme Deneyi 114
5.4.8.1. 3800 Amperlik Numune Çekme Deneyi 118
5.4.8.2. 3900 Amperlik Numune Çekme Deneyi 119
5.4.8.3. 4000 Amperlik Numune Çekme Deneyi 121
5.4.8.4. 4100 Amperlik Numune Çekme Deneyi 122
5.5. İyi Bir Zırhta Olması Gereken Özellikler 124

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 126

KAYNAKLAR 128

ÖZGEÇMİŞ 132

KISALTMALAR

TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
DIN	: Deutsches Institut für Normung
IEC	: International Electrotechnical Commission
ASME	**:** American Society of Mechanical Engineers
TMMOB	: Türkiye Mühendis ve Mimar Odaları Birliği

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1: Docol bor çeliği % kesme yüzeyi pürüzlülüğü[28]..... 60
Tablo 4.2: Zımbalama için kesme pürüzlülüğü değerleri[28]..... 61
Tablo 5.1: Balistik saclara uygulanan sertlik ölçümleri..... 90
Tablo 5.2: 3800 amperlik çekme deneyleri.....119
Tablo 5.3: 3900 amperlik çekme deneyleri.....120
Tablo 5.4: 4000 amperlik çekme deneyleri.....122
Tablo 5.5: 4100 amperlik çekme deneyleri.....123

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Mermi hasar....1
Şekil 1.2: Yivli silahla atışta merminin izlediği yol....4
Şekil 2.1: Şematik olarak çeşitli tahribat biçimlerinin gösterimi[4]....7
Şekil 2.2: 3 çeşit mermi ucuyla yapılan atışlar sonucunda hedeflerin giriş ve çıkışlarında oluşan tahribatlara ait fotoğraflar[10]....11
Şekil 3.1: Ampulün içinden geçen merminin fotoğraflanması....15
Şekil 3.2: Mikro-hızlı sensörler[2]....20
Şekil 3.3: Mastar bloğu lazer interferometresi[24]....24
Şekil 3.4: Mastar Bloğu interferometrik ölçümü[23]....24
Şekil 3.5: Kısa mastar bloğu komparatörü[25]....24
Şekil 3.6: 1m' lik mastar bloğu komparatörü[23]....25
Şekil 3.7: Mylar polyester film [21]....27
Şekil 3.8: Tipik lazer doppler hız ölçüm aleti[23]....28
Şekil 3.9: Doppler etkisi[23]....29
Şekil 3.10: Lazer doppler optik sistemi[24]....30
Şekil 3.11: Basınçlı kesmeyle levha çarpma deneyi şeması#]....31
Şekil 3.12: (a) LLVS fotoğrafı ve (b) sistemin çalışma mantığını gösterir şema[3]....33
Şekil 3.13: LLVS deneysel düzenek şeması[3]....34
Şekil 3.14: LLVS fotoğrafı[3]....34
Şekil 3.15: Kalibrasyon plakası kullanılarak oluşturulmuş LLVS kalibrasyon eğrisi[13]....35
Şekil 3.16: LLVS voltaj-zaman eğrisi[13]....38
Şekil 3.17: Balistik malzeme ve referans malzeme[8]....39
Şekil 3.18: Artık penetrasyonun referans malzeme kalınlığıyla değişimi[8]....40
Şekil 3.19: 1) namlu, 2) birinci hız sensörü, 3) mermi, 4)ikinci hız sensörü, 5) balistik malzeme, 6)rijit desteği, 7)balistik ölçüm sarkacı[8]....42
Şekil 3.20: Mermi hızına bağlı artık penetrasyon lineer eğrisi[12]....44
Şekil 3.21: DOP test yöntemi standart düzeni[12]....45
Şekil 3.22: Genelleştirilmiş performans eğrisi[12]....46
Şekil 3.23: Hedef malzeme yüzey yoğunluğu çarpma açısına bağlı değişimi grafiği....48
Şekil 3.24: Terminal balistik test düzeneği....49
Şekil 4.1: Docol bor çeliğine ait TTT diyagramı[27]....57
Şekil 4.2: Su ile soğutulup tavlanan bor çeliğine ait mekanik özellikler[27]....59
Şekil 5.1: Docol 22MnB5 soğuma eğrisi....64
Şekil 5.2: Elektrikle ısıtma prosesi hidrolik pres tezgahı ve kontrol ünitesi....65
Şekil 5.3: 3800 Amper akımda sıcaklık- zaman eğrisi....67
Şekil 5.4: 3900 Amper akımda sıcaklık- zaman eğrisi....68
Şekil 5.5: 4000 Amper akımda sıcaklık- zaman eğrisi....69
Şekil 5.6: 4100 Amper akımda sıcaklık- zaman eğrisi....70
Şekil 5.7: 4200 Amper akımda sıcaklık- zaman eğrisi....71

Şekil 5.8: 4200 Amper akımda sıcaklık- zaman eğrisi.....72
Şekil 5.9: 4300 Amper akımda sıcaklık- zaman eğrisi.....74
Şekil 5.10: Mermi çekirdeği ve kovanı.....75
Şekil 5.11: 3800 Amperlik sacda mermi izinin önden görünüşü.....76
Şekil 5.12: 3800 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.....76
Şekil 5.13: 3800 Amperlik sacda mermi izinin arkadan görünüşü.....77
Şekil 5.14: 3800 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.....77
Şekil 5.15: 3900 Amperlik sacda mermi izinin önden görünüşü.....78
Şekil 5.16: 3900 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.....78
Şekil 5.17: 3900 Amperlik sacda mermi izinin arkadan görünüşü.....79
Şekil 5.18: 3900 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.....79
Şekil 5.19: 4000 Amperlik sacda mermi izinin önden görünüşü.....80
Şekil 5.20: 4000 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.....80
Şekil 5.21: 4000 Amperlik sacda mermi izinin arkadan görünüşü.....81
Şekil 5.22: 4000 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.....81
Şekil 5.23: 4100 Amperlik sacda mermi izinin önden görünüşü.....82
Şekil 5.24: 4100 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.....82
Şekil 5.25: 4100 Amperlik sacda mermi izinin arkadan görünüşü.....83
Şekil 5.26: 4200 Amperlik sacda mermi izinin önden görünüşü.....84
Şekil 5.27: 4200 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.....84
Şekil 5.28: 4200 Amperlik sacda mermi izinin arkadan görünüşü.....85
Şekil 5.29: 4200 Amperlik hava soğutmalı sacda mermi izinin önden görünüşü..... 86
Şekil 5.30: 4200 Amperlik hava soğutmalı sacda mermi izinin yandan görünüşü.....86
Şekil 5.31: 4200 Amperlik hava soğutmalı sacda mermi izinin arkadan görünüşü....87
Şekil 5.32: 4300 Amperlik sacda mermi izinin önden görünüşü.....88
Şekil 5.33: 4300 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.....88
Şekil 5.34: 4300 Amperlik sacda mermi izinin arkadan görünüşü.....89
Şekil 5.35: Rockwell Sertlik Ölçüm cihazı.....90
Şekil 5.36: 3800 Amperlik numune x100 büyütme.....92
Şekil 5.37: 3800 Amperlik numune x200 büyütme.....92
Şekil 5.38: 3800 Amperlik numune x500 büyütme.....93
Şekil 5.39: 3800 Amperlik numune x1000 büyütme.....93
Şekil 5.40: Nitalle dağlanmış 3800 Amperlik numune iç yapısı x50 büyütme.....94
Şekil 5.41: Nitalle dağlanmış 3800 Amperlik numune iç yapısı x500 büyütme.....94
Şekil 5.42: Nitalle dağlanmış 3800 Amperlik numune iç yapısı x1000 büyütme.....95
Şekil 5.43: Lepera ile dağlanmış 3800 Amperlik numune iç yapısı x1000 büyütme.95
Şekil 5.44: 3800 Amperlik numune elektron mikroskobunda x1000 büyütme.....96
Şekil 5.45: 3800 Amperlik numune elektron mikroskobunda x2000 büyütme.....96
Şekil 5.46: 3800 Amperlik numune elektron mikroskobunda x5000 büyütme.....97
Şekil 5.47: 3900 Amperlik numune x100 büyütme.....97
Şekil 5.48: 3900 Amperlik numune x200 büyütme.....98
Şekil 5.49: 3900 Amperlik numune x500 büyütme..... .98
Şekil 5.50: 3900 Amperlik numune x1000 büyütme..... 99
Şekil 5.51: Nitalle dağlanmış 3900 Amperlik numune iç yapısı x50 büyütme..... 99
Şekil 5.52: Nitalle dağlanmış 3900 Amperlik numune iç yapısı x500 büyütme..... 100
Şekil 5.53: Nitalle dağlanmış 3900 Amperlik numune iç yapısı x1000 büyütme.... 100
Şekil 5.54: Lepera ile dağlanmış 3900 Amperlik numune iç yapısı x1000 büyütme101
Şekil 5.55: 3900 Amperlik numune elektron mikroskobunda x1000 büyütme.....101
Şekil 5.56: 3900 Amperlik numune elektron mikroskobunda x2000 büyütme.....102
Şekil 5.57: 3900 Amperlik numune elektron mikroskobunda x5000 büyütme.....102

Şekil 5.58: Nitalle dağlanmış 4000 Amperlik numune iç yapısı x50 büyütme..... 103
Şekil 5.59: Nitalle dağlanmış 4000 Amperlik numune iç yapısı x500 büyütme..... 103
Şekil 5.60: Nitalle dağlanmış 4000 Amperlik numune iç yapısı x1000 büyütme... 104
Şekil 5.61:Lepera ile dağlanmış 4000 Amperlik numune iç yapısı x1000 büyütme 104
Şekil 5.62: 4000 Amperlik numune elektron mikroskobunda x1000 büyütme..... 105
Şekil 5.63: 4000 Amperlik numune elektron mikroskobunda x2000 büyütme..... 105
Şekil 5.64: 4000 Amperlik numune elektron mikroskobunda x5000 büyütme..... 106
Şekil 5.65: 4100 Amperlik numune x100 büyütme..... 107
Şekil 5.66: 4100 Amperlik numune x200 büyütme..... 107
Şekil 5.67: 4100 Amperlik numune x500 büyütme..... 108
Şekil 5.68: 4100 Amperlik numune x1000 büyütme..... 108
Şekil 5.69: 4200 Amperlik numune x100 büyütme..... 109
Şekil 5.70: 4200 Amperlik numune x200 büyütme..... 109
Şekil 5.71: 4200 Amperlik numune x500 büyütme..... 110
Şekil 5.72: 4200 Amperlik numune x1000 büyütme..... 110
Şekil 5.73: 4200 Amperlik hava soğutmalı numune x100 büyütme..... 111
Şekil 5.74: 4200 Amperlik hava soğutmalı numune x200 büyütme..... 111
Şekil 5.75: 4200 Amperlik hava soğutmalı numune x500 büyütme..... 112
Şekil 5.76: 4200 Amperlik hava soğutmalı numune x1000 büyütme..... 112
Şekil 5.77: 4300 Amperlik numune x100 büyütme..... 113
Şekil 5.78: 4300 Amperlik numune x200 büyütme..... 113
Şekil 5.79: 4300 Amperlik numune x500 büyütme..... 114
Şekil 5.80: 4300 Amperlik numune x1000 büyütme..... 114
Şekil 5.81: Standart çekme numunesi..... 115
Şekil 5.82: 3800, 3900, 4000 Amperlik çekme numuneleri..... 116
Şekil 5.83: Çekme numunelerine sürtünmeyi artırmak için puntolanan plakalar..... 117
Şekil 5.84: Çekme tezgahı..... 117
Şekil 5.85: 3800 Amperlik numune çekme diyagramı..... 118
Şekil 5.86: 3800 Amperlik çekme sonrası numune..... 119
Şekil 5.87: 3900 Amperlik numune çekme diyagramı..... 120
Şekil 5.88: 3900 amperlik numune çekme deneyi..... 121
Şekil 5.89: 4000 Amperlik numune çekme diyagramı..... 121
Şekil 5.90: 4000 amperlik numune çekme deneyi..... 122
Şekil 5.91: 4100 amperlik numune çekme deneyi..... 123
Şekil 5.92: 4100 amperlik numune çekme deneyi..... 124
Şekil 6.1: Çekme deneyleri..... 127

SEMBOL LİSTESİ

Ep : Çeliğin delme enerjisi (Nm)
σu : Çelik tabakasının sınır gerilme kuvveti (N/m2)
d : Mermi çapı (m)
s : Tabakanın desteklenmemiş (hasar görmemiş) mesafesi
H : Hedefin(tabakanın) kalınlığı (m)
σ_a : uygun bir akma gerilmesi
K : zorlanma faktörü
L : Kaydı tutulan merminin izleneceği en büyük yol
T : Saniyede çekilecek en az kare sayısı
K : Resmin kalitesi (genelde 2-4 arasında)
A : Film yüzeyi ve merminin yönü arasındaki açı
f : Frekans
λ : Dalga boyu
c : Işık hızı
A : Anlık ışının genliği
A_r : Yansıyan ışının genliği
ν : Mermi hızı
δ : lazer dalgaboyu
V : voltaj
x : yer değiştirme
Vs : penetrasyon çarpma hızı
P_R : Düzeltilmiş artık penetrasyon
Pμ : Ölçülmüş artık penetrasyon
Vs : Çarpma hızı
ρ_R, ρ1 : Ana zırh ve referans malzemesinin yoğunlukları
P_R, P1 : Ana zırh ve referans malzemesinin derinlikleri
h1 : Referans malzemenin kalınlığı
P_R -P1 : Referans derinliği ile referans malzeme ve balistik malzemesi birlikte kullanılıncaki derinlik arasındaki fark
ρ : yoğunluk
h : kalınlık
θ50 : kritik açı
R : Soğuk iş parçasının elektrik direnci (ohm)
ά : Sıcaklıkla artan direnç katsayısı
ΔT : Sacın sıcaklık artışı (^{0}C)
I : Akım (Amper)
m : İş parçasının kütlesi
c : Özgül termal kapasitesi
A : İş parçasının yüzeysel alanı
Ts : Sacın sıcaklığı
Te : Çevresel sıcaklık
α : Konveksiyon katsayısı

k **:** Radyasyonel ısı transferi katsayısı
G **:** ölçme bölgesi uzunluğu (mm)
W **:** genişlik (mm)
T **:** kalınlık (mm)
R **:** radyüs (mm)
L **:** sacın uzunluğu
A **:** boyun bölgesi uzunluğu
B **:** tutma bölgesi uzunluğu
C **:** tutma bölgesi genişliği

DOCOL 22 MnB5 ÇELİĞİNİN BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüzde haberlerde ve gazetelerde insanların terörle ne kadar ciddi bir şekilde karşı karşıya kaldığını hergün görmekteyiz. Kaybedilenlerin geri dönüşü olmamaktadır. Bunu önlemek için tüm ülkeler güvenlik önlemlerine daha fazla yatırım yapmaya başlamış ve bu konudaki çalışmalara ağırlık vermiştir.

Çalışmamızda öncelikle balistik nedir, hangi alt dallara ayrılır açıklamalarıyla balistik konusuna değinildi. Balistiğin kelime anlamı kavrandıktan sonra konuyla ilgili daha önce yapılmış araştırma, çalışma ve deneylere değinildi. Bir mermi ve hedef malzeme birbirlerinden nasıl etkilenir sorusunun cevabı araştırıldı.

Balistik bir malzemeye ve merminin havadaki hızına ait, çarpma anındaki, hemen önce ve sonraki dataları toplayabilmek için literatürde hangi deney metodları kullanılıyor ve nasıl kullanılıyor soruları araştırıldı ve açıklamalar getirildi. Merminin hızı, malzemede bıraktığı iz derinliği, merminin enerjisi, ivme, yer değiştirme ölçümü için kullanılan deneylerden bahsedildi.

Tezimizin ana konusu ve kullanılan malzeme Docol 22MnB5 Bor Çeliği olarak Borun özelliklerinden, malzemede ne gibi etkiler yaptığından bahsettikten sonra tezin deneysel bölümüne geçildi.

Docol 22MnB5 sacı Maslak İTÜ KOSGEB de MetalForm Müh. Tasarım İml. San. Ltd. Şti. tarafından ithal edildi ve ısıl işleme uygun olan bu saca elektrik akımı altında çok hızlı ısıtmadan sonra kalıpta yine çok hızlı soğutma işlemi uygulandı. Bu sayede saca dayanımını arttıran martenzitik ve beynitik bir özellik kazandırıldı.

Literatürde balistik malzemelerle ilgili yapılan deneyler sertlik deneyi, mikroyapı testi ve çekme deneyidir. Çalışmamızda sertlik, mikroyapı, çekme deneyleri seçildi. Bunlara ek olarak mermiyle özel bir poligonda atışlar yapılarak kıyaslama imkanı bulundu. Deney numunelerine atışlar yapıldı. Bu deneyler sonucunda malzemenin balistik yapısı ile ilgili yorumlar yapıldı.

Bu çalışma ile Docol 22MnB5 sacına balistik deneyler yapılarak sonuçları irdelendi. Tezin bu alanda çalışma yapacak meslektaşlarıma faydalı olmasını diliyorum.

INVESTIGATION of BALLISTIC PROPERTIES of DOCOL 22MnB5 STEEL

SUMMARY

Today in news and newspapers we see how people is under big problem with terror. Human can't get the losts and death livings back. To prevent this, all the countries make more enterprises and givemore importance to the ballistic studies.

In our study firstly we described what is the ballistic,which sub-sections does it has. After this previous studies, experiments and works mentioned. We try to explicate the behaviour of projectile and target against each other.

In literature, to collect the datas for projectile and target which experimental methods are used? We mentioned how studiers find the projectile energy, velocity, displacement...etc.

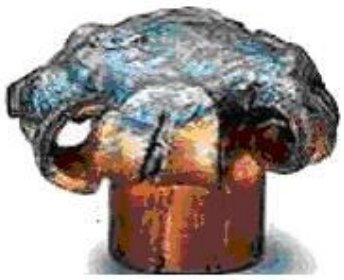
After, described what is Bor and which characteristics does bor add to steel Docol 22 MnB5 bor steel as the main subject of our thesis.

We passed to the experimental study of our thesis. Docol 22MnB5 steel is imported by MetalForm Maslak Company. This steel is a type of water hardening steel. Before the experiments we hardened the steel with the MetalForm. Firstly in an electrical resistance circuit the steel heated to austenitic area in a very short time of 4 seconds and then very rapidly the steel given die-hardening to gain martensitic and bainitic structure. So the steel's strength is increased plus to ballistic gaining.

In literature the experiments for the ballistic are hardness test, microstructure analysis and tensile test. Plus to these we did a projectile shooting tests to our steel. And compared the results with the tests.

With the study, ballistic experiments of Docol 22MnB5 steel is investigated. I hope this study would be useful for my colleagues working in this field.

1. GİRİŞ



Şekil 1.1: Mermi hasar.

Balistik; Fransızca "balistique" sözcüğünden gelen bir kelime olup, uzaya fırlatılan cisimlerin, özellikle mermilerin gerek bir silahın içindeki gerekse dışındaki devinimlerini ve hedef üzerindeki etkisini inceleyen bilimdir. Bir başka deyişle, mermilerin itme kuvveti, uçuşu ve çarpma etkisini inceleyen bir bilimdir. 19.yy boyunca silah alanında ortaya çıkan teknik ilerlemeler sonucunda gelişen modern balistik bilimi üç dala ayrılır.

1.1. İç Balistik

Merminin ya da fişeğin, fişek yatağına sürülmesinden başlayarak, ateşli silahın mekanik yapısını, çalışmasını, patlamanın oluşumu, fişek üzerindeki etkisini ve mermi çekirdeğinin silahı terk etmesine kadar olan devinimlerini inceler.

Gerçekte barut ateşlendiğinde bir anda yanmaz ve giderek artan bir gaz hacmi meydana getirir. Bu da basıncı çoğaltarak mermiyi ileri doğru iter. Ama gazların etkisindeki alan genişleyince, basınç da aynı oranda düşer. Bu yüzden ağır yanan barutlar ve uzun namlular kullanılarak basıncın sabit tutulmasına çalışılır. Bu uzun namlular gazların etkisini uzatarak, namluları fazla yormaksızın yüksek ilk hızlar elde edilmesini sağlar. İç balistiğin teorik incelemesi, en yüksek basınçla (bazı

namlularda cm^2 de 3 tona ulaşır) ilk hız arasındaki ilişkilerin incelenmesine dayanır. Bu inceleme geri tepme hızının hesaplanmasına da yardım eder. İç balistikte deney, ancak 1839 da General Piobert'in barutu kapalı kapta yakmak için yaptığı çalışmalarla başlamıştır. Bu deneylerde barut basıncı ölçülebilir bir değer haline gelmiştir. Deneylerde barut basıncı ölçerler (Crusher), kaydedici mermiler, velosimetreler vb. kullanılmaya başlanmıştır.

1.2. Dış Balistik

Mermi ya da mermi çekirdeğinin namluyu terk etmesinden başlayarak hedefe varıncaya kadar yol kat eden mermi çekirdeğinin uçuşuyla ilgilenir.

Dış balistik, çok eskiden beri incelenmesine rağmen, uzun süre yanılgılarla dolu kalmıştır. Çünkü hedefi görerek yapılan düz atışta, mermi yörüngesinin düz bir çizgi halinde; dikey atışta ise ikizkenar üçgen biçiminde olduğu sanılıyordu. Ancak, 1537 yılında Venedik'li Tartaglia, yörüngenin daima eğri olduğunu ortaya koydu. Balistik biliminin tamamen açıklığa kavuşabilmesi için Galile(1638) ile Newton'u(1723) beklemek gerekecekti.

Bunlardan birincisi yer çekiminin, ikincisi de hava direncinin etkisini belirlemişti. Bir merminin yörüngesi boşlukta dikey eksenli bir parabol çizebilir, ama havanın direnci bu ideal eğriyi değişikliğe uğratır. Bu değişikliğe sebep olan şartlar hem merminin hızına, hem de çapı, ağırlığı biçimi ile ilgili ve "balistik" adı verilen bir çeşit katsayıya bağlıdır. Öte yandan mermiyi kendi yörüngesine teğet tutmak için namlu içindeki yivler sayesinde merminin kendi ekseni etrafında dönmesi sağlanır. Bu, merminin ilk atış yüzeyine oranla sapma sakıncası doğurduğu gibi, mermiye yörüngesinde "devinme olayı" ve "üğrüm" adları verilen özel hareketler yaptırır.

1742 de İngiliz Robbins tarafından balistik sarkacın ortaya konulması sayesinde, mermilerin yörüngelerindeki hızları ölçülebilir hale gelmiştir. Balistik bilimine deneysel bir nitelik kazandırılmıştır.

1.3. Etki Balistiği

Tezimizin konusunu da içeren etki balistiği, mermilerin ve patlamayla hız kazanmış parçaların hedefte yaptığı etki ile ilgilenir. Genelde kriminal olaylar çerçevesinde değerlendirilen bir daldır.

Namluyu terk eden çekirdeğe etki eden etkenler:

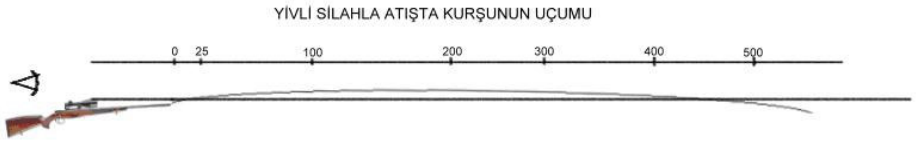
1.3.1. Yerçekimi

Kurşun namluyu terk ettiği andan itibaren her cisim gibi yer çekimi gücünün etkisine tabidir. Buna göre kurşun, tamamen yatay atış yapılan bir namludan çıktıktan sonra bir yay çizerek yere ulaştığı an ile aynı yükseklikten bırakılan tamamen aynı bir ayçiçek çekirdeği ile eş zamanda yere ulaşır. Kurşunun yatay olan süratinin, dikey olan bu serbest düşüşe hiç bir etkisi yoktur. Yatay hızlanma ve serbest düşüş birbirinden bağımsız etkenlerdir. Aynı fiziksel özelliklere sahip seri bir yivli tüfek mermisi ile yivsiz mermi veya sapan taşı, atıldıkları merkezden uzaklıkları farklı olmak üzere aynı anda yere düşerler.

1.3.2. Sürtünme

Namluyu terk eden çekirdeğe etki eden bir ikinci faktör de, havanın sürtünme etkisidir. Havanın sürtünmesi, çekirdek namludan çıktığı andan itibaren mermi hızını yavaşlatır. Kurşun yerçekimi dolayısı ile bir süre sonra yere düşeceğinden, amaç mümkün olduğunca uzağa düşmesidir. Bunun için tek çare hızın arttırılmasıdır. Günümüzdeki modern mermiler son derece hızlı olarak tasarlanmakta ve imal edilmektedir(ses hızının 2,5-3 katı).

Bu dış etkenlerin yanı sıra "ikincil etkenler" diyebileceğimiz, rüzgar, hava şartları, çekirdeğin ve namlunun fiziksel özellikleri de çekirdeğin namludan çıktıktan sonra farklı eğriler çizmesine sebep olur.



Şekil 1.2: Yivli silahla atışta merminin izlediği yol.

Söz konusu fiziksel kurallar ve etki etmenleri çerçevesince oluşturulan uçuş eğrileri namluyu terk eden çekirdeğin istenilen hedefle buluşmasını sağlayan, dolayısı ile göz çizgisi ile atış eğrisini buluşturan "sıfırlama ayarını" yapmamıza olanak sağlar. Şekilden de anlaşılacağı gibi sıfırlama ayarı yapılmış olan bir tüfeğin namlusunu terk eden çekirdek, tamamen yatay doğrultuda olan nişan hattını iki defa keser. Bu sabit noktaların bilinmesi ara mesafelerde çekirdeği istenilen hedef ile buluşturabilmek için ne kadar üst veya alt görmemiz gerektiğini ortaya koyar.

Mesafe olgusu, aynı şekilde hareket eden hedeflerin hareketine bağlı olarak oluşacak üçgen alan içersinde vermemiz gereken önlemenin oranını da belirleyen en önemli etkendir.

Günümüzde, balistik çalışmaların birçoğu askeri zırhlara karşı kurşun, füze... vb. mühimmatta, nükleer reaktörlerin koruyucu tabakalarına karşı kullanılan füzelerde veya jet motorundan patlamayla kopan parçacıkların metal tabakalara çarpmasına karşı yapılır. Kurşun, füze, şarapnellerin... uçakların yapısındaki ince alüminyum sac bloğuna çarpması üzerine yapılan çalışmalar henüz gelişmektedir. Bu konuda AGARD ve NATO bünyesinde çalışmalar bilinmektedir.

Bu çalışmalarda merminin etki kabiliyetini hedefte çentik oluşumu, çatlak oluşumu, delik oluşumu, büyük hasar verme, hedefin özelliklerinin bozulması şeklinde az tahribattan büyük tahribata doğru sıralamak, karşılaştırmada büyük kolaylıklar sağlamıştır. Ayrıca belli bir tehdide karşı kullanılacak metal zırhlarda, birden çok aday metal arasından seçim yaparken bir performans sıralaması yapmak son derece önemlidir. Bunu nicel olarak yapmanın yollarından biri de; aday metallerin "kalın destek konfigürasyonunda" balistik testlerini yapmak ve balistik etkinliklerini hesaplamaktır. Bu yolla hesaplanan balistik etkinlik değeri; zırh sistemine birim ağırlıkta metal ilave edilmesiyle, destek (backup) malzemesinden ağırlıkça elde edilen tasarrufun bir göstergesi olmaktadır. Bir başka deyişle balistik etkinlik,

metalin belli tipte bir mermiye karşı normalize edilmiş performansının sayısal ifadesidir. Nitekim literatürde bu yöntemin, değişik tipte metallerin farklı tehdit unsurlarına karşı balistik performanslarının değerlendirilmesinde sıkça kullanıldığı görülmektedir. Örneğin kalınlıkları 4 ile 14 mm arasında değişen alümina seramiklerde kalınlık azaldıkça seramiğin balistik etkinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde aynı tipte ve kalınlıktaki seramiklerde, mermi hızı arttıkça seramiğin hesaplanan balistik etkinliği daha yüksek çıkmıştır. Netice olarak ortaya çıkan; "kalın destek tekniği" ile bulunan balistik etkinliğin, metal plaka kalınlığı ve mermi hızı gibi iki parametre tarafından direkt olarak etkilendiğidir. Bu neticenin gerektirdiği ise, farklı kompozisyonlardaki metallerin balistik performanslarını kıyaslamak amacıyla yapılan balistik testlerin aynı kalınlıkta metaller üzerinde ve sabit mermi hızında yapılmasıdır. Bilimsel literatürde bu konuyla ilgili yapılan çalışmalarda maalesef bu hassasiyet görülmemektedir. Bu deney tekniğini ilerleyen bölümlerde “Depth of Penetration(DOP)” başlığı altında detaylı inceleyeceğiz.

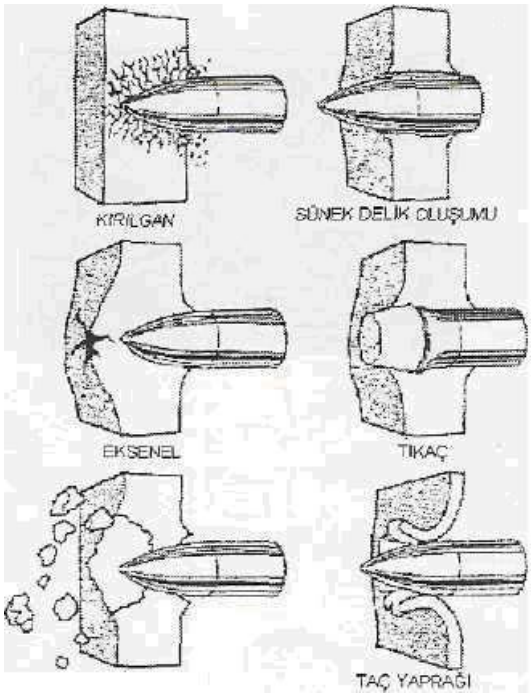
2. BALİSTİK DARBE OLUŞUMU VE KIRILMA MEKANİĞİ

Balistik darbe sonucunda mermi ve zırh malzemeleri için çeşitli tahribat biçimleri ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.1' de de gösterilen bu tahribat biçimleri, yüksek basma yükü altında kırılma, yansıyan şok dalgalarının birbirleri ile karşılaşmaları sonucunda oluşan çekme yükleri altında kırılma (spall fracture) veya kayma bantlarının oluşumu ile başlayan kesme (shear) şeklinde görülmektedir.

Özellikle sert metallerde, seramik ve kaya gibi malzemelerde yüksek basma yükü nedeni ile dinamik tahribat görülebilmektedir [6].

Zırh malzemelerinde balistik darbeye bağlı oluşan şok dalgaları katı içinde ilerler ve serbest yüzeylere ulaştığında geri yansır. Yansıyan şok dalgaları ile diğer dalgaların karşılaşması sırasında oluşan çekme gerilmeleri malzemenin çekme limitlerini aşabilir. Bu nedenle mikro seviyede çatlaklar oluşur ve sonuçta tehdit yönüne göre arka yüzeyden bir katman, koparak ayrılır. Özellikle seramiklerde görülen bu hasar oluşumu nedeni ile, arka yüzeyde başlayan tahribat tehdit yüzeyine doğru ilerler.

Tüm bu tahribat biçimlerinin varlığına rağmen, balistik malzemedeki tahribatın başlangıcı büyük ölçüde mikro seviyedeki malzeme hatalarına bağlıdır[6]. İlerleyen malzeme çatlakları kırılmalara neden olur ve malzemeden parçacık kopmaları başlar. Bu durum fragmantasyon olarak adlandırılır. Fragmantasyon miktarı; hem kütlesel olarak hem de yaratılan toplam yüzey alanı olarak, çarpışma hızı arttıkça artmaktadır. Bir başka deyişle, merminin kinetik enerjisi arttıkça moment transferi daha geniş bir metal hacmi üzerinden gerçekleşmektedir.



Şekil 2.1: Şematik olarak çeşitli tahribat biçimlerinin gösterimi[4].

Fragmantasyon miktarının çarpışma hızıyla monotonik bir ilişkisi olmasına rağmen metal plaka kalınlığıyla ilişkisi daha kompleks görünmektedir. Farklı malzeme kalınlıkları ve farklı mermi hızları için elde edilen fragmantasyon verileri birleştirilerek incelendiğinde ortaya çıkan manzara ilginçtir. Öyle görünmektedir ki; mermi hızı sabit tutulduğunda, metal kalınlığıyla önce artan fragmantasyon miktarı, giderek artan metal kalınlıklarında artış hızını kaybetmekte ve hatta azalmaya başlamaktadır. İlk başlarda kalınlıkla artan fragmantasyon miktarının, direkt olarak metal malzemenin kalınlığıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Zira, düşük kalınlıklarda metal plaka tamamen delinmekte olduğundan, artan kalınlık giderek artan bir metal hacminin delinmesi anlamını taşımaktadır ki bu da kaçınılmaz olarak daha fazla fragmantasyon demektir. Tamamen delinmeyecek kadar kalın metallerde, plaka kalınlığındaki artış giderek azalan fragmantasyon miktarlarıyla sonuçlanmaktadır. Bu davranış şekli ise metalin delinmeyen kısmının aksi takdirde zarar gören olacak kısma verdiği destekle ilişkilendirilmektedir. Çok kalın metallerde, metal tamamen delinmediğinden metali delme ihtimali bozulmamakta, bu yüzden de bir çatlak ağ yapısı oluşmasına rağmen çoğu parçacık momentum transferine katılamamaktadır. Metali delmeye karşı destek olarak anılan bu davranış

şekli de, doğal olarak parçacık kopmasını azaltıcı bir etki yapmaktadır. Bu iki uç davranış arasında, yani düşük kalınlıklardaki delme etkisinin belirleyici olduğu bölge ile büyük kalınlıklardaki delme etkisinin belirleyici olduğu bölge arasında ise, iki çatışan mekanizmanın dengelendiği bir geçiş bölgesi mevcuttur.

Parçacık kopması verileri istatistiksel açıdan da değerlendirilmiş, boyuta göre bütün kütle dağılımlarına bakıldığında, dağılımların homojen olmaktan çok uzak olduğu tesbit edilmiştir. Aslında bu, beklenen bir sonuçtur. Zira, çarpışma esnasındaki gerilme ve deformasyon hızlarının bölgesel dağılımı da homojen olmaktan çok uzaktır. Daha önce yapılan çalışmalar; deformasyon hızıyla kopan parçacık boyutu arasında ters orantılı bir ilişkinin varlığını göstermiştir. O halde her küçük boyut aralığındaki parçacıkların, yaklaşık olarak aynı deformasyon hızına maruz kaldığı varsayımı kabul edilebilirlik sınırları içindedir. Bu varsayımdan yola çıkarsak, yani her bir boyut aralığındaki parçacıkların istatistiksel olarak homojen dağılmış olduğunu varsayarsak, bütün olarak heterojen olan kopmanın aslında istatistiksel homojen dağılımların birleşmesiyle oluştuğu sonucuna varırız. Eğer durum buysa, kümülâtif parçacık kopması, Poisson karışım metoduyla teorik olarak temsil edilebilmelidir. Bu mantığın doğruluğu kontrol edilmiş ve istatistiksel olarak heterojen olan parçacık kopma datasının, Poisson karışım metoduyla oldukça hassas bir şekilde temsil edilebileceği gösterilmiştir.

2.1. Mermi Ucu Geometrisi

Gerek oksit gerekse non-oksit seramikler metallere göre çok daha gevrek olmalarına rağmen, yüksek basma mukavemeti ve sertlikleri nedeniyle balistik uygulamalarda önemli bir yer teşkil eder. Bunun yanında metallerin balistik uygulamalarda daha az kullanılması, uygulamaları ve geliştirilmesi bu konudaki araştırmaları daha önemli hale getirmiştir.

Değişik kalınlıktaki metallere değişik hızlarda yapılan atışlar, çarpışma sürecinde ardışık hasar mekanizmalarının anlaşılmasını belli bir noktaya kadar mümkün kılmıştır. Merminin metalle etkileşiminin ardından metal, mermiyi durdurmak için direnç uygular. Bunu da :

1. Mermi ucunu erozyona uğratarak ve deforme ederek kütleştirerek,

2. Dinamik çarpışma yükünü tabana doğru yayarak, merminin kinetik enerjisini absorbe edecek genişletilmiş bir alan üzerinden yapar.

Mermi ucunun deforme olması merminin delme kabiliyetini azaltmakta ve dolayısıyla balistik metal malzemesine daha az penetre olmaktadır. Bu olay, yani mermi ucu geometrisinin kütleştirilmesi, metalin balistik performansını arttıran etkenlerden birisidir. İkinci etken, dinamik yükün tabana yayılarak iletilmesi; hem mermi kinetik enerjisinin daha kolay absorbe edilmesini, hem de metal malzemesinde daha geniş bir bölgenin enerji absorbsiyonuna katılmasını sağlayarak metalin balistik performansını arttırır.

Çelik tabakalarının küt veya yarım daire uç geometrisine sahip mermilerle delinmesine ait sonuçlarla şu denklemlere bakalım:

$$E_p/(\sigma_u d^3) = (42.7/10.3)(H/d)^2 + (1/10.3)(s/d)(H/d) \quad \textbf{(2.1)}$$

Bu eşitlik SRI denklemi olarak bilinir. 1968 yılında Gwaltney tarafından geliştirilmiştir. İkinci bir denklem Jowett tarafından geliştirildi;

$$E_p/(\sigma_u d^3) = 1.4 * 10^9 (H/d)^{1.5}/\sigma_u \quad \textbf{(2.2)}$$

Üçüncü denklem;

$$E_p/(\sigma_u d^3) = 1.4(s/d)^{0.6}(H/d)^{1.5}/\sigma^{1.7} \quad \textbf{(2.3)}$$

En yakın zamana dayanan denklem Wen ve Jones tarafından geliştirilen denklem;

$$E_p/(K\sigma_a d^3) = (\pi/4)(H/d)^2 + A(s/d)^{\alpha}(H/d)^{\beta} \quad \textbf{(2.4)}$$

denklemidir. Burada A,α,β sabitlerdir. Bu sabitler yapılan deneyler sonucu belirlenir.

K = 2 ve $\sigma_a = \sigma_y$ (boyun verme dayanımı) alınırsa ve (1.4) eşitliğiyle deneysel sonuçlar bir araya getirilirse aşağıdaki eşitlik ortaya çıkar.

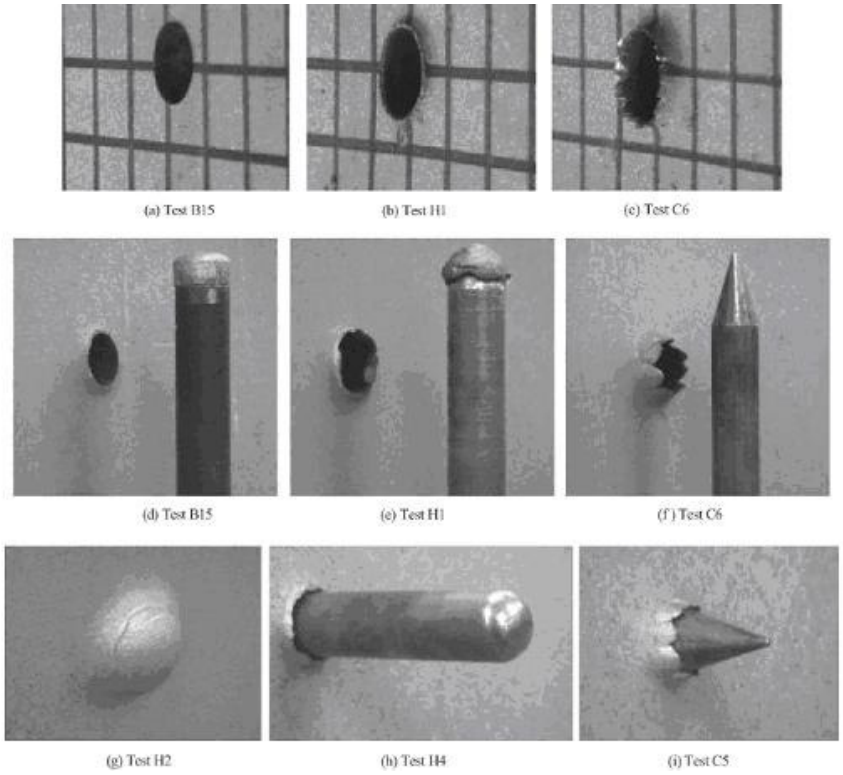
$$\frac{E_p}{\delta_u d^3} = \frac{2\delta_y}{\delta_u}\left[\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{d}\right)^2 + \left(\frac{s}{d}\right)^{0.21}\cdot\left(\frac{H}{d}\right)^{1.47}\right] \quad \textbf{(2.5)}$$

Mermi ucu geometrisi malzeme balistikliğini etkileyen bir özelliktir. Üç tip mermi ucu geometrisini kıyaslayarak bu olaya açıklık getirelim: Kaba, yarım daire, sivri mermi uçları.

Mermi ucunun geometrisi, hedef malzemenin tepkisini ciddi biçimde etkiler. Küt(kaba) mermi ucu, hedef malzemeden kendi uç geometrisinde bir parça(tıpaç) oluşturarak çıkar. Sivri uç geometrili mermi uçları ise; ince levha hedeflerde malzemeyi taç yaprağı gibi bir oluşumla delerek çıkarken kalın levha biçiminde hedef malzemelerde sünek deformasyon ile malzemeyi deler. Yarım daire şeklinde uç geometrisine sahip mermiler; hedef malzemeye ciddi hasar verdikten sonra gerilmeyle malzemeyi esnetip incelterek hedefi terkederler. Bu araştırmalar hedef malzemede kırılmanın anizotropi gösterdiğini kanıtlamıştır.

Şekil 2.2' de dijital fotoğraflama ve yüksek hızlı kameralardan faydalanılmıştır. Şekli detaylı açıklayacak olursak:

3 çeşit(küt, yarım daire, konik) mermi ucunun hedef malzemenin giriş ve çıkışında oluşturdukları yapı ve tahribat net olarak görülmektedir. Küt mermi ucu ve nispeten dairesel uçlu mermiler hedef malzemeyi parça kopartarak ve kopan parçaları önlerine katarak delerler. Sonuçta mermiden önce, malzemeden "tıpaç" diyebileceğimiz merminin çapında bir parça çıkar. Bu parça dairesel uca sahip mermilerle ateş edildiğinde daha incedir. Sebebi aşağıda da bahsedeceğimiz plastik deformasyonun da delinme esnasında oluşmasıdır. Konik uçlu mermilerde ise; oluşan yapı çok farklıdır. Mermi malzemeyi terkederken taç yaprağı şeklinde bir yapı oluşturarak malzemeyi deler(Şekil2.2-f). Bu oluşum, malzemenin delinmesi esnasında esnek gerilmelerle ve sünek şekil değişimiyle şişmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.2: 3 çeşit mermi ucuyla yapılan atışlar sonucunda hedeflerin giriş ve çıkışlarında oluşan tahribatlara ait fotoğraflar[10].

Küt mermi uçlarında, mermi hedef içinde ilerledikçe çevresini genişlettiği gözlenmiştir. Sebebi gevrek kırılmalarla kopan parçaların bir kısmının tıkaçla birleşirken bir kısmının da merminin çevresinde birikmesidir. Yarım daire ve konik uçlu mermilerin deldiği hedefte incelenen boşlukta ise esnek gerilme ve sünek kırılmalardan kaynaklanan, boşluk daralması gözlenmiştir.

Konik uçlu mermilerde enerjinin çoğu plastik deformasyona giderken(sünek kırılma eğrisi) küt mermi ucunda keskin ve dar plastik deformasyon(gevrek kırılma eğrisi) eğrileri görülür. Bu durum merminin önüne kattığı malzemenin yüksek hızla kopmasıyla ve önündeki malzemenin plastik deformasyonuna fırsat vermeden kopma işleminin gerçekleşmesiyle açıklanır. Ayrıca malzemenin yumuşamasında adiyabatik ve izotermal proseslerin de önemi büyüktür. Gerilme kritik bir değere ulaşınca hedefte kırılmalar başlar ve sonuçta tıpaç oluşur.

Mermi ucu sivrileştikçe hedef malzemenin plastik deformasyonla delinme özelliği artar, yani sivri uçlu mermilerde enerjinin çoğu plastik deformasyona harcanır.

Öncelikle mermi, malzemeye girerken etrafında bir şişkinlik ve hedefte incelme görülür. Sonuçta yoğun bir gerilme bölgesi oluşur ancak merminin hedefi keserek ilerlediği görülmez. Bununla birlikte hasar gelişimi ilerledikçe, malzemede gerilme bölgesinin sebep olduğu boyun verme görülür. Her malzemenin dayanabileceği bir gerilme üst sınırı vardır. Hedef malzeme bu noktayı aşınca hedeften dışarı tıpaç atılır. Tıpaçın et kalınlığı ve çapı merminin uç geometrisine bağlıdır. Bu durum hedefin plastik deformasyonuyla ters, gevrek kırılmaya bağlı parça koparılmasıyla doğru orantılıdır.

İnce sac veya metallerde konik uçlu mermiler küt uçlu mermilere göre daha etkilidir. İnce malzemelerde tıpaç oluşumu ve ilerlemesi, malzemenin inceliğinden dolayı çok kısa denecek kadar azdır. Bu sebeple malzemenin delinerek geçilmesi önemli hal alır.

Akma eğrileri, merminin hedefi delmesi esnasındaki plastik deformasyonu görmemizi sağlar. Küt mermi ucu için, bu eğriler keskin bir eğri çizerler. Mermi hedefe çarptığı anda, malzeme yüzeyinde yoğun çarpılmalar gözlenir. Mermi hedef içinde hareket ettikçe akma kuvveti eğrileriyle merminin hedef üzerindeki gevrek kırılma izleri ve buna bağlı olarak parça koparılmasına ait kesme kuvvetleri takip edilebilir. Buna ek olarak sınırlı büyüklükte eğilme kuvvetleri de görülür. Merminin arka çeper çevresinde gerçekleşen malzeme deformasyonunda da akma eğrileri esnek bir yapı gösterir. Malzemenin şişmesi bu durumun ispatıdır.

Yarım daire uç geometrili mermi kullanıldığında merminin hedefe ilk nüfuziyeti sırasında uç geometrisine bağlı olarak malzeme şişmesi görülür. Fakat bu durum hızla aşılır ve mermi hedefe girdikçe önündeki malzemeyi esneterek büker ve akma eğrilerine paralel hareket eder. Bu durum boyun vermeye kadar sürer.

Konik uç geometrili mermilerde; merminin hedefe ilk çarpması esnasında hedefin şişmesi göz ardı edilemeyecek kadar önemlidir.

Küt mermilerde yüksek hızlarda, mermi hasar görür hatta kırılır. Tıpaç oluşumu görülür. Yarım dairesel mermilerde sınırlı plastik deformasyon yüksek hızla birlikte görülür. Tıpaç oluşumu daha dardır ve çapı azdır. Konik uçlu mermilerde ise mermi deformasyonu hıza bağlı değildir çünkü süreklidir. Tıpaç oluşumu yoktur. Malzeme sadece merminin etkisiyle delinir.

Mermi hızı arttıkça merminin hedefe verdiği hasar azalır. Konik mermi ucu en fazla hasar veren tiptir.

Enerjinin korunumu ilkesine dayanarak merminin sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmı hedefe hasar vermek için, bir kısmı plastik deformasyon için, kalan kısmı ise mermi deformasyonu için harcanır. Enerjinin dağılımı mermi ucu şekline, merminin gördüğü plastik zorlanma ve deformasyona ve değişen kuvvetlere bağlıdır. Sürtünme kuvvetleri küt mermi uçları için ihmal edilirken dairesel ve konik uçlarda küçük bir katsayıyla çarpılarak hesaba katılır. Sebebi, bu tip mermilerin hedefle sürekli temas halinde olmaları ve tıpaç oluşumunun görülmemesidir.

Mermi ucu geometrisinin balistiklik üzerine etkilerini maddeler halinde özetleyecek olursak:

1. Hedef malzemenin balistik hız limiti merminin uç geometrisinden doğrudan etkilenir. Bu değer yarım daire ve konik uç geometrilerine sahip mermilerde 300 m/s iken, küt mermi uçları için 185 m/s ye kadar düşer.

2. Artık hız eğrileri mermi ucu geometrisinden etkilenir. Küt ve yarım daire şeklindeki mermi uçlarında mermi hızı arttıkça artık hız değerleri birbirine yaklaşır. Diğer taraftan konik mermi ucunda ise çarpma hızı arttıkça bu değer diğer iki mermi ucunu aşar.

3. Küt uçlu mermilerde hedef malzeme mermiye en az direnç gösterirken yarım dairesel ve konik uçlu mermiler sırayla bunu takip eder.

4. Enerjinin soğurulmasına bağlı olarak merminin hedefte bıraktığı tahribat konik uçlu mermilerde en fazla, küt uçlu mermilerde en azdır.

5. Artık hız eğrileri mermi deformasyonuyla ilişkilendirilebilir. Küt mermi uçları artan çarpışma hızına bağlı olarak doğrusal bir deformasyon grafiği çizerler. Konik mermi uçları ise artan çarpışma hızıyla büyük hasar görür. Yüksek çarpışma hızlarında konik mermi uçları hedefi delmek için daha az enerjiye ihtiyaç duyarlar. Düşük çarpışma hızlarında ise küt mermi ucu daha az enerji tüketir.

3. ÖLÇÜM METODLARI

Malzemelere yabancı nesnelerin çarpması hıza bağlı olarak sınıflandırılabilir. Düşük hızlarda çarpma; ortalama 1 m/s hızla gerçekleşir. Örneğin takımın malzemeye çarpması. Ortalama hızlarda çarpma; 10 ile 100 m/s hızlar arasında gerçekleşir. Örnek olarak bir uçağa havadaki parçacıkların çarpması gösterilebilir ve son olarak yüksek hızda çarma; 100 ile 1000 m/s aralığında gerçekleşir.

Düşük hızlarda çarpma deneyleri laboratuvar ortamında yapılabilir. Malzeme üzerine ağır cisim yüksekten bırakılarak yapılır. Düşen cismin ağırlığı ve bırakıldığı yükseklik bellidir. Böyle düşük hızlarda çarpma testlerine ait datalar sisteme eklenen bir kuvvet dönüştürücü ile kolaylıkla toplanır.

Orta hızlardaki çarpma deneylerinde gerekli ve yeterli çarpma hızı bir basınçlı tabanca ile sağlanır. Hafif bir mermi, basınçlı hava ile namludan fırlatılır. Mermi hızı hava basıncı ile ayarlanır. Ölçme işlemleri düşük hız deneylerindekine benzer bir sistemle elde edilebilir. Ancak mermi hızı arttıkça bu ölçüm ve hesaplamalar zorlaşmaya başlar.

Balistik çarpmalar yüksek hızlarda çarpışmanın özel bir adıdır. Bu standartlara ulaşan hızlar ancak barutlu bir silah ile sağlanır. Barutlu bir silahın çalışma prensibi az önce bahsettiğimiz basınçlı tabancanın çalışma prensibinin aynısıdır. Merminin havada serbest uçuşu ve bu hareketin yüksek hızlarda gerçekleşmesi balistik deneylerin yapılmasını ve verilerin toplanmasını daha karmaşık hale sokar.

Orta ve yüksek mermi hızlarında balistik malzemenin mermiye verdiği tepki çok önemsenir. Bununla birlikte bir araştırmacı merminin hızını, yer değiştirmesini, kuvvet ve enerjisini malzemeyi delmesi esnasında bilmek isteyecektir. Fakat kısa bir zaman öncesine kadar merminin delme hızı Vs, ve artık hızı Vr nin ölçüm verileri, delme işleminden sadece önce ve sonra rahatlıkla toplanabiliyordu.

Bugünkü ölçüm yöntemlerinin amacı; delme işlemi boyunca anlık veya sürekli veri alabilmektir. Bu bölümde balistik tahribat deneylerindeki verileri ölçmek ve toplamak için kullanılan yöntemlerden bahsedeceğiz.

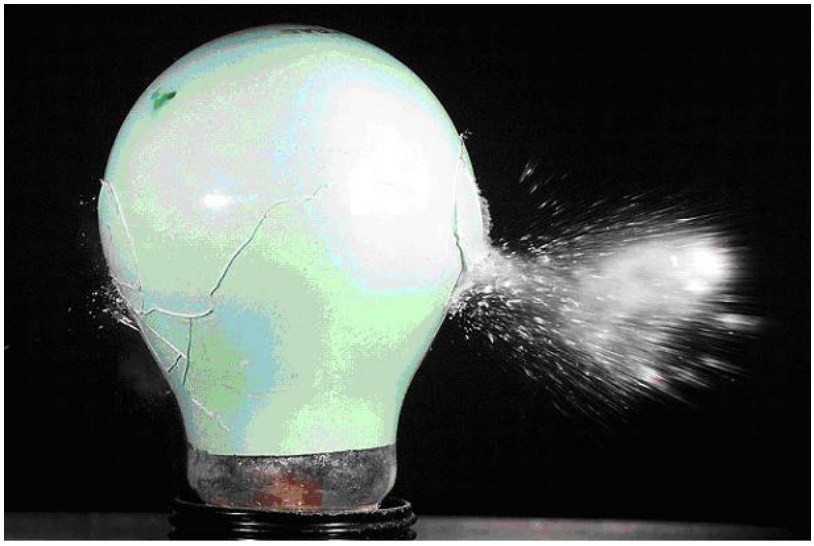
3.1. Anlık Ölçüm Yöntemleri

Anlık Ölçüm Yöntemleri, merminin hareketini kesitlere bölerek inceleyen yöntemlerdir. Merminin hareketi sürekli takip edilemez. Yüksek hızda fotoğraflama, kronograf, optik sensörlerle ölçme yöntemleri ve mikro-hızlı sensörler anlık ölçme yöntemleridir. Şimdi bu yöntemleri inceleyelim:

3.1.1. Yüksek Hızda Fotoğraflama

Zamanı fotoğraf karelerine bölecek kadar hızlıdır. Bu işlemin kalitesi saniyede çektiği resimle ölçülür. Günümüzde kullanılan fotoğraf makinelerinde bu değer 1/500 saniyeyle başlar.

Genellikle kamera ya da fotoğraf makinası mermiyle senkronize olarak hareket ettirilir, böylece fotoğrafın bulanık çekilmesi önlenir. Şekil 3.1' de bir ampulün içinden merminin geçmesi anındaki fotoğraf karelerinden birini görmekteyiz.



Şekil 3.1: Ampulün içinden geçen merminin fotoğraflanması.

Fotoğraf çekmek için gerekli maksimum zaman:

T= L/ (500*V) saniyedir. **(3.1)**

Örneğin, L=50 m, V=350m/s ise T= 50/(500*350) yani saniyede en az 3500 fotoğraf çekilmelidir.

Diğer bir period ölçümünde, resmin bulanıklığı en fazla ne kadar olmalıdır? sorusu baz alınır. Buna göre;

$$T = \frac{\text{Mermideki istenen en küçük detayın büyüklüğü}}{K^* \text{ Merminin hızı } * \cos A} \quad \textbf{(3.2)}$$

Örneğin 100 fps gibi düşük bir hıza sahip tüfek mermisi için 1/200 inch' lik bir detayda fotoğraf kalitesi isteniyorsa 4 mikrosaniyelik (1/250000 s) hızlı bir çekim gerekmektedir.

Yüksek hızlı fotoğraf çekmede objektif kapağının kullanılması faydalıdır. Bu kapak manyeto-optik, elektro-optik veya elektronik olabilir.

3.1.1.1. Manyeto-Optik Objektif

Faraday kanunundan faydalanılır. Manyetik alandan geçen, kutuplaşan ışık yüzeyinin dönmesi esasına dayanır. Bu işlem için kutuplanma bölgesine manyetik bobin yerleştirilir. Bir manyetik alandaki kutuplanma yüzeyinin dönmesini göstermek için kristal cam kullanılır. Bobine akım verilince(1000 Amper veya 10000 Volt kadar) kutuplanma ve dönme başlar. 1 mikrosaniyenin altında fotoğraf çekme hızı sağlanır.

3.1.1.2. Elektro-Optik Objektif

Tipik bir elektro-optik objektif; içinde elektrodlar, nitrobenzenle doldurulmuş ve 2 polarizer arasına yerleştirilmiş cam bir hücreden oluşur. Eğer tabakalar arasına uygun voltaj uygulanırsa(20000 Volt) kutuplanmalar arasındaki faz değişikliği farklı hızlar oluşturur. Böylece fotoğraf çekme aralığı(1/200000000 saniye) çok hızlanır.

3.1.1.3. Elektronik Görüntü Tipleri

Metaller uygun bir elektriksel alanda, ışığa maruz kalınca elektron yayarlar. Ayrıca bazı metaller de elektronla bombardıman edilnce ışık yayarlar(televizyon ekranı gibi). Bunların bir tüp içinde birleştirilmesine görüntü dönüşümü denir. Foto-katod ışığı alır, ekran da ışığı yayar. Bir lens ile foto-katoda görüntü sabitlenir. Uygun elektrik ve manyetik akımlarla ekrana görüntü yansıtılır ve kamera aracılığıyla görüntüler izlenir. Tüpe hiç voltaj uygulanmazsa görüntü de oluşmaz. Uygulanan voltaj genellikle 6000-25000 volt aralığındadır. Fotoğraf çekme hızı bir nanosaniyeye kadar düşer.

3.1.1.4. Flaş Çekme

Bu işlem sadece ışığın yetersiz olduğu ortamlarda değil, yüksek hızlı fotoğraflamada mermiyi kaçırmamak için de kullanılır.

Flaşın oluşturulmasında aralarından 15000-60000 voltaj gerilimde akım geçirilen ince metal teller kullanılır. Böylece kıvılcım oluşturulur ve flaş patlar.

3.1.1.5. Stroboskobik Görüntüleme

Stroboskobik fotoğraflama; çoklu flaş patlatma yöntemiyle fotoğraf çeker. Mermilerde kullanılan yöntemdir. Modern yöntemde zaman integraliyle ışığın parçalar halinde ele alınması ile flaş patlatma yöntemi kullanılır.

Yöntemin sakıncaları vardır:

1. Flaş tüpü çok ısınır,

2. Tüp deiyonize olamaz ve flaş tüpten düşük akım geçebilir. Flaş patlamaz.

Bu nedenle quartz tüplerin kullanımı cam tüplerden daha uygundur. Çünkü erime noktaları daha yüksektir.

Sıradan bir elektronik flaş aletinin kapasitörüne civa tüpünü seri bağlarsak makina kapatıldıktan sonra civa tüpü çabucak deiyonize olur ve daha önceki sorunlar aşılmış olur.

Stroboskobik fotoğraflama görüntüyü dondurarak fotoğrafını çeker, bu da görüntünün bulanık çıkma ihtimalini yok eder.

3.1.2. Balistik Kronograf

Ölçme yöntemleri içinde optik sensör ve kronograf en çok kullanılanlarıdır. Bu ölçme yöntemleriyle mermi hızı, aralarındaki uzaklık bilinen iki sensör arasından mermi kaç saniyede geçti? sorusuna cevap olarak sensörlerin arasındaki mesafe geçen zamana bölünerek hesaplanır.

Balistik kronograf, bir merminin hızını ölçmeye ve bunu insanın okuyabileceği bilgiye dönüştürmeye yarar.

Merminin geçişiyle kronograf üzerindeki sensörler tetiklenir ve son işlem olarak tüm sensörlerden gelen bilgileri matematiksel olarak yorumlar, mermi hızını hesaplar.

Balistik kronograf dizayn edilirken ilk olarak uygun bir mikroişlemci seçilmelidir. Bu karar merminin yerini belirleyecek minimum saat çevrimine göre ayarlanır. Amaç olabildiğince kolay ve ucuz bir dizayndır. İkinci aşamada merminin yerini, onun hareketine zarar vermeden nasıl belirleyebiliriz, nasıl bir sensör kullanmalıyız ki hareket etkilenmesin sorusunun cevabı aranır. Üçüncü aşamada testler yapılır. Testler merminin hızını ölçmeyi de içerir.

Kronografın üzerinde 2 sensör vardır, merminin iki sensör arasından kaç saniyede geçtiğini hesaplamaya yararlar. Kronograf, üzerine yerleştirilen bir ışıkla veya güneş ışığında merminin gölgesini takip ederek ölçüm alır. Ardından elektronik olarak zaman m/s veya ft/s ye çevrilir.

Mermiyi kızılötesi ışınlarla da takip edebiliriz. Mermi kronograftan çıkan 2 kızılötesi ışın arasından kaç saniyede geçer. Merminin hızı arttıkça hata oranı da artar.

3.1.3. Optik Sensörler

İnterferometrik veya fiber optik yöntemlerle merminin hızını ölçen alettir. Kullanılan sensörler; LEDs, ışını dışarı veren diyotlar, lazer ışınları ve ince tellerdir.

Optik sensör, merminin varış hızını optik yollarla belirler. Bu sensör; içinde 2 yansıtıcı tabaka bulunan sandviç şeklinde şeffaf tabaka içerir. Sandviç, 2 opak tabaka içinde dönmektedir. Optik sensör, içinde herbiri kendi alanında yerleştirilmiş birçok sensörden oluşur. Merminin izlenmesinde en az 2 tane paralel olmayan optik sensör kullanılmalıdır. İlk sensör merminin ana hareketini takip ederken, ikinci sensör mermi hızındaki azalmayı takip eder. Optik sensörlerin avantajları:

1. Daha büyük hassasiyet,
2. Elektriksel etkilenmeme,
3. Elektromanyetik etkiden korunma,
4. Geniş dinamik etki.

3.1.3.1. Optik Dedektör

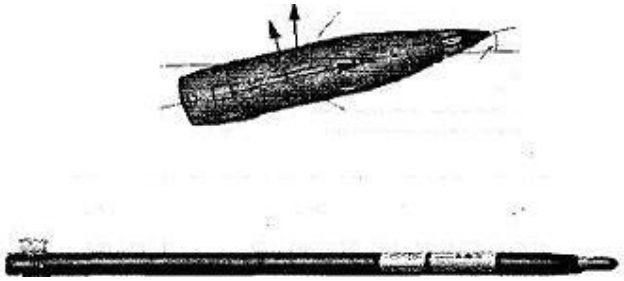
Anlık ışığı elektrik sinyaline çevirir, böylece mermi bilgilerini toplamamız mümkün olur.

Optik sensörün çalışmasını kontrol etmek önemlidir. Bir yol, elektrik sinyallerini optik dedektörün çıktı sinyalleriyle örtüştürmektir. Sonuca göre gerekirse kalibrasyon işlemi yapılır.

3.1.4. Mikro-Hızlı Sensörler

Diğer bir anlık ölçme yöntemi içerik olarak optik sensöre benzeyen mikro-hızlı sensörlerdir. Bu sensörlerin çalışma prensibi; bir mıknatıs veya manyetin- mermi olacak- ortamdan geçmesi esnasında bir bobinde yaratılan anlık akıma dayanır. Örneğin Zee ve arkadaşları [1] tarafından kullanılan sensörde 2,5 mm aralıklarla 11 bobin kullanılmış. Bu sensörle, kullanılan merminin arka tarafına bir mıknatıs yerleştirilmiş. Bu sayede delme ve nüfuz etme esnasında mermi, üzerindeki mıknatıs bobinlerin içinde sinyaller üretir. Manyetik akı her bobinde başarıyla sonuçlar verir. Bu sinyaller bir osiloskoba gönderilir. Zaman-yer değiştirme verileri toplanmış olur. Ölçüm sayısı sensörlerin içindeki bobinlerin sayısıyla sınırlıdır. Nurick ise [2] zorlamaya maruz kalan hasar-zaman ölçümlerini “voltaja dayalı diodlarla” fotoğraflayarak takip etmiş. Bu ölçüm yönteminin hassasiyeti diod sensörlerinin

sayısına ve aralarındaki boşluğa bağlıdır.



Şekil 3.2: Mikro-hızlı sensörler[2].

Balistik malzeme üzerindeki tahribatı belirlemek için bu testlerden sonra zırh plaka arkasında oluşan maksimum deformasyon miktarı için özel macun kullanılabilir. Macun, hedef malzemeye yapıştırılır ve kuruması için beklenir. Ardından malzemeden çıkarılır, macun malzemenin birebir şeklini aldığı için derinlik, nüfuziyet ölçümleri macun üzerinden yapılır.

Anlık ya da ayrık ölçme yöntemlerinin en büyük dezavantajı ölçümleri belirli bir aralıkta-sensörlerin yerleştirildiği aralık- ve anlık hız ölçümleriyle yapmasıdır. Ayrıca yüksek hızlı fotoğraflama yöntemi oldukça pahalıdır.

3.2. Sürekli Ölçüm Yöntemleri

Bu bölümde diğer bir grup ölçüm yöntemleri olan devamlı- sürekli- ölçüm yöntemlerinden bahsedelim.

3.2.1. Lazer İnterferometreleri

Einstein'ın gravitasyon kuramının temeli, 19. Yüzyıl Alman matematikçileri Gauss ve Riemann' ın geliştirmiş olduğu geometriye *(Riemann geometrisi)* çok bağlıdır.

Gravitasyonel dalgalar, elektromanyetik dalgalar gibi kaynağı oluşturan atom ve elektronların hareketinden dolayı değil, kaynağın bütün halinde (düzgün olmayan) hareketinden doğar. Dolayısıyla gravitasyonel dalgalar, elektromanyetik dalgalardan değişik olarak kaynağın izlerini de taşır. Buna örnek olarak karadeliklerin iyi bir gravitasyonel dalga yayıcı oldukları bilinmektedir. Gökada merkezlerinde kütleleri

çok fazla (binlerce güneş kütlesine sahip) olan karadelikler olduğu gibi, gökadalarda dağınık şekilde bulunduğu bilinen pek çok (birkaç güneş kütleli) karadelikler de bulunmaktadır. Gravitasyonel dalga, bu yıldızların değişik özelliklerinin de ortaya çıkarılmasında ve izlenmesinde çok önemli rol oynayacaktır. Diğer taraftan elektromanyetik ışıma (kozmik mikrodalga fon ışıması) ve çekirdek fiziği sayesinde Büyük Patlama Modeli çerçevesinde evrenin ilk 3 dakikasından sonrasının nasıl geliştiğini anlayabiliyoruz. Eğer ölçebilirsek, gravitasyonel dalgalarla, evrenin ilk şişme anına (10^{-24}sn) kadar olan kısmını da anlayabileceğiz.

3.2.1.1. Giriş

Gravitasyonel dalga gözlemleri Weber'den (1960) bugüne kadar pek çok deney grubunun ilgisini çekmiştir. Dar bir frekans aralığında çalışan çubuk şeklindeki alüminyum antenlerle yapılan deneyler, hiç bir zaman istenilen hassaslığa ulaşamadı. Bunun nedeni, gravitasyonel etkileşmenin çok zayıf olmasıdır. Kıyaslamak gerekirse, elektromanyetik ve gravitasyonel etkiler arasındaki oran 10^{40} civarındadır. Bundan dolayı, örneğin iki elektron arasındaki etkileşim ele alındığında gravitasyonel etki ihmal edilebilir. Bu nedenle, teknolojinin de gelişmesi ile birlikte gravitasyonel dalga gözlemi için gereken hassaslıkta yeni antenler geliştirildi. Bunlar L tipi lazer antenleridir (lazer interferometreleri). Aslında bu tip antenler yeni değildir. İlk olarak Michelson Morley (1887) tarafından, ışığın farklı yönlerde hızının aynı olup olmadığını anlamak amacıyla kullanılan bu düzeneği, bugün gravitasyonel dalga anteni olarak kullanan pek çok gözlem grubu bulunmaktadır. Bunlar LIGO (ABD'de iki yerde, Livingston (LA) ve Hanford (WA)), GEO600 (İngiliz-Alman ortak, Hanover'de), TAMA300 (Japonya, Tokyo'da) gözlem gruplarıdır[16].

3.2.1.2. Sistemin Çalışma Prensibi

L tipi antenlerde(lazer interferometreleri), L'nin iki kolunda (uzun vakum tüplerde), köşeden her ikiside ℓ kadar uzaklıkta olan ve boşlukta serbestçe sallanan aynalar bulunmaktadır. Köşede ise, lazer ışığını iki kola yansıtan ayırıcı bulunmaktadır. Gravitasyonel dalga, bir ortamdan geçerken zayıf da olsa her tür maddeyi etkiler ve cisimler arası uzaklıkları değiştirir. Bu çok küçük bir etkidir. Eğer bir şekilde h, gravitasyonun (birimsiz) etkisini gösteriyorsa, ayna uzaklıklarında ölçülecek

büyüklük $\Delta\ell=h\ell$' dir. Lazer ışınları ile bu uzaklık ölçülebilir. Hangi kaynaktan geldiğine bağlı olarak h'nin sayısal değeri farklıdır. Dolayısıyla ölçülecek olan ayna uzaklık farkları $\Delta\ell$, gravitasyonel dalga kaynağını belirleyecektir. Bu sayede konumuzda geçtiği gibi merminin anlık konumu ve bu sayede anlık hareketleri takip edilebilecektir. İnterferometrik yöntemde merminin uzunluğu, uluslararası kabul edilen dalga boyu standartları ile direkt karşılaştırılarak tespit edilir. Bu işlem uzunluk değerinin, SI birimi metrenin tanımında belirtildiği şekilde BIPM tarafından yayınlanan rehber dökümanda uygun görülen oluşturma yöntemini kullanarak ölçülmesini sağlar. İnterferometrik yöntemle, mermi boyunca geçirilen lazerin dalga boyları sayılarak ve küsürat kısımları interpolasyona tabi tutularak, metre mertebelerinden nanometre mertebelerine kadar geniş bir ölçme aralığında çok hassas bir şekilde ölçüm yapılabilir. Şöyle ki:

İki lazer ışınının kesiştirilmesiyle küçük, elipsoidal ölçüm hacmi oluşur. Işınlar kesiştiği zaman köşe oluştururlar. Mermi bu köşelerin içinden geçtiğinde farklı ışık kuvvetleri oluşur ve etrafa dağılır. Ardından ışık kuvvetlerindeki farklar bir fotodedektör ile anlamlandırılır ve veriler hız-zaman grafiği şeklinde toplanır.

3.2.1.3. Lazer İnterferometreleri Kalibrasyonu

İzlenebilirliğin sağlanabilmesi için Laser interferometrelerinin kalibrasyonlarının yapılması gerekir. Bu amaçla, laser interferometrenin ışık kaynağından çıkan ışın demeti ile, primer metre standardı UME referans laserin (iodine ile kararlı hale getirilmiş) ışını üst üste çakıştırılır. Üst üste çakıştırılan ışınlar arasındaki frekans farkı (fotodiyod çıkışında beat sinyali olarak görünen) opto-elektronik cihazlarla ölçülür. Bu şekilde, kalibrasyonu yapılan laserin frekans değeri (diğer bir değişle dalga boyu) tesbit edilmiş olur. Lazer kaynağının kalibrasyona ek olarak, havanın kırılma indisini hesaplayan kompanzasyon ünitesinin de (sıcaklık sensörleri, nem sensörleri ve basınç sensörleri) kalibrasyonu yapılmaktadır.

3.2.1.4. Lazer İnterferometreleri Kullanım Alanları

Laser interferometreleri endüstride çok geniş uygulama alanlarında kullanılır:

1. Açı ölçümleri,

2. Yüzey pürüzlülüğü ve nanometroloji,

3. Form ve geometrik standart ölçümleri,

4. Üç boyutlu ölçümler,

5. Topografik ve endüstriyel ölçümler,

6. CMM ölçme cihazlarının ve CNC tezgahların kalibrasyonunda, çeşitli büyüklükte uzunluk ölçümlerinde bu cihazlardan faydalanılmaktadır.

Tekrarlanabilir form hatalarına sahip bir ölçme sistemi, form parametrelerinin yüksek doğrulukta bulunabilmesi için kullanılabilir. Bu işlem hata ayırma tekniği (diğer bir değişle reversal teknik) yardımıyla veya yerçekimi yönü (plumb line) gibi fiziksel bir referans ile veya lazer ışığının doğrusal özelliğini(interferometrik yöntem) kullanarak yapılır.

Doğrusallık ve diklik ölçümleri reversal teknik ile CMM cihazı ile ölçülmektedir. Ölçüm verileri CMM cihazından alınıp yazılım şirketi tarafından geliştirilen yazılıma aktarılmaktadır. CMM cihazından gelen hata ayrılarak sadece standardın doğrusallık ve diklik hataları (veya ikisi birden) belirlenmektedir.

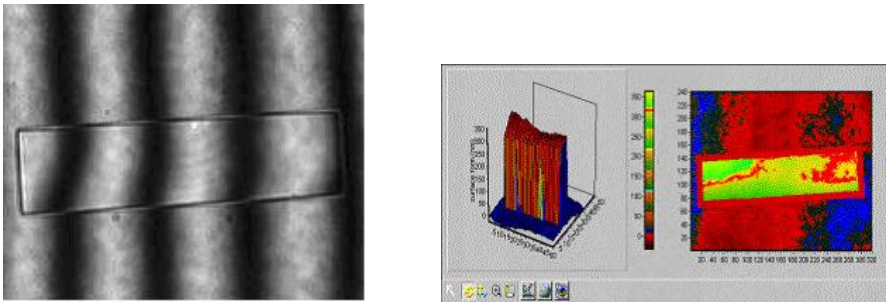
Küçük çaplar için düzlemsellik ölçümleri genellikle optik camların yüzeyleri için yapılan ölçümlerdir.

Yüzeyden yansıyan ışınların oluşturduğu girişim çizgileri CCD kamera üzerine aktarılmakta, faz kaydırma tekniği ve görüntü işleme teknikleri ile ölçüm gerçekleştirilmektedir. Birkaç metreye kadar olan masaların düzlemsellik ölçümleri elektronik düzeç ve bu amaç için geliştirilmiş yazılım ile yapılmaktadır.

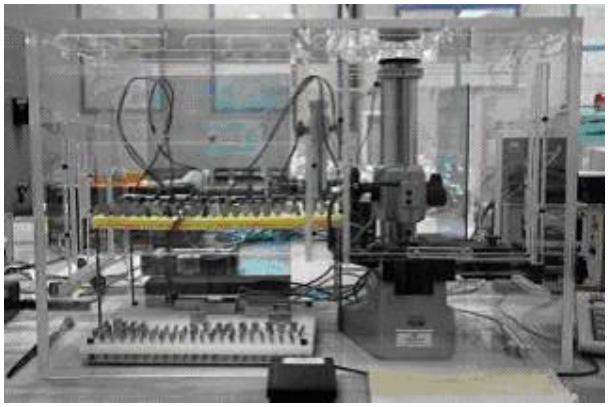
Örneğin UME(Ulusal Metroloji Enstitüsü)'de[19], yüksek doğruluk sınıfına ait (K veya 00) mastar bloklarının kalibrasyonları interferometrik yöntemle yapılmaktadır. 300mm'ye kadar uzunluğa sahip mastar bloklarının kalibrasyonlarında Şekil 3.3' te görülen otomatik ölçüm yapan mastar bloğu interferometresi kullanılmaktadır. Bu cihaz kararlı frekansa sahip iki adet He-Ne lazerin yüksek doğrulukla bilinen dalga boylarını kullanarak ölçüm yapmaktadır.



Şekil 3.3: Mastar bloğu lazer interferometresi[24].



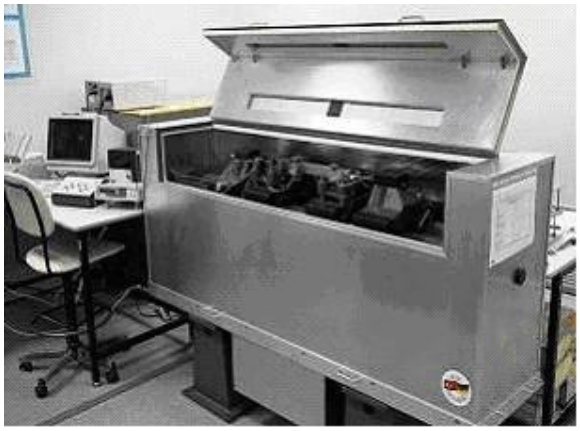
Şekil 3.4: Mastar Bloğu interferometrik ölçümü[23].



Şekil 3.5: Kısa mastar bloğu komparatörü[25].

300 ile 1000 mm arası uzunluğa sahip mastar bloklarının kalibrasyonları, yüksek doğruluğa sahip uzun mastar bloğu komparatörü ile yapılmaktadır (Şekil 3.6).

UME'de daha düşük sınıflardaki mastarların kalibrasyonu için mekanik kısa mastar bloğu komparatörleri kullanılmaktadır (Şekil 3.5).



Şekil 3.6: 1m' lik mastar bloğu komparatörü[23].

3.2.2. Kuvvet Ölçer ve İvme Ölçerler

Şok çarpma deneylerinden dataları elde edebilmek için bir seri teknolojik gelişmelerden geçildi. Bunlardan biri de kuvvetölçer veya yerine göre ivmeölçerlerdir.

Ölçümler mermi üzerine iliştirilen bir yükleme hücresi kuvvetölçer veya ivmeölçer ile yapılır. Mermi, namludan hareket edince sarılı tel de açılmaya başlar. Sistem, zamana bağlı kuvvet ya da ivme verilerini toplamaya elverişlidir. Bu yöntem kullanılınca mermiden kaynaklanan doğal frekanslar, veri toplanırken çıkarılmalıdır. Deney esnasında ölçüm aleti yük girdilerini görür ve çıktılar osiloskoba gönderilir. Ölçüm aleti; ince bir kablo ile osiloskoba bağlanır. Osiloskop; elektriksel çıktıları toplamaya yarar. Bu sayede gerilime orantılı olarak voltaj ölçülür. Hemen yan tarafında akımölçer yerleştirilir ve sonuçlar toplanır. Bu şekilde gerilmenin türevi ölçülür ve gerilme sinyalini elde etmek için zamanın integrali kullanılır.

Yöntemin en büyük dezavantajı hız limitinin 50 m/s civarında olmasıdır. Bu hızın üzerine çıkılınca tel kopar ve sinyal kaybı oluşur. Ek olarak iliştirilen ivmeölçer veya kuvvetölçer ile merminin ağırlığı çok daha fazla olur. İyi bir ölçüm aleti şu özellikleri sağlamalıdır.

1. Basınca karşı yüksek hassasiyet,

2. Sıcaklığa karşı düşük hassasiyet,

3. Zamanla değişmeyen sabit direnç,

4. Üretim tekniklerine ve malzemelerin bileşimine karşı düşük hassasiyet,

5. Basınca karşı doğrusal cevap verme,

6. Faz değişimlerinin çalışma sırasında görülmemesi.

Birçok laboratuvar bu ölçüm aletlerinin yerine interferometre kullanarak hedefin yüzey hızını ölçerler. Hız değerleri anlık şoklarla ilişkilendirilir ve gerilme- zaman diyagramı elde edilir. Burada en çok kullanılan hız interferometreleridir. Gerekli olan şey, yansıtıcı bir arka yüzeyin malzemeye birleştirilmesi ve böylece hasar gören üst yüzeydeki deformasyonların ölçülebilmesidir.

İnterferometrelerin strengeçlere üstünlükleri:

1. Strengeçler tek noktadan bakış açısıyla data verirler,

2. Metale yerleştirilmeleriyle o bölgede lokal gerilmelere sebep olabilirler ve malzeme hassaslaşır.

3.2.3. Hız İnterferometreleri

Mermi hızı ölçümlerinde bilindik hız interferometrelerinin(tek noktadan ölçüm alırlar) kullanımı yeterlidir. Hedefin yer değiştirme hareketini takip edebilmek içinse çoklu noktadan ölçüm alan interferometrelerin kullanımı gereklidir. Hedefin içinde gerçekleşen hareketlerin takibinde yansıma önemlidir. Bu nedenle uygulamalarda hedefin arka yüzeyine yansıtma özelliğini arttırıcı ince bir polyester film, örneğin "mylar" sacı yapıştırılır. Bunun da üzerine Al. buharı yoğunlaştırılır.

Mylar; iki boyutlu, etilen glikol ve dimetil- tereftalat' tan yapılmış termoplastik bir filmdir. 1950 li yıllarda DuPont tarafından geliştirilen "Mylar" düz zeminli metallerin kaplanması için en çok kullanılan malzemeler arasında yerini aldı:

1. Dayanıklı, rijit, parlak ve pürüzsüz yapısı,
2. Kolay dönüştürülebilir(katlanabilir, çıkarılabilir, kabartılabilir, zımbalanabilir, boyanabilir...)olması,
3. Yüksek hızlı uygulamalarda rahatlıkla kulanılabilmesi ve mekanik özelliklerini kaybetmemesi,
4. Sıcaklıktan etkilenmemesi,
5. Yırtılma ve delinmeye karşı yüksek dayanım,
6. Kolaylıkla diğer metallerle birleşme,
7. Yağ, gres ve neme karşı metali koruması,
8. Çok iyi kimyasal direnci ve,
9. Çevre dostu olması mükemmel bir malzeme olduğunu gösteren üstün özellikleridir.

Bu özellikleriyle balistik uygulamalarda dahil olmak elektrik/elektronik, çizim/grafikleme, manyetik medyaya kadar çok geniş bir yelpazede kullanımını mümkün kılmıştır.

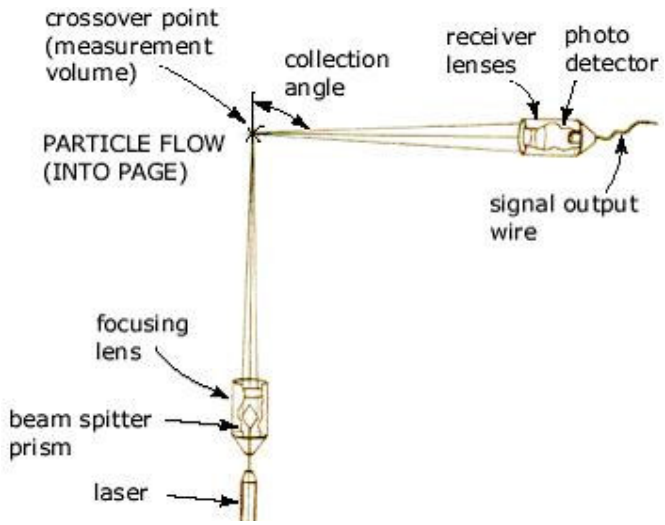


Şekil 3.7: Mylar polyester film [21].

3.2.3.1. Giriş

Hız interferometreleri(LDV) için lazer kaynağı gereklidir. Genellikle Helium-Neon(HeNe) veya Argon iyon lazerleri kullanılır. Lazerler diğer radyasyon ya da dalga kaynaklarından daha avantajlıdır. Mükemmel frekans sabitliği, düşük ışın çapı(yüksek tutarlılık) ve yüksek odaklanma enerjisi sayılabilir.

Hız interferometrelerinin ana mantığı ölçümü takip edilen cisme lazer ışını göndermesi ve yansıyan ışını toplamasıdır(Şekil 3.8). Yansıyan ışının dalga boyundaki değişiklik, hedef cismin(örneğin mermi) hızının fonksiyonudur. Bu mantığa literatürde "Doppler Etkisi" denir. Bu sayede yansıyan lazer ışınının dalga boyundaki değişiklikle merminin hızını elde edebiliriz. Bunu lazer ışınlarının kenar oluşturmasından faydalanarak yaparız. Orjinal ve yansıyan ışınlar üst üste bindirilir.



Şekil 3.8: Tipik lazer doppler hız ölçüm aleti[23].

Hız interferometreleri akışkan metreler veya rüzgar ölçerler gibi çalışırlar. Yansıtıcı yüzeyi olan cisimlerin(Mylar kaplanmış mermi çok uygun) hızını şeffaf akan bir yolu(mermi yolu) arkadan takip ederek ölçüm alırlar. Hız interferometreleri ayrıca titreyen bir yüzeyden Doppler yansımalarını ekrana aktararak titreşim ölçer gibi de çalışabilirler. Daha önce de bahsettiğimiz gibi daha başarılı sonuçlar almak için titreşen yüzeye yansıtıcılığı artıran bir tabaka yapıştırılması uygundur.

Hız interferometrelerinin avantajları:

1. Temassız ölçüm alabilirlik,

2. Çok yüksek frekansta veri toplayabilme.

Dezavantajları:

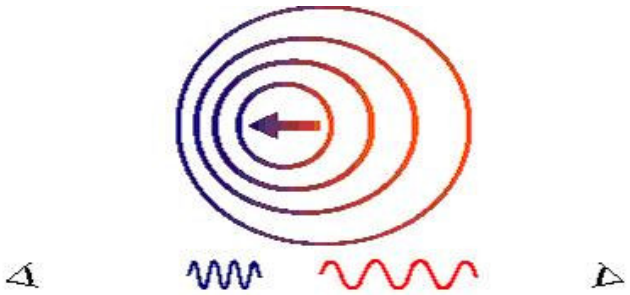
1. Lazer kaynağı, foto dedektörü(toplayıcı) ve hedef yüzeyi arasında yeterli yansıma sağlanmalıdır,

2. Ölçümün doğruluğu, yollanan ve yansıtılan ışınların hizalamasına son derece bağlıdır.

3. Yöntem pahalıdır.

3.2.3.2. Doppler Etkisi

Doppler Etkisi ilk olarak 1842 yılında Avusturyalı fizikçi J. C. Doppler' in ses için yaptığı bir araştırmada; bir kaynaktan yollanan ses dalgalarının gözlemciye doğru hareket ettirilerek titreşmesini bulmasıyla ortaya çıkmıştır. Aşağıdaki şekilde de görüldüğü gibi mavi gözlemci tarafından bakarken sesin dalga boyu düşer, frekansı artar. Kırmızı gözlemciye göre ise; dalga boyu artarken frekans azalmaktadır. Kaynak; ok yönünde ilerlemektedir.

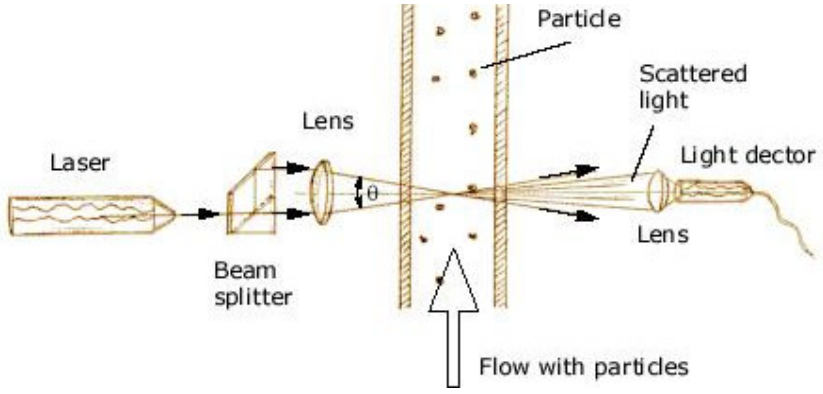


Şekil 3.9: Doppler etkisi[23].

3.2.3.3. Lazer Doppler Ölçüm Aleti

Tipik bir Lazer Doppler Ölçüm aleti; öncelikle bir lazer ışınını iki ayrı ışına böler. Bunu ışın ayrıştırıcı ile yapar. Ardından toplayıcı bir lensle bu iki ışını "merkeze" odaklar. İki ışın birbirine yaklaşırken aralarındaki açı θ olur. Merkez; merminin geçtiği yol üzerinde yüzeysel bir alandır. Mermi ve çevresindeki yüzeysel alan

belirli bir akış alanı içindeyken, aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi mermi bu alan içinden geçerken yüzeyine çarpan lazer ışını yansıma yapar. Yansıyan ışının frekansı, gönderilen lazer ışınları arasında geçen zamana ve ışınların oluşturduğu yola dik olan merminin hızına bağlıdır.



Şekil 3.10: Lazer doppler optik sistemi[24].

Doppler mermisinin frekansı f_D, ölüm ışınlarına dik mermi hızı v_n nin δ, lazer ölçüm yoluna bölünmesiyle bulunur.

$$f_D = v_n / \delta \qquad \textbf{(3.3)}$$

Lazer ölçüm yolu(fringe pattern) δ lazer dalgaboyu λ ve geçiş açısı θ ya bağlı bir fonksiyonken, denklemi δ yerine koyarsak Doppler frekansı:

$$f_D = \frac{v_n}{\delta} = \frac{2v_n}{\lambda}\sin\left(\theta/2\right) \qquad \textbf{(3.4)}$$

haline gelir ve merminin hızı v_n :

$$v_n = f_D \cdot \delta = \frac{f_D \cdot \lambda}{2\sin\left(\theta/2\right)} \qquad \textbf{(3.5)}$$

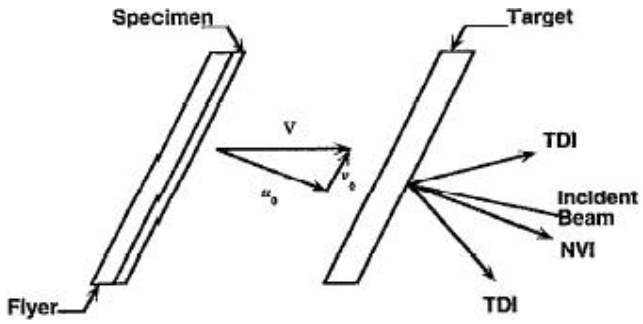
şeklinde ifade edilir. (3.5) denkleminde hiçbir negatif terimin olmadığına dikkat edelim. Yani formül skalerdir. Bu durumda merminin yönü hakkında hiçbir bilgiye sahip olamayız.

Lazer interferometreleri istenen sürekli ölçümü sağlamasına rağmen bazı dezavantajları vardır. Şu anda kullanılan lazer interferometreleri çok pahalıdır ve veri basitleştirme, azaltma çok zaman alıcı ve karmaşık olabilir.

3.2.4. Lazer Işını Çizgisi Hız Sensörü (LLVS)

3.2.4.1. Giriş

Bir gazlı tabancadan ivmeli fırlatılan mermi ya da başka bir uçan cisme ait ve sabit bir hedefe çarpan deneylere "hedef levha çarpma deneyleri" denir. Bu deneyler Hugoniot şok deneyleri ve basınçla levha kesme deneylerini de içerir (Şekil 3.11) ve malzemelerin yüksek gerilme oranı ve şok yüklemeye karşı cevaplarını gösteren deneylerde de kullanılır. Bu deneylerin temeli düz dalgaların levhalar içinde ilerlemesine dayanır. Bu sayede deneyler bir boyutlu hasar durumunda incelenebilir. Deneyler; malzemelerin şok darbe dayanımlarının ölçümünde, basınç altında sıvıların kuvvetlerinin ölçümünde, metal ve kompozitlerin çok yüksek kesme oranlarına karşı tepkilerinin ölçümünde ve balistik malzemelerin hasar gelişimlerinin araştırılmasında kullanılır. Levha çarpma deneylerinde kullanılan aletler birbirine benzerler. Yukarıda bahsettiğimiz lazer interferometreleri, ayrıca stresgeçler bunların arasındadır.



Şekil 3.11: Basınçlı kesmeyle levha çarpma deneyi şeması

Levha çarpma deneylerinin iyi sonuç vermesi merminin çarpma anındaki ilk hızının ölçülmesindeki güvenilirliğe bağlıdır. Bu nedenle mermi hızını tekrarlanabilir ve güvenli ölçmenin yolu levha çarpma deneylerinin etkili uygulamasına bağlıdır. Hedefin cevabı genellikle lazer interferometreleri ve stresgeçlerle yapılan dalga yapısına ait ölçümlerle ve çarpma boyunca ölçülmüş hıza ait dalga yapısı

ölçümlerinin karşılaştırılmasıyla gözlemlenir.

Mermi hızını ölçmek için en sık kullanılan yöntem belirli aralıklarla yerleştirilen pinlerde zamanın ölçülmesidir. Bu pinler mermi üzerinde iletken yüzeye bağlanırlar. Bu yöntem tamamen güvenilir olmakla birlikte 3 dezavantajı vardır:

1. Hız sistemi ayarları her testten sonra tekrar yenilenmelidir,
2. Pinler arası mesafe her testten önce ölçülmelidir,
3. Hız ölçümünün doğruluğu yerleştirilen pinlerin adedine bağlıdır. Bu sayı 4 ü geçmez.

Benzer bir ikinci ölçüm yöntemi de zamana bağlı yapılabilir. Bu yöntemde belirli bir uzaklıktan yollanan lazer ışınlarının mermi tarafından engellenmesi mantığı vardır. Bu yöntemdeki üstünlük hız sisteminin her testten sonra yeniden yapılandırılmasına gerek kalmamasıdır. Fakat lazer aygıtlarının sabit oluşu ve sınırlı hız ölçümü sistemi zorlaştıran etkenlerdir. Bir diğer yöntem de yine zaman ölçümünü baz alır. Bu yöntemde yansıtıcı yüzeyi olan bir cisim (örneğin mermi) boşluktaki elipsoidal noktalardan geçer. Bu noktalar yer tespiti yaparak yorum yapan özel alanların merkezidir. Yöntem ucuz bir yöntemdir. Bununla birlikte ikinci yöntem olarak bahsettiğimiz "çoklu-ışın tekniği" ile aynı dezavantajları vardır.

Bu bölümde bir levha çarpma deneyi süresince mermi hızının direk, sürekli ve bağlantısız ölçümünü sağlayan bir yöntemden bahsedeceğiz.

En son geliştirilen sürekli ölçüm yöntemi lazer ışını çizgisi hız sensörleri (LLVS)dir. Bu metod hem ucuz hem de basittir. Ramesh ve Kalker [3] bu metodu Johns Hopkins Üniversitesi' nde geliştirdiler. Genel amaç uçan bir plakanın çarpma deneyleri idi. Bu deneyde bir plaka, cisim veya mermi, basınçlı tabancanın namlusundan fırlatılarak hedefe çarptırılır. Bu plakalar genellikle 100 m/s civarında hızla fırlatılır. Merminin ilk hızının ölçümü çok önemlidir. Bu sayede merminin malzeme üzerindeki şok etkisi hesaplanır.

Bu yöntemde merminin çarpışmanın hemen önceki andaki hızı ve ivmesi net olarak belirlenebilmektedir. Yöntemin 3 önemli avantajından bahsedecek olursak:

1. Lazer çizgisi hız sensörü (LLVS), silahın ufak hareketlerinden, titremesinden etkilenmez,

2. Sinyallerden alınan doğrular güvenilir sonuçlar verir,

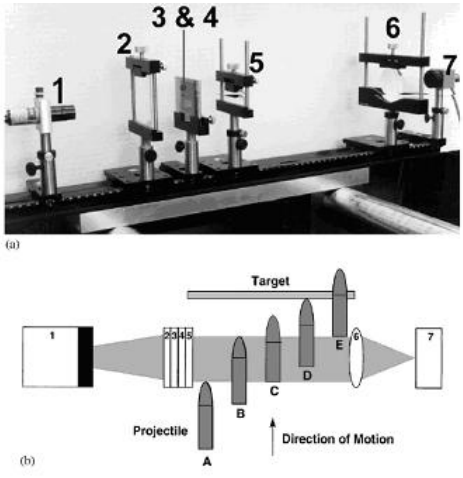
3. Her deneyden sonra yeniden kalibrasyona ya da sistemi kurmaya gerek yoktur.

Deneysel tekniği detaylı anlatarak yöntemi analiz etmeye başlayalım. Ardından bu yöntem kullanılarak ulaşılmış olağan bir deney sonucunu değerlendirelim ve yöntemin ana özellikleri ile avantajlarına değinelim.

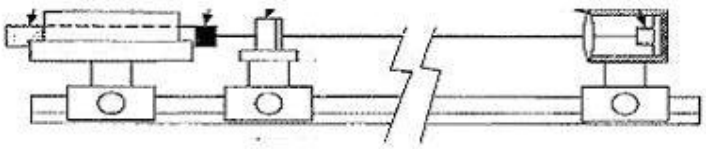
3.2.4.2. Deneysel

Lazer çizgisi hız sensörünün çalışmasını gösteren şematik diyagramlara aşağıdaki Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 den bakalım.

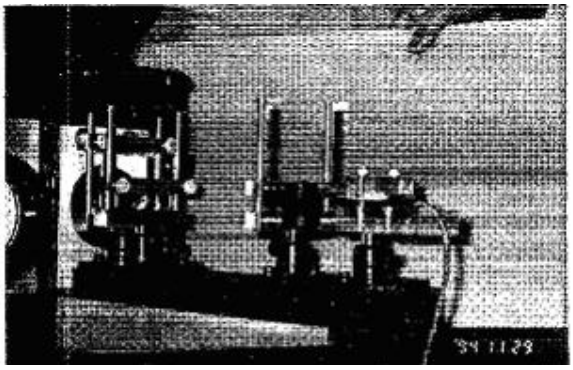
Sistem 3 ana bileşenden oluşmaktadır. (a) lazer ışınını üretmek için optik bir düzenek, (b) optik mercekler ve ışını toplamak için gerekli optik detaylar, (c) diğer ek gereçler. LLVS nin gerçek bir çalışmaya ait örneği Şekil 3.14 te görülmektedir. Şekil 3.14 te toplayıcı lensler görülmemektedir. Çünkü hedef çemberinin arka tarafında kalmaktadırlar.



Şekil 3.12: (a) LLVS fotoğrafı ve (b) sistemin çalışma mantığını gösterir şema[3].



Şekil 3.13: LLVS deneysel düzenek şeması[3].



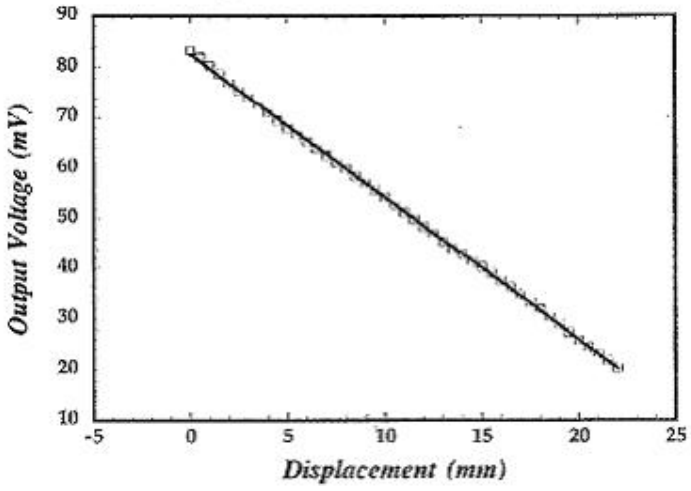
Şekil 3.14: LLVS fotoğrafı[3].

LLVS nin çalışma prensibi son derece basittir. Sistemin çalışma mantığı şu şekildedir. Şekil 3.12a' da gösterilen LLVS, merminin sürekli ölçümünü-takibini-sağlar. Bunu merminin hedefe çarpmadan önceki ve çarptıktan sonraki yerdeğiştirmesini ölçerek yapar. Şekil 3.12' ye bakarak öncelikle LLVS' nin elemanlarını tanıyalım.

Bir diod lazerinden(#1) ölçüm alanına ışınlar gönderilir. Diod lazeri optikle üretilen ve bir noktaya odaklanıp o noktada birleşen lazer ışınlarından oluşur. Bu ışınlar yatay ve düşey eksenlere dağılır. Şekil 3.12b' de de görüldüğü gibi bu ışınlar, ışık demetleriyle bir plaka oluşturur. Işın tabakası; merkezindeki her birim uzunluğunda düzgün dağılımlı ışık gücüne sahiptir. Nokta sabitliği önemli olduğu için ışınların yollandığı kaynak özeldir. Bu detayda ışınların diziliminde kolaylık sağlaması için tüm düzenlemenin optik bir ray üzerinde yapıldığı farzedilir ve mm boyutlarında bir numuneye odaklanma ve numuneye ait data toplama ortama yayılan ışın demetleriyle gerçekleşir. Işın tabakası; bir yüzeyde tespit edilmiş olup farklı açılı yayınmalarla oluşturulur(mermi ekseninin ortogonalinde). Daha sonra bu yayılan ışın plakası silindirik iki lensin içinden geçer. Bu lenslerden ilki(#2) yatay eksendeki ışık demetlerini bir hizaya sokar. İkincisi(#5) ise düşey eksendeki ışık demetlerini

hizaya sokar. Bunların arasına bir delik aparatı(#3) ve nötral yoğunluk filtresi(#4) konulur. Bu iki aparat sırasıyla ışık plakasının köşelerini yok etmeye ve lazer plakasının kuvvetini azaltmaya yarar. Işık plaka köşeleri düzgün dağılmayan kuvvet bölgeleridir. Bu işlemle bu kuvvet bölgeleri de yok edilmiş olur. Sonuçta düzgün dağılan bir kalınlıkta, genişlikte ve kuvvette lazer plakası oluşur. Ardından lazer; simetrik, simetrik-dışbükey, toplayıcı bir lensle(#6) silikon PIN foto-dedektörü(#7) nün aktif yüzeyi üzerine toplanır[4]. Bu yüzey lazer tabakasının kuvvetini yorumlama özelliğine sahiptir. Dedektörün(fotodiod) merkezi ışın demetini görmektedir. Fotodiod sinyali anlamlandırılır. Bunun için optoelektronik ve amplifikatör aygıtları kullanılır. Daha sonra lazer tabakasının kuvveti voltaj olarak bir osiloskoba yüklenir ki bu voltaj; toplayıcı lense giren ışın demetiyle orantılı ve anlamlı datalara sahiptir.

LLVS düzeneği kalibrasyon sistemi kullanılarak kalibre edilir. LLVS çıktısı ekrana yansıtılırken datalar ve lazer tabakası üzerinde birlikte çalışılır. Sistemin mantığının daha kolay anlaşılması için Şekil 3.15 ve Şekil 3.16' dan böyle bir deney sonucunda elde edilen sonuç eğrilerine bakalım. LLVS sisteminde voltaj çıktısı lazer tabakasına ait kalibrasyon datalarıyla aynı zamanlı yorumlanır ve ilk sonuç olarak Şekil 3.15' te görülen voltaj-yer değiştirme eksenli kalibrasyon eğrisi grafiğine ulaşılır. Grafikteki eğri lineerdir(lineer eğri lazer tabakası içindeki ışın gücünün düzgün dağılımlı olduğunu kanıtlar). Kalibrasyon testleri voltaj değerlerini yer değiştirme verilerine dönüştürmek için yapılır.



Şekil 3.15: Kalibrasyon plakası kullanılarak oluşturulmuş LLVS kalibrasyon eğrisi.

Şekil 3.12b' de görülen grafiğin mantığıyla bir çarpma testinden alınan voltaj-zaman eğrisine ait dataları yorumlarsak[13] Şekil 3.12b ve Şekil 3.16' ya birlikte bakmamız gerekir. Buna göre mermi lazer tabakasının dışındayken A noktası için osiloskop maksimum voltajı gösterir. Bu durum, maksimum ışık kuvveti olarak geçer. Mermi A noktasından B noktasına doğru hareket ettikçe, ışın tabakasını engellemeye başlar ve ışık kuvveti engellemeyle doğru orantılı olarak azalmaya başlar. Minimum voltaj, ışık tamamen bloke edildiğindeki andaki ışık kuvvetidir. Mermi, eğer lazer tabakadan daha uzunsa merminin alt ucu tabakanın başlangıç noktasına ulaşana kadar durdurma devam eder. Şekil 3.12b' de B den C ye kadar olan kısım. Şekil 3.16 ile devam edersek minimum kuvvet, bu aralığa rastlar(lazer tabakasının en düşük voltaj değerini verdiği aralıktır). C den E ye kadar voltaj seviyesinde, merminin tabakayı terketmeye başlamasıyla birlikte artış görülür. D anı, çarpışmanın olduğu andır. Bu an, lazer tabakasıyla hedef arasındaki bilinen mesafeyle ve merminin hızının azalmaya başlamasıyla tesbit edilir. Bu an ile başlayıp voltaj-zaman eğrisinin sonuna kadar kaydedilen veri, çarpışmanın tamamını sürekli veri ölçümleriyle verir.

Şekil 3.16' daki LLVS nin voltaj-zaman eğrisi ile Şekil 3.15' teki kalibrasyon eğrisi birlikte kullanılarak mermi hızının sürekli ölçümü sağlanmış olur. Deneysel doğruluklar için ikinci dereceden daha büyük denklemler uygun doğrulukta datalar vermez. Örneğin sadece ortalama hız ve ortalama ivme bu datalardan elde edilebilir. Bu denklemleri gözden geçirecek olursak:

Data azaltma prosesi aşağıda görüldüğü gibidir. Kalibrasyon eğrisi; voltaj (V) çıktısı ile merminin yer değiştirmesi(x) arasında ilişki sağlar.

$$V = c - dx \qquad \textbf{(3.6)}$$

$$x = \frac{1}{2}at^2 + \upsilon t + b \qquad \textbf{(3.7)}$$

b; sabittir. Son iki denklem birleştirilerek LLVS ye ait voltaj datalarının zamana bağlı denklemi elde edilir.

$$V = c - d\left(\frac{1}{2}at^2 + \upsilon t + b\right) \qquad \textbf{(3.8)}$$

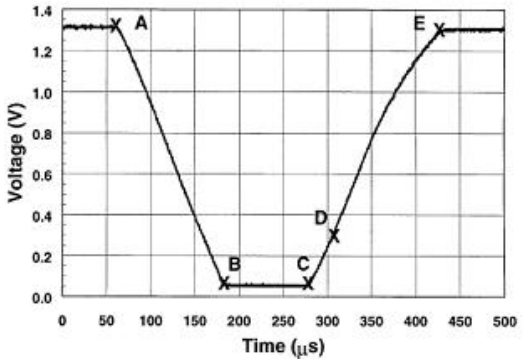
c ve d bilindiği sürece (3.6) denklemini deneysel datalara uygulamak mermi hızı ve ivme sonuçlarını bize verir. Bu sonuçlar, ortalama hız dataları % 0,1-1 değerleri arasında değişen hatalar verebilir. Dijital osiloskop birim zamanda çok hızlı data toplayabilir ancak kalibrasyonun kalitesi ve data elde etme sisteminin çözünürlüğü hata yüzdesinin artıp azalmasına sebep olur.

Kalibrasyon verilerini kullanmanın ikinci bir yolu da hedef malzeme olmayan ortamda boşa bir seri ateş edilerek yapılır. Bu kalibrasyon testlerinden toplanan veriler, yer değiştirme verilerini elde edebilmek için normalleştirilir. Normalleştirme işlemi şöyle yapılır. Zaman ekseni(x) en küçük parçalara ayrılır. Vs(merminin çarpma hızı); mermi uzunluğunun Şekil 3.16' da görülen A ile C anları arasında geçen zamana bölünmesiyle hesaplanır. Ardından Vs çarpma hızıyla, daha önce belirlediğimiz anlık zaman dilimleri çarpılarak kalibre edilmiş yer değiştirme verilerine ulaşılır.

Bu düzenlemeyle, bir balistik testteki voltaj-yer değiştirmeye ait noktalar kümesi ile aynı sayıda voltaj-yer değiştirme noktalar kümesi elde edilmiş olur. Kalibrasyon dataları bir ara tablo formatında toplanır ve daha sonra bu datalar mermiye ait yer değiştirme-zaman eğrisini çıkarabilmek için balistik hedef testine ait aynı sayıda noktalar kümesinden oluşan datalarla birleştirilir. Eğer balistik teste ait datalardan biri iki kalibrasyon noktası arasına düşerse çözüme interpolasyonla ulaşırız.

Bazen deneylerde karşılaşılabilecek zorluk, iki teste ait maksimum değerlerin(maksimum voltaj) farklı çıkabilmesinden doğar. Bu, lensleri koruyan Lexan tabakalarının kirlenmesinden ya da çizilmesinden kaynaklanabilmektedir. Sonuçta maksimum voltaj düşer. Kalibrasyonu bununla birlikte uyumlamak gerekmektedir.

Voltajla yer değiştirme arasındaki ilişki kurulduktan sonra hız, ivme, kuvvet ve enerji değerlerine rahatlıkla ulaşılır. Bu noktada LLVS[13] yönteminin geliştirilmesiyle ELVS yöntemi bulunmuştur. LLVS de sadece hız ölçülebilirken ELVS sayesinde yerdeğiştirme, hız, kuvvet ve enerji ölçülebilir olmuştur. Bu yöntemde sürekli veriler ve kurşuna temas edilmeden veriler toplanır.



Şekil 3.16: LLVS voltaj-zaman eğrisi[13].

Veri analizleri; veri azaltmak için izlenen sürece bakalım. Osiloskop ile toplanan veri noktaları ilk olarak analiz programına okutulur. Sonra voltaj verilerine dönüştürülür. Biraz önce de bahsettiğimiz gibi voltaj-zaman eğrisi yer değiştirme-zaman eğrisine dönüştürülür. Ardından yer değiştirme-zaman eğrisi verileri diferansiyelleri alınarak hız değerlerine ulaşılır. Sonra ikinci diferansiyelle ivme ve kuvvet değerleri hesaplanır. Soğurulan enerji hesaplanırken de, olay anındaki mermi enerjisinden ($1/2m_{proj}V_s^2$) çarpışmanın herhangi bir anındaki enerji ($1/2m_{proj}V^2$) çıkarılır. $m_{proj,}$ mermi hızıdır. $V_{s,}$ merminin çarpma hızıdır. V ise anlık mermi hızıdır.

Deney tekrarlılığını sağlamak için yaklaşık 100 adet, farklı hızlarda boşa ateş etme testi yapılabilir. ELVS metodunu kullanırken merminin anlık zamandaki pozisyonu ve lazer tabakasına giriş ve çıkış arasındaki herhangi bir konumu tespit edilebilir. Buradan da hız hesabı yapılabilir. Bütün eğrilerdeki zaman ekseni ile mermi çarpma hızı Vs yi çarparsak voltaj-yer değiştirme eğrisine ulaşırız.

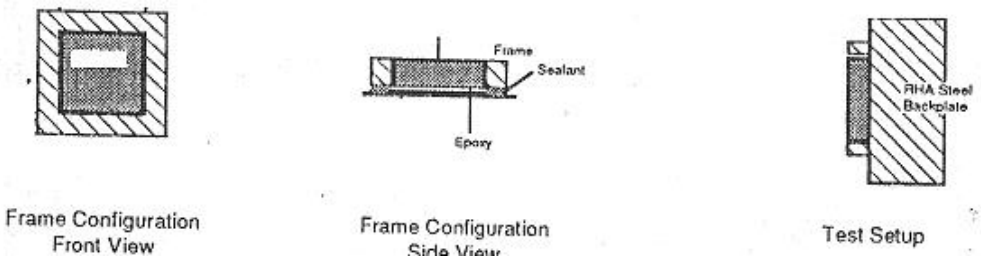
ELVS nin sınırlarından bahsedecek olursak ilk olarak testi bir açıdan izleyebilmeyi söyleriz. Eğer mermi kısaysa ve hedef çabuk hasara uğruyorsa mermi görüş açısını çok hızlı terk eder ve hedef ile maskelenir. Mermi çok uzunsa tekstil hedefi parçası aşırı deforme uğrayacaktır. Yüksek hızlı fotoğraflama ELVS yöntemi ile çok iyi uyum sağlar. Merminin 5^0 ye kadar eğimi sonuçları değiştirmez. ELVS ile yapılan araştırmalar yumuşak zırh malzemelerinde merminin açısal sapması önemli bir tema değildir ancak sert malzemelerde bu sapma, sona yakın yerlerde gerçekleşir. Bu sebeple son 3–4 mm lik veriler önemsenmez. Merminin geri sekmesinde veri analizleri yer değiştirmenin azalmasıyla ve negatif mermi hızıyla gözlemlenir.

Bu yöntemin en büyük avantajlarından biri sistemin kolay anlaşılır olması ve kullanım kolaylığıdır. LLVS temassız bir ölçüm yöntemidir. Çarpma deneyi boyunca sistem zarar görmez. Bu sayede hız düzeneğinin tekrar yapılandırılmasına gerek kalmaz. Ek olarak, her testten sonra sistem parametreleri tekrar ölçülmek ve düzenlenmek zorunda değildir. Lazer çizgisi hız sensörü(LLVS) silahın yerinden oynamasından(atması) etkilenmez. Bu nedenle sistemin yerine tam oturması kritik öneme sahip değildir. Sistemin diğer bir avantajı da; ivmenin nedensel ölçümünün sağlanabilmesidir. Bu, son derece kullanışlıdır. Bunun için levha çarpma deneylerinde hız sistemi ile hedef arasında yeterli bir mesafe bırakmak gereklidir. İvmenin bilinmesi doğru çarpma hızının tahmin edilmesi açısından önemlidir.

Bir balistik test esnasında merminin sürekli izlenebilmesi istenen bir durumdur. Devamlı izleme, hasar olayının geçmiş gelişimini elde etme imkanı sağlar ve enerji soğurma işlemine daha yakın bir bakış sağlar. Buna rağmen birçok araştırmacı, çalışmalarında anlık ve aralıklı ölçme yöntemlerini sürekli ölçme yöntemlerine tercih ederler.

3.2.5. Artık Penetrasyon, Kritik Açı ve Ters Balistik Test Yöntemleri

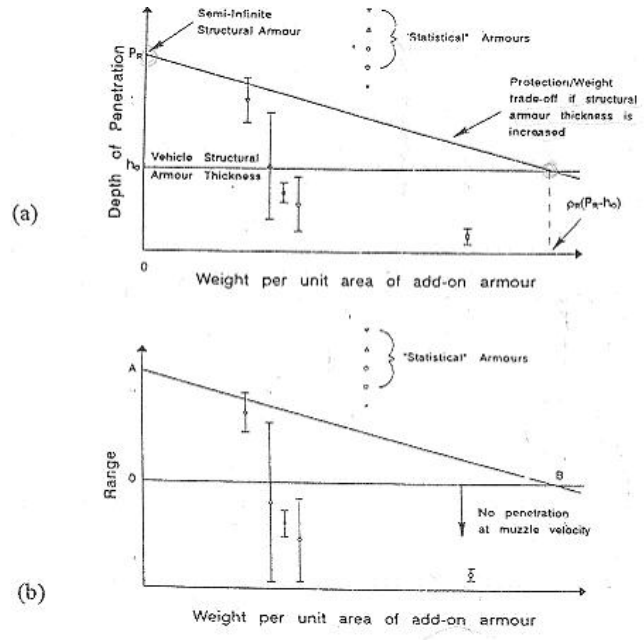
Uzun namlulu silahlardan atılan zırh delici mermilere karşı (zırh delici G3, Kalaşnikov veya MI6 mermileri gibi) geliştirilen zırh sistemleri; genellikle metal bir ön plakadan ve arkasında bir destek(referans) malzemesinden oluşur (Şekil 3.17).



Şekil 3.17: Balistik malzeme ve referans malzeme[8].

Kullanım yerine göre, maliyet fiyatı ve ağırlık gibi faktörler önem kazanabilmekte ve buna göre de referans kademesi, Kevlar' dan alüminyuma kadar çeşitlilik gösteren malzemeler arasından seçilebilmektedir. İyi bir referans malzemesinden beklenen görev; metali geçen merminin artık kinetik enerjisini absorbe edecek nitelikte olmasıdır. Bir merminin referans malzemesi içinde gerçekleştireceği

penetrasyon derinliği genellikle mermi ucu geometrisine çok hassastır. Deforme olmayan sivri uçlu mermiler, referans malzemeleri içerisinde oldukça büyük penetrasyon derinlikleri oluşturmaktadır. Ön plakanın en önemli görevlerinden birisi de zırh delici merminin ucunu köreltmek ve referans malzemesi için mermiyi verimsiz bir deliciye dönüştürmektir. Balistik ön plakanın bir diğer görevi de; yükü yayarak referans malzemesine iletmektir. İşte bu iki önemli görevi en iyi şekilde yerine getirebilmesi için, ön plakanın referans malzemesi tarafından iyice desteklenmesi ve deformasyona mümkün mertebe izin vermemesi gerekmektedir. O halde referans malzemesinde aranması gereken özelliklerden birisi de yüksek rijitlik olmalıdır. Çünkü, ancak bu şekilde metalin balistik performansından azami şekilde istifade edilebilecektir. Bu noktada referans malzemesi, balistik malzeme ve mermi üçgeninde birbirleriyle olan ilişkilerinden bahsedelim:



Şekil 3.18: Artık penetrasyonun referans malzeme kalınlığıyla değişimi[8].

Şekilde de görüldüğü üzere özetle, ön malzemenin(h_0) balistik etkisi referans malzemesinin kalınlığı azaldıkça($\rho_R[P_R-h_0]$) azalır. Sebebi arka malzemeden güç alamaması ve dayanağının azalmasıdır. İşin diğer boyutunda da referans malzemenin kalınlığının azalması durumunda balistik malzemenin rijitliği azalacağı için mermi kendine yeni enerji harcama yolları bulur. Bu da nüfuziyetini azaltır ve balistik malzemenin balistiklik etkisini arttırır. Şekil 3.18b' de görülen A noktası(zırhın

mermi tarafından tamamen delindiği nokta) ve B noktası(merminin tahrip edildiği nokta) Şekil 3.18a' daki P_R ve $\rho_R(P_R-h_0)$ noktaları yerine yazılırsa tüm eğri boyunca daha doğru data toplanması sağlanır.

Bir merminin nüfuziyetini azaltan etkiler şunlardır:

1. Balistik malzemenin direnciyle mermi ucunun körlenmesi,

2. Merminin nüfuziyeti sırasında hız ve ağırlık kaybetmesi,

3. Merminin kinetik enerjisinin etrafa yayılan şarapnellerle dağılması.

Mermi hızının artması ise merminin balistik özelliğini arttırır. Ancak bu durum merminin deformasyonunu da kolaylaştıran bir etkendir.

İşte bütün bunları yorumlamak, analiz etmek için bir başka ölçüm yöntemi "Artık Penetrasyon Balistik Test Yöntemi(DOP)" geliştirilmiştir. Balistik uygulamalar birçok ölçüm yöntemiyle incelense de bu yöntemler 2 ana grupta sınıflandırılır:

1. Normal balistik uygulamalar; mermi, hedef malzemeye ateş edilir,

2. Ters balistik uygulamalar; hedef, mermi ya da çubuğa ateş ettirilir.

Bu basit sınıflandırmanın içinde yeni malzemelerin ve yeni malzeme konfigürasyonlarının geliştirilmesiyle ve yeni zırh malzemeleri olarak kullanılmalarıyla balistik araştırmalar karmaşık olmaktan uzak kalamamıştır ve düşük maliyetli üretimin ve testlerin yapılması önemli hale gelmiştir. İşte bu noktada basitlikleri ve düşük maliyetli sistem kurulumuna imkan vermeleri sayesinde özellikle DOP ve kritik açı testleri(ileride bahsedeceğiz) birçok parametreye cevap verdiği için uygulamalarda kullanılan testler arasında yerlerini almıştır.

Yine de bu test yöntemlerinin avantajlarının yanında bazı dezavantajları vardır. Ölçülen malzeme özelliklerinin kesinliği ve nüfus etme mekanizmasının esaslarının yorumlanması, DOP testleri ve kritik açı testleri ile genelde standart hızlardaki ölçümlerde kullanılabilir(örneğin ilk çıkış hızı…)ve önemli hız etkileri görülmez.

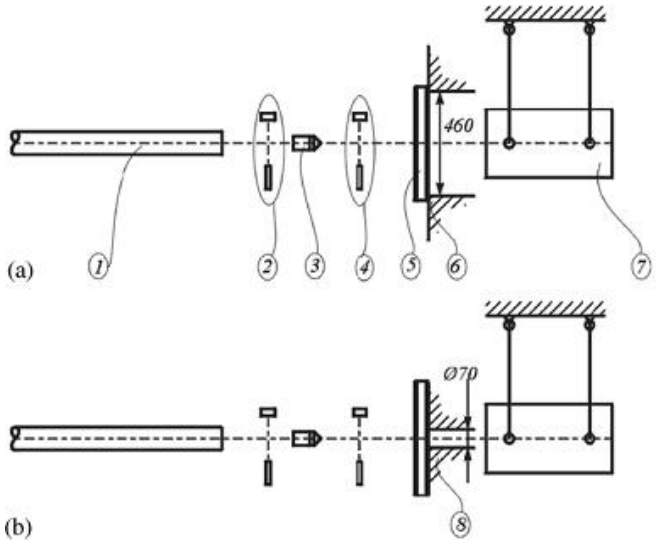
Amerikan Askeri Malzeme Teknoloji laboratuarlarında balistik kinetik enerjinin testlerle belirlenmesi "Artık Delme Yöntemi(Residual Penetration Ballistic

Testing)" ile yapılır. Kullanılan delici malzeme genellikle tungsten çubuğudur. Daha önceden belirlenmiş bir hızda ateşleme işlemi yapılır. Örneğin seramik balistik bir malzemenin özellikleri belirlenecek. Arkasına yeterince kalın bir çelik plaka(referans plaka) tespit edilir. Seramiğin(balistik plaka) kalınlığını ve yüzeysel yoğunluğunu sıfırdan belirli bir değere kadar değiştirerek artık penetrasyona(DOP) bakarız. Bu yöntemle farklı malzemelerin farklı özelliklerini de kıyaslama imkanı bulabiliriz.

DOP yöntemi referans bloğunun balistik malzemeyle birlikte ikinci bir malzeme olarak kullanıldığı malzemelerde yaygın ve etkin bir şekilde kullanılan bir yöntemdir.

Referans atışı referans bloğuna yapılır. Referans bloğu malzemenin balistik katsayısını hesaplayabilecek kadar kalındır. İkinci vuruş deney(balistik malzeme) bloğuna yapılır. Bu sayede merminin malzemeye nüfuziyet derinliği belirlenir. Aynı zamanda çeşitli mermilerle değişik durumlar için kıyaslama yapılabilir.

DOP test yönteminde basit bir düzenek kullanılır. Bu düzenek ile "Artık Penetrasyon Derinliği" ölçümü gerçekleştirilir. Aşağıdaki şekilde ölçüm şemasını görmekteyiz.



Şekil 3.19: 1) namlu, 2) birinci hız sensörü, 3) mermi, 4) ikinci hız sensörü, 5) balistik malzeme, 6) rijit desteği, 7) balistik ölçüm sarkacı[8].

Burada merminin ateş edildikten sonra izlediği yol balistik malzeme ile sonlanmaktadır. Şayet mermi, balistik(ana) malzemeyi delmezse balistik ölçüm

sarkacına herhangi bir titreşim, kuvvet aktarımı olmayacağı için toplanan datalar "0" olacaktır. Sonuç başarılıdır. Mermi, balistik malzemeyi delememiştir. Ancak merminin, ana malzemeyi delip referans malzemeye nüfus etmesi de olasıdır. Bu durumda merminin referans malzemede yarattığı tahribat kuvvet ve titreşim olarak balistik ölçüm sarkacına iletilir ve delme işlemiyle ilgili datalar toplanmaya başlar. Merminin incelenen malzemeyi deldiği bu durumda arkadaki sarkaca çarpma hızıyla malzemenin özellikleri belirlenmeye başlar.

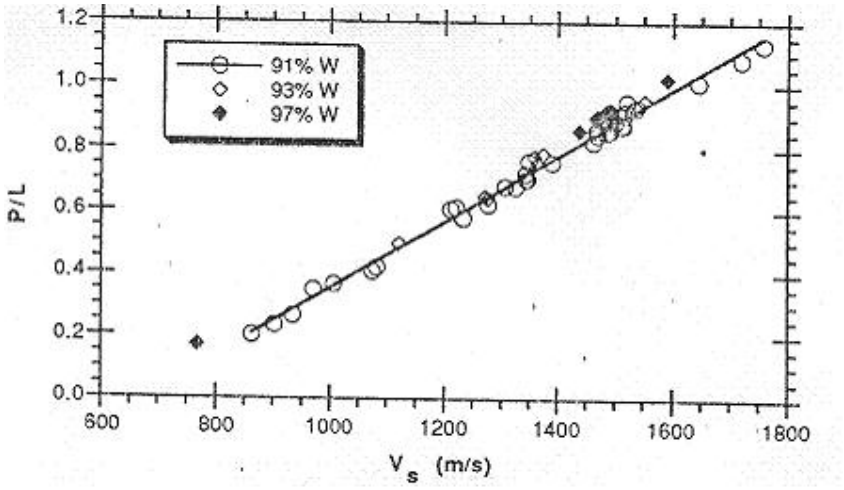
Artık Penetrasyon Yönteminde kullanılan düzenek yüksek duyarlılığa sahiptir. Diğer test yöntemlerine oranla deneye bağlı problemlerden etkilenmez. Bu yöntem genellikle yüzeysel yoğunlukları değişen farklı seramik balistik malzemeler arasında kullanılır.

Yöntemin diğer bir uygulanma şekli mermi yerine delici bir çubuğun kullanılmasıyla yapılır. Delici çubuk, ana zırh tamamen delinecek kadar tasarlanmalıdır ki bir kısmı arka zırh malzemesi(RHA)'nin de delinme ihtimalini düşünerek ana zırh tamamen delinmese dahi dışarıda kalsın. RHA' nın delinmesi durumunda ise dışarıda kalan bu çubuk içeriye nüfus etmiş olacak ve data toplanması işlemine devam edilebilmiş olunacaktır.

Artık Penetrasyon Yönteminin deneysel kısmını anladıktan sonra işin analitiksel boyutuna gözatalım. Balistik malzemenin performansı daha önce de bahsettiğimiz DOP yöntemiyle ölçülür. Yeterince kalın bir çubuğun ya da bir merminin ön balistik malzemeyi delip arka referans malzeme içinde katettiği yolun hesabına dayanan bir yöntemdi.

Bütün mermiler için mermi hızına bağlı nüfuz etme davranışı lineer bir eğri gösterir. Aşağıdaki grafiğe baktığımızda bunu daha iyi anlarız.

Buradan çıkarılabilecek sonuç; penetrasyon için kullanılan farklı tungsten malzemeleri arasındaki performans farkı yok denecek kadar azdır. Patrick Woolsey' in yaptığı bu çalışmada[12] % 91 W için lineer bir eğri çıkarılmış ve teorik çalışmalar için bu eğri formülüze edilmiştir:



Şekil 3.20: Mermi hızına bağlı artık penetrasyon lineer eğrisi[12].

$$P/L = -0.7098 + (0.00106) * V_s\ (m/s) \quad \textbf{(3.9)}$$

Çarpma hızına bağlı sapmaları düzeltebilmek için tüm artık penetrasyon değerleri standart çarpma hızlarına, yukarıdaki formül düzenlenerek normalize edilir. Bu düzeltme ile:

$$P_R = P_\mu + (0.00106 * (1493.5 - V_s)) \quad \textbf{(3.10)}$$

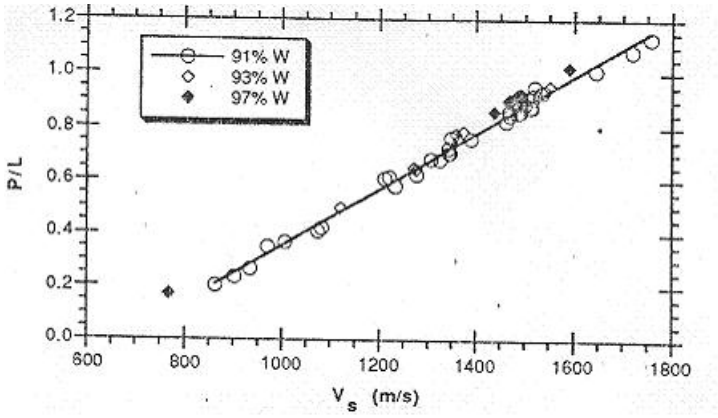
Bu teknik, merminin arka malzemeye penetre olduğu durumlarda kullanılır.

Günümüzde "Artık Penetrasoyn Yöntemi" için bilinen ve sıklıkla kullanılan balistik etki formülü:

$$\eta = \frac{\rho_R (P_R - P_1)}{\rho_1 h_1} \quad \textbf{(3.11)}$$

Referans derinliği; arka malzemeden (örneğin Al.)yapılmış çok kalın bir bloğa mermiyle ateş edilince ölçülen darbe derinliğidir. Bu değerler ilgili malzeme için yapılan referans deneyleri sonucunda mükemmel bir eğrinin çizilmesi ile elde edilir.

Yukarıdaki formüle Şekil 3.21 üzerinde bakarsak:



Şekil 3.21: DOP test yöntemi standart düzeni[12]

(a) da referans malzemesine ateş edilmesi durumundaki referans derinliği görülmektedir.

(b) de referans zırhla birlikte, h_1, ana malzemenin de kullanıldığını görüyoruz. Burada ana malzeme tamamen delinmiş ve P_1, artık penetrasyon derinliği olarak kendini göstermiştir.

(c) de ise h_1+ h_2 ek kalınlığında ana malzeme ile P_2, artık penetrasyon derinliği görülmektedir.

(b) ve (c) deki hesaplamaların kolaylığı için (3.11) denkleminin düzenlenmiş hali aşağıdaki gibi olur:

$$\Delta\eta = \frac{\rho_R (P_1 - P_2)}{\rho_1 h_2} \qquad \textbf{(3.12)}$$

Referans malzemesinin kalınlığı arttıkça kurşunun hedefi delmesi zorlaşır. Şekil 3.18' de detaylı görülmektedir. Referans malzemesinin yarı sonsuz kalınlıkta olduğunu düşünürsek bu durumdaki delme derinliği P_∞, merminin referans malzemeye değmemesi durumunda:

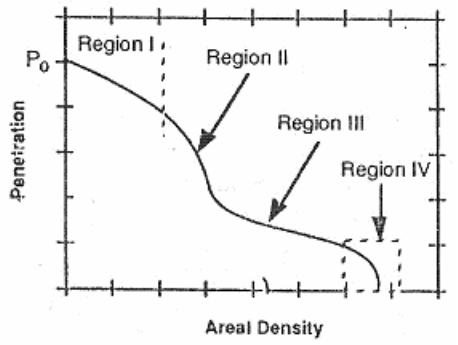
$$P_\infty = h_1 + \frac{P_1 h_2}{P_1 - P_2} \qquad \textbf{(3.13)}$$

Yeterince kalın referans malzemesiyle yapılan ölçümler ince referans malzemesine

göre daha başarılıdır. Delme derinliği testi muhakkak ki zırh özelliklerini tamamen veremez ancak bir merminin zırha karşı performansını görmemizi sağlar.

(3.12) ve (3.13) denklemleri (3.11) denklemine göre gerçeğe daha yakın sonuçlar verir. Bu durumun artan balistiklik etkisi ve yarı sonsuz referans malzeme kalınlığıyla alakası vardır. Sonuç, daha az atış sayısıdır.

Şekil 3.21' e bakarak herhangi bir zırh için malzeme performans eğrisini yorumlayalım.



Şekil 3.22: Genelleştirilmiş performans eğrisi[12]

Buna göre birinci bölge malzemenin kalınlıktan etkilenen penetrasyon bölgesini temsil eder. Mermi ucu henüz aşınmamış olduğundan hasar oranı(dalma) yüksektir. Bütün malzemeler bu bölgede benzer davranış gösterirler.

İkinci bölgede merminin hasar kabiliyeti azalır. Malzemenin direnci artar. Malzemeden parçalar saçılır. Düşük yüzey yoğunluklarında saçılmalar en aza iner.

Üçüncü bölge lineer bir sabitlik gösterir. Bu sebeple bölge, zırh incelemelerinde en fazla araştırılan bölgedir.

Dördüncü bölge ise sonlandırma bölgesidir.

Sonuçları değerlendirecek olursak:

1. Artık Penetrasyon Testleri diğer balistik test tekniklerinin zırh dizaynına bağlı problemleri gibi problemler göstermez. Örneğin; ön ve arka tabakalar arasındaki oran ve malzeme farklılığı,

2. DOP sisteminin en büyük avantajı uygulamalardaki sonuçlara çok yakın değerler vermesidir,

3. Balistik limit testlerinden daha az atış yeterlidir,

4. Duyarlılığı diğer balistik test metodları kadar iyidir,

5. Sistemin dezavantajı; her testin sınırlı sonuçlar vermesidir. Çünkü delme çubuğu, zaman değişkenli X-ray alanına sığmayacak kadar büyüktür.

3.2.5.1. Kritik Açı Testi

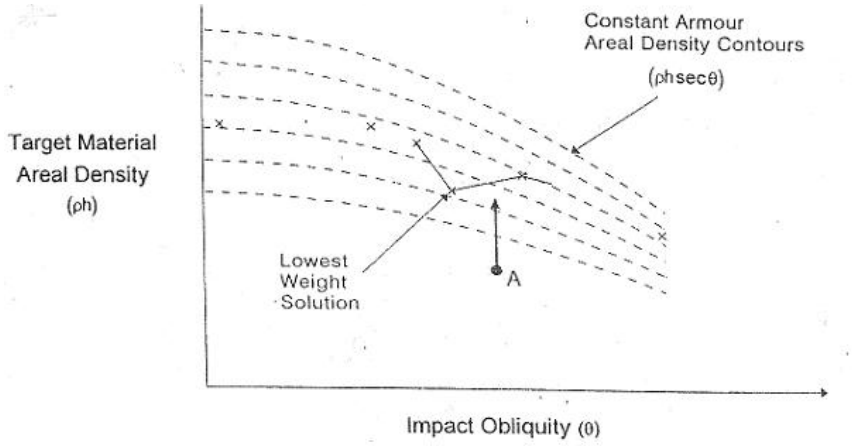
Diğer bir ölçüm yöntemi merminin ilk hızına ait standart eğrileri kullanan kritik açı ölçümüdür. Bu datalar, eğrileri aşmak için yeterli "yüzeysel zırh yoğunluğuna" kolaylıkla dönüştürülür. Yeterli zırh yoğunluğu formülü:

$$Zırh\ Yoğunluğu = \rho\ h\ sec\theta_{50} \qquad \textbf{(3.14)}$$

Zırh yoğunlukları sayesinde farklı zırhları çeşitli özellikleriyle kıyaslayabiliriz. Birden fazla zırh malzemesi bir arada kullanılırsa yukarıdaki formül her biri için ayrı ayrı hesaplanır ve toplanır. θ_{50}, tüm zırhın kritik açısıdır. Şekil 3.22' yi inceleyecek olursak;

Her eğri, eşit yüzey yoğunluklu noktalardan oluşmaktadır($\rho h\ sec\theta$). İşaretli noktalar, "mermiyi durdurmak için yeterli yoğunluk ne kadardır" sorusuna cevap vermektedir.

Herhangi bir tasarım aşamasında A noktasına ait bir eğimle atış yapılsın. Zırhın bu mermiyi geçirmemesi için yeterli yoğunluk nasıl bulunur. Şöyle; daha önceden belirlenen noktalar arasında çizgilerle yollar belirlenir. A noktasından çıkılan dikeyin bu hattı kestiği nokta işaretlenir ve en yakın noktasal hatta($\rho\ h$) paralel ilerleyerek yüzeysel yoğunluğu bulunur.



Şekil 3.23: Hedef malzeme yüzey yoğunluğu çarpma açısına bağlı değişimi grafiği

3.2.5.2. Ters Balistik Test Yöntemleri

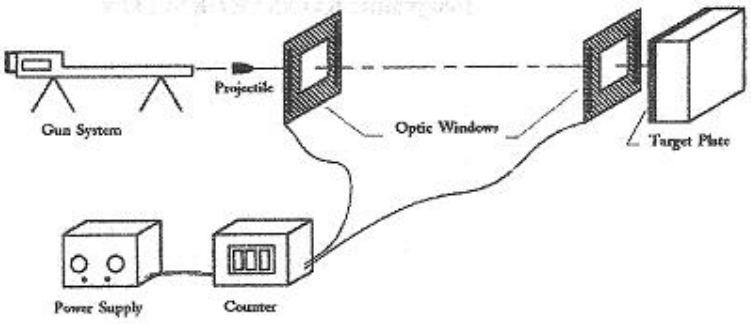
Yöntem prensip olarak DOP yönteminin aynısıdır. Tek fark mermi ya da çubuğun zırha değil, zırhın mermi ya da çubuğa çarptırılmasıdır. Yöntem de adını bu mantıktan alır.

Kısaca yöntemden bahsedecek olursak; Ters Balistik Testlerde hedef, uygun bir silahla hızlandırılıp özel bir uzun çubuğa girdirilir-penetre- ettirilir. Uzun çubuk delicileri genellikle tungsten alaşımlı malzemelerden yapılırlar. Bu delme işlemi esnasında bir dizi X-ray fotoğrafı çekilir. Her testteki sayısal bilginin detayı bu fotoğraflardan alınabilen radyografiklerin sayısına bağlıdır. En önemli deneysel sonuçlara çubuğun uç ve ön kısmının durumu belirli anlarda kontrol edilerek ulaşılır.

Ters balistik uygulamalarda yüksek balistik deformasyonlara rastlanır ve 3 boyutlu sonuç almak zordur. İşlem ancak çok büyük dikkatle ve deneysel, bilgisayar uygulamalarının başarılı birleşimiyle takip edilebilir.

Yöntemin en büyük dezavantajı dar bir alanda kendini göstermesi, hedefin radyal uzunluğunda sınırlı kalmasıdır. Zaten çubuğun radyal uzunluğu olmuş olsa, hedefi delemeyeceği açıktır. Yöntemin en büyük avantajı ise delme işlemindeki çözünürlük kalitesidir. Ters balistik uygulamalarının bir avantajı da, normal balistik uygulamalarda yapılması çok zor deneylerin bu yöntemle rahatlıkla uygulanabilmesidir. Ayrıca ters balistik uygulamalar uzun süren deneylerde maliyetleri de düşürür.

3.2.5.3. Terminal Balistik Test



Şekil 3.24: Terminal balistik test düzeneği

Bu test yöntemi mermi hızını belirlemede kullanılır. Merminin başlangıç hızı iki optik pencere ile ölçülür. Bir titreşim ölçer(osilatör), mermi birinci optik pencerenin içinden geçince saymaya başlar. Sayaç, mermi ikinci optik pencereyi geçince durur. İki optik pencere arasında mermi için geçen zaman hesaplanır. Ardından mermi hızı, mesafenin zamana bölünmesiyle bulunur.

4. BOR ÇELİĞİ

Bu bölümde tezin deneysel kısmından bahsedeceğiz. Deneylerimiz balistik inceleme esaslıdır. Deneylerde kullanılan çelik sac İsveç SSAB firmasına ait Docol Sertleştirilebilir Bor Çeliğidir. Bu çeliğe balistiklik özelliğini kazandırabilmek için öncelikle elektrik direnciyle ısıtılıp ani soğutma işlemine tabi tutuldu. Bu işlem için Maslak İTÜ KOSGEB' de MetalForm Müh. Tasarım İml. San. Ltd. Şti. firmasıyla birlikte çalışıldı. Ardından Atlas Güvenlik firmasına ait özel bir poligonda kurşungeçirmezlik özellikleri üzerinde balistik deneyler yapıldı ve sonuçlar incelendi. Şimdi kullanılan çeliğin özelliklerinden, deneylerden ve sonuçlarından detaylı olarak bahsedelim.

4.1. Bor ve Özellikleri

Çeliğin bileşiminde, ismini aldığı Bor elementinin büyük etkisi vardır. Böylece öncelikle Bor elementinin özelliklerinden bahsederek bu konuyu açalım:

Bor elementi, periyodik sistemin 3.grubunun başında yer alır. Elmastan sonra en sert madde olan ametal bor gri-siyah kristalin veya amorf mikrokristalin, yeşilimsi sarı renkli bir yapıda olup başlıca özellikleri aşağıdaki gibidir.

Periyodik Sırası : 5

Atom ağırlığı : 10.811 ± 0.005 g/mol

İzotopları

-B10 : % 19.57

-B11 : % 80.43

Kristal Yapısı : Hekzagonal

Yoğunluğu

-Kristalin : 2.33 g/cm^3

-Amorf : 2.34 g/cm^3

Erime Noktası : 2190 °C (-20 °C)

Kaynama noktası: 2500˚ C

Atom yarıçapı : 0.98

Sertliği : 9.3 Mohs

Bor' un oda sıcaklığında pek zayıf bir elektrik iletkenliği vardır. Fakat temparatür arttırıldığında iletkenliği de çok artar.

4.2. Bor Çelikleri

Tez çalışmalarında ve deneylerimizde kullandığımız çelik Bor Çeliğidir. Bor çelikleri; 20-50 ppm seviyelerinde borun çeliğe alaşımlandırılmasıyla elde edilen iyi sertleşebilir çeliklerdir. Bor; östenitten ferrit fazına geçişi geciktirir. Buradan 900-500 ^{0}C aralığında yapılan soğutma oranının bor içermeyen karbon çeliklerine oranla sertleşme için daha yavaş olabileceği sonucu çıkar. Bunun yanında borun östenitten beynite dönüşümde belirli bir etkisi de yoktur.

Bor, çeliklerde östenitin Ferrit ve Perlit'e dönüşme hızını keser; fakat karbon miktarı arttıkça hız kesme etkisi de azalır. Dolayısıyla çeliğin sertlik alma kabiliyeti de düşer. Bu bakımdan çelikte Bor elemanının ötektoit altı çeliklerde sertleştirme etkisi daha yüksektir. Çelikte, Bor elemanı östenit dönüşme hızını azaltmasına mukabil, Ferrit ve ara kademe kristallerin (beynit) büyüme hızına etkisi yoktur. Doğrudan doğruya sertleştirilen (sementasyon ısısından) çeliklerde sertlik verme etkisi esas itibariyle Martenzit yapmasından ileri gelmektedir. Borun Martenzit teşekkülü sıcaklığına tesiri de olmadığından, çeliğin sertleşme kabiliyeti çok yükselmekte ve su verme esnasında çatlama tehlikesi de artamaktadır.

Bor elemanının çeliklerde sertleşme derinliğini ve sertlik alma kabiliyetini arttırması, çeliğin içinde mevcut C miktarı ile ters orantılı olduğu ve C miktarı %

0,90 olan çeliklerde Bor elemanının çeliğe hiç bir sertleşme özelliği vermediği görülmüştür. Bu bakımdan Bor alaşım denemelerinin esas ağırlık merkezi, karbonu düşük olan sementasyon ve Islah çelikleri üzerine yönelmiştir. Bilhassa Islah çeliklerinde Bor katımı (çeliğin mekanik özelliğine hiç bir kötü tesir yapmadan) diğer değerli alaşım elemanlarından çok tasarruf edilebileceğini göstermiştir. Bu durum tezimizde kullandığımız Bor çeliklerinde düşük-orta karbon içeriğiyle doğru tercih yapıldığını göstermektedir.

Çeliklerde Bor, östenit kristal tanelerinin irileşmesine yardım edebilir. Bunu önlemek için de çeliğe dezoksidasyon vasıtası olarak verilen alüminyum miktarını arttırmakla beraber çeliğin içine katılan Bor ile birlikte Titan, Zirkon veya Vanadin ilave etmek lazımdır. Bu alaşım elementleri deneylerimizde kullandığımız Docol Bor çeliklerinde de bulunmaktadır.

Borun, çeliğin bileşimine etkilerinden sonra şimdi de çeliğin fiziksel ve kimyasal özelliklerinden, kullanım yerlerinden ve oransal değişiminden bahsedelim:

Bor alaşımlı çeliklerde diğer alaşımlı çeliklere nazaran, su verme sıcaklığı yükseldikçe sertleşmenin azaldığı görülür.

Bor alaşımlı sementasyon çeliklerinde çok yüksek sıcaklıkta tavlama veya fazla C vermek suretiyle sementasyon yapma Bor elemanının sertleştirme özelliğinin kaybolmasına sebep olur. Bu gibi hallerde semente edilmiş çelik eğer ağır soğutulur ve su vermeden evvel 840 ^{0}C de tekrar tavlanırsa, çeliğin sertlik alma özelliğinin arttırılması yeniden sağlanabilir.

Sementasyon ve İslah çelikleri gibi imalat çeliklerine alaşım elemanı olarak katılan Bor, çeliğin soğuk ve sıcak işleme özelliğini asla bozmaz. Bor çelikleri dövüldükten sonra uygun ısıl işleme tabi tutulacak olursa, diğer alaşımlı ve karbonlu çeliklere nazaran daha kolay, yüksek kesme hızı ile ve derin talaş alma suretiyle işlenebilir. Keza tav oksitleri, Bor çeliklerine diğer halitalı çeliklerde olduğu gibi kuvvetli yapışmadığından Bor alaşımlı çeliklerden yapılan dövme kalıp dövme gezenklerin ömürleri de uzun olur.

Süratli kesme çeliklerine, mesela % 18 W, % 4 Cr ve % 1 V çeliğine Bor katımı sertleşmeyi ve kesme gücünü artırsa da dövmeyi güçleştirmesi bakımından pek

tercih edilmez. Yüksek oranda Bor katıklı çelikler ise fevkalade gevrek olduğundan genel olarak makina imalat parçalarında kullanılmazlar. Yalnız % 4 Bor alaşımlı çelik Nükleer reaktörlerde nötron muhafazasında ayar çubukları olarak kullanılır. Bor elemanı nötron için yüksek bir absorbsiyon kesiti ihtiva ettiğinden reaktörlerde nötronları frenleyecek ve onu absorbe edecek en iyi ve en ucuz bir malzeme olarak Bor çelikleri kullanılmaktadır. İçinde % 4,75 ten fazla Bor bulunan çelikler ise dövülmeye elverişli değildir. Bazı dökme demirlerde Bor miktarı % 6 ya kadar çıkabilir. % 2-4 arasında Bor bulunan çeliklerin dövülebilmesi için çelikte muayyen bir oranda Alüminyum mevcut olması lazımdır.

Paslanmaz çeliklerin, sertliğini ve ısıya karşı dayanımını arttırmak için Bor ilave edilir. % 18 Cr ve % 8 Ni alaşımlı paslanmaz çeliklerde % 1,25 - 1,50 kadar Bor bulunabilir. Daha fazla Bor katımı paslanmaz çeliğin dövülme kabiliyetini azalttığından kullanılmaz. Kopma dayanımı bakımından en uygun Bor oranı % 1 dir. Bor miktarı % 1,5 e yükseldikçe kopma dayanımı da düşer.

Dökme demirde Bor miktarı pek ender ve özel maksatlar için % 0,005 in üstündedir. Bor, döküm demirinde grafit ayrışmasını önlediğinden beyaz demir teşekkülüne yarar. Sert döküm imalinde ve dökümün aşınmaya karşı dayanıklığını arttırmak için katık olarak kullanılır ve dökme demire % 0,01 kadar karıştırılır; keza fazla aşınan yerlerin kaynak edilmesinde Nikel ve Bor alaşımlı beyaz döküm demiri kaynak alaşımı olarak kullanılır. Hadde merdanelerinin dökümünde yüzey sertliğini arttırmak ve beyaz kristaller halinde donmasını sağlamak için, döküme % 0,02–0,1 kadar Bor katılır. Normal kır dökümlerde (Esmer dökme demirlerde) Bor arzu edilmeyen işleme sertliğini yaptığı ve çatlamalar meydana getirdiği için kullanılmaz. Bu gibi dökümlere ekseriya emayeli hurda kapların eritilmesinden geçen Bor elemanını eritme esnasında yakarak uzaklaştırmak lazımdır.

Temper dökümlerinde % 0,001 – 0,005 kadar Bor dökümde, mevcut grafitin küreler şeklinde teşekkülünü ve grafit taneciklerinin iyi dağılmasını sağlar. Keza temper dökümün ısıl işlemini de kolaylaştırır. Bu bakımdan ve hurdalardan geçerek temper dökümüne fena tesir yapan kromun zararlarını önlemek için genel olarak temper dökümlerine bir miktar Bor katımı faydalıdır.

Bor alaşımlı çeliklerde sertleşme derinliğinin ve sertlik alma derecesinin yüksek

oluşu dolayısıyla doğrudan doğruya su verme, bilhassa kenar sınırlarda kalan bakiye östenit teşekkülünün zararı kaldırılmış olduğundan büyük ölçü ve çaptaki makina parçalarının imaline de elverişli bulunmaktadır ve 20MnCr5 tipi çeliklerin yerine kullanılabilmektedir. Bor çeliklerinde; sertlik, dayanım, aşınmaya karşı direnç için çeliğin ince taneleri arasına ortayüksek veya yüksek karbon içeriği nüfuz ettirilir.

Bu noktada ülkemizdeki Bor yatakları ve kullanımı hakkında kısa bir bilgi vermek istersek:

Türkiye'de bilinen başlıca borat yatakları Batı Anadolu'da yer almakta ve bu yataklar dünya rezervinin % 60–70' ine sahip bulunmaktadır. Türkiye rezervlerinin % 37'si Bigadiç, % 34' ü Emet, % 28' i Kırka ve %1' i Kestelek bölgesinde bulunmaktadır.

Bigadiç işletmesinde başlıca bor mineralleri kolemanit ve üleksittir. Boratlar 1–8 m kalınlıkta tabakalar halinde killer arasında yer alırlar. Kapalı ve açık ocaklardan üretilen tüvenan cevherler 600000 ton / yıl tüvenan cevher yıkama kapasiteli konsantratörlerde zenginleştirilerek, 25–125 mm, 3–25 mm kolemanit konsantreleri ile 3 – 125 mm ve 0,2 – 3 mm üleksit konsantreleri elde edilir.

Ancak Bor mineral ve bileşiklerinin ülkemiz içinde kullanılması çok kısıtlıdır. Kırka (Eskişehir) ve Bandırma (Balıkesir) da yer alan tesislerde bor cevherleri rafine ürüne dönüştürülmektedir. Bugün Türkiye' nin bor gelirleri sadece 250 milyon dolar. Bor madeni ve ürünlerini kullanan çok sayıdaki sanayi kuruluşunun hiçbiri Türkiye'de değil. Hammadde olarak büyük ölçüde Türkiye'ye bağlı bu sanayilerin Türkiye'de kurulmasının, ülke ekonomisine sağlayacağı katma değer milyarlarca dolarla ifade edilebilir.

4.3. Docol Bor Çelikleri

Deneylerimizde kullandığımız bor çeliği, İsveç SSAB firmasından getirtilen ve sınıf olarak Sertleştirilebilir Docol Bor Çeliği sınıfına giren çeliktir.

Docol Bor Çelikleri adından da anlaşılabildiği gibi sertliklerini arttırabilmek için düşük oranda bor ile alaşımlandırılmışlardır. Bu çelikler kolaylıkla sertleştirilebilirler ve genellikle sonradan tavlama işlemi yapılmadan kulanılabilirler.

TS 2525-3 EN 10083-3 Su Verilmiş ve Menevişlenmiş Çelikler(Islah Çelikleri) ve Borlu Çeliklerin Teknik Teslim Şartları başlığı altında bu çeliklere ait uluslararası standarta ulaşabilirsiniz.

Docol Bor Çelikleri, ince taneli ve sertleştirmeye müsait çeliklerdir. Bu çelikler sertliği arttırmak için küçük bir oranda Bor ile alaşımlandırılmıştır. Bor çelikleri kolaylıkla sertleştirilebildiklerinden çoğunlukla son temperleme yapılmadan kullanılırlar.

Deneylerimizde kullandığımız Bor Çeliği malzeme Docol 22MnB5 tir. İçeriğinde:

C 0.228 %

Si 0.28 %

Mn 1.22 %

P 0.014 %

S 0.006 %

N 0.0025 %

Cr 0.2 %

Ni 0.04 %

Cu 0.01 %

Mo 0 %

Al 0.058 %

Nb 0.001 %

V 0.014 %

Ti 0.037 %

B 0.0031 %

bulunmaktadır. Bu çeliğin akma dayanımı 388 Mpa, çekme dayanımı ise 517 Mpa dır. Uzaması % 22 dir.

Bu çelik uygulamalarda sertlik ve dayanımın ön plana çıktığı birçok alanda kullanılır. Kaplama malzemesi ve yüksek dayanımlı oluşu bunda etkendir. Darbe aletleri olarak, destek demiri, bıçak sektöründe ve otomotiv sanayiinde araçların güvenlik konsollarında... kullanılmaktadır.

Bu çelikler soğuk haddeleme ve tavlama işlemlerinden geçirildikten sonra piyasaya sürülmektedirler.

Docol bor çelikleri için tavsiye edilen kaynak metodu elle yapılan metal ark kaynağı(MMA) ve gaz metal ark kaynağı(GMAW) dır. Docol 20 MnB5, Docol 30MnB5, Docol 27 MnCrB5 ve Docol 33MnCrB5 çelikleri ısıtmadan kaynak yapılabilen Docol çelikleridir. Docol Bor Çeliklerini kaynak ederken seçilen dolgu malzemesi önemli bir konu teşkil eder. Bu dolgu malzemesinin düşük hidrojen içerikli olması önemlidir ve MMA kaynağında bazik elektrot kullanımı tavsiye edilir.

Eğer mümkünse kaynak, sertleşmeden önce tamamlanmalıdır. Eğer kaynak, sertleşmeden sonra tamamlanırsa daha yüksek sertlikte dolgu metalleri kullanılarak kaynakla ana malzeme (Docol) arasındaki sertlik farkı azaltılır. Düşük gerilimli noktalar kaynaklanıyorsa düşük dayanımlı dolgu metallerinin kullanımı uygundur. Bunlar aşağıdaki tabloda görülmektedir.

Kaynağın, yükün en az olduğu yerlere yapılması ve yumuşak, acele edilmeden yapılması son derece önemlidir.

Docol Bor Çelikleri iyi şekil alırlar. Tavlanma esnasında bükülebilme özellikleri vardır. Deneylerimizde kullandığımız Docol Bor Çeliği sınıfı için uygun sertleştirme sıcaklığı 890 ^{0}C – 920 ^{0}C aralığındadır. Daha yüksek karbon içerikli alaşımlar için daha düşük sertleştirme sıcaklığı değerleri geçerlidir.

4.3.1. Zaman Sıcaklık Soğuma Diyagramı

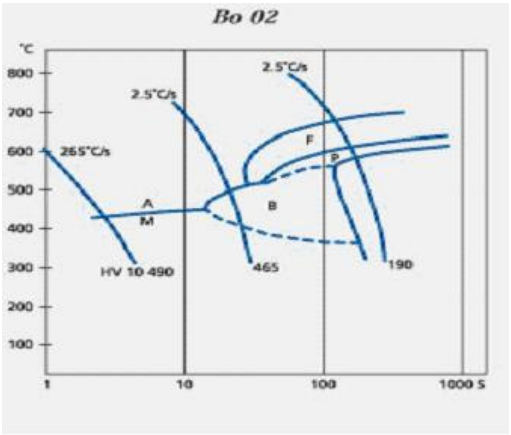
Aşağıdaki şekilde Bor Çeliğine ait zaman sıcaklık dönüşüm diyagramı görülmektedir. Şekli yorumlayacak olursak:

Burada A harfi ile kaplı alan östenitik faz bölgesini, B harfi beynitik yapıya ait bölgeyi, M harfi martenzitik bölgeyi, F harfi ferritik ve P harfi perlitik bölgeyi göstermektedir. Öncelikle çelik östenitik bölgede 900 ^{0}C civarında bir sıcaklığa kadar çıkarılır. Ardından şekilde de görüldüğü gibi hangi yapı elde edilmek isteniyorsa ona ait soğuma hızı ve süre takip edilir. Örneğin martenzitik yapı isteniyorsa çok hızlı soğutma yapmak gereklidir. 265 ^{0}C/s soğutma hızıyla yaklaşık 5 saniye süren hızlı bir soğutma ile martenzitik yapı elde edilir. Bu yapıda ölçülmüş HV 10 sertlik değeri ise 490 olarak görülmektedir. Aynı şekilde beynitik yapı elde etmek için uygun olan soğuma hızına bakacak olursak 25 ^{0}C/s lik bir soğuma hızı bizi beynitik yapıya götürecektir. Yine 900 ^{0}C lik bir östenitik sıcaklığa çıkıp soğutma işlemi uygundur.

Çalışmalarımızda beynitik yapı elde edebilmemiz büyük önem arzettiği için üzerinde biraz daha durarak aşağıdaki formüle ulaşıldı. Buna göre:

$$B_s(°C) = 830 - 270(\%C) - 90(\%Mn) - 37(\%Ni) - 70(\%Cr) - 83(\%Mo) \quad \textbf{(4.1)}$$

bizi Docol 22MnB5 malzemesi için gerekli beynitik yapının yaklaşık başlangıç sıcaklığına(643^{0}C) götürecektir.



Şekil 4.1: Docol bor çeliğine ait TTT diyagramı[27].

4.3.2. Yağ İle Soğutma

Martenzitik yapı elde etmek için daha düşük hal değiştirme sıcaklığı ve çabuk soğutan yağ tercih edilir. Eğer beynitik yapı isteniyorsa da; düşük soğutma oranına

sahip ve daha yüksek hal değişim noktası olan yağ tercih edilir.

Yağ ile soğutma su ile soğutmaya göre daha yavaş olduğundan malzemenin sertliği daha düşük olur. Bunun yanında deformasyon ve çatlakların oluşumunda azalma görülür.

Yağın soğutma kabiliyetini, yağ karıştırarak veya sıcaklığını 50-80 ^{0}C ye çıkararak artırabiliriz.

4.3.3. Emülsiyonlu Soğutma

Su ve yağ karışımının soğutma kabiliyeti saf yağa oranla daha düşüktür.

4.3.4. Polimer İçerikli Soğutma

Su ve polimer içerikli malzeme ile yapılan soğutma, % karışım oranına bağlı olarak su ile yağ arasında bir soğutma hızına sahiptir. Polimerik içeriğin daha yüksek oranlarında (yaklaşık %20) soğutma kabiliyeti yağa benzer özellik gösterir. Daha düşük konsantrasyonlarda ise daha yüksek soğutma oranı sağlanır. Bor Çelikleri için % 5-10 arasında polimer içeriği tavsiye edilir. En iyi soğutma kabiliyeti 20 ^{0}C lik bir karışım banyo sıcaklığında elde edilir. Banyo sıcaklığının 45 ^{0}C yi geçmemesi tavsiye edilir. Banyoyu karıştırmak soğuma kabiliyetini arttırır. Polimer içeriği ile su karışımı, konsantrasyon ve PH değeri açısından sık sık kontrol edilmelidir. PH değeri 7.5' in altına düşmemelidir.

4.3.5. Su İle Soğutma

Katışıksız su yüksek sertleştirme hızı verir. Yaklaşık % 10 oranında bir NaCl eklentisi soğutma kabiliyetini arttırır ki kalın metallerin soğutulmasında avantaj sağlar. Su ile sertleştirmede uygun banyo sıcaklığı 20 – 40 ^{0}C aralığındadır. 60 ^{0}C' nin üzerindeki sıcaklıklar su ile soğutma için uygun değildir.

4.3.6. Tavlama

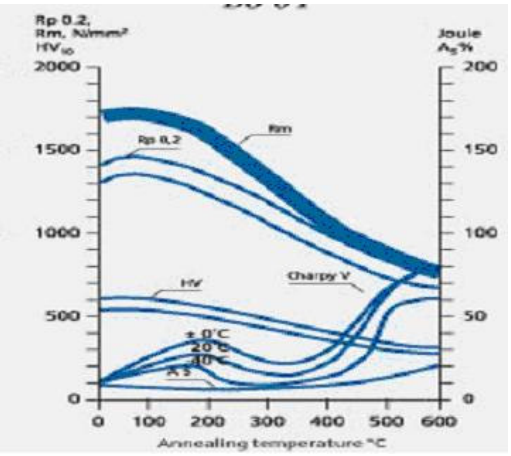
200 ^{0}C civarında tavlama yapmak çeliğin tokluğunu sertliğini azaltmadan artıracaktır. Bu sebeple tavlama yapılması tavsiye edilen bir ısıl işlemdir. 250-400 ^{0}C aralığında tavlama, yapıda küçük çatlakların artmasına ya da kalmasına sebep

olabilir. Bununla birlikte bu aralıkta yapılan tavlamanın sünekliği artırdığı görülmektedir. Malzemenin bu aralıkta yapılan tavlama sonucunda maksimum uzamaya eriştiği görülmüştür.

4.3.7. Hidrojen Elenmesi

Elektrolitik yüzeylerin çelikle teması sırasında yapıya hidrojen geçebilir. Bu durum çeliğin kırılganlığını artırır. Hidrojeni çelikten elemek için 170 ^{0}C de 15 saat veya 200 ^{0}C de 5 saat bekletmek uygundur. Bazı durumlarda daha yüksek sıcaklıklara çıkmak gerekebilir. Bu sırada oluşabilecek oksidasyonu önlemek için koruyucu gaz kullanımı uygundur.

Aşağıdaki şekilde kullandığımız Bor Çeliğine ait tavlama sıcaklığı, sertlik değerleri, dayanım eğrileri görülmektedir.



Şekil 4.2: Su ile soğutulup tavlanan bor çeliğine ait mekanik özellikler[27]

Şekilde malzemenin tavlama sıcaklığı arttıkça akma ve kopma dayanımında azalma gözlenmektedir. Sertliğe bakacak olursak tavlama sıcaklığıyla birlikte çok fazla değişmemekle birlikte ufak bir düşüş eğrisini görmekteyiz.

4.3.8. Makasla Kesme

Aşağıdaki değerler Docol Bor Çelikleri için pürüzlülük değerleri düşük olan kesme yüzeyleri sağlar. Tablolarda yüzey pürüzlülüğü sac metalin kalınlığının % ifadesi olarak görülmektedir.

Tablo 4.1: Docol bor çeliği % kesme yüzeyi pürüzlülüğü[28].

SERTLEŞTİRİLMİŞ BOR ÇELİĞİ		
Sac Kalınlığı	Kesme Açısı	Kesme Yüzeyi Pürüzlülüğü
(mm)	(derece)	(100%)
Max 1,25	0-3,5	18-20
1,25-2,25	0-3,5	14-16
2,25-3,25	0-3,5	10-12
SOĞUK HADDELENMİŞ BOR ÇELİĞİ		
Sac Kalınlığı	Kesme Açısı	Kesme Yüzeyi Pürüzlülüğü
(mm)	(derece)	(100%)
Max 1,25	0-3,5	approx. 12
1,25-2,25	0-3,5	approx. 10
2,25-3,25	0-3,5	approx. 10
YUMUŞAK TAVLANMIŞ BOR ÇELİĞİ		
Sac Kalınlığı	Kesme Açısı	Kesme Yüzeyi Pürüzlülüğü
(mm)	(derece)	(100%)
Max 1,25	0-3,5	9 - 10
1,25-2,25	0-3,5	8 - 9

2,25-3,25	0-3,5	7 - 8

4.3.9. Zımbalama

Zımbalama; Docol Bor Çeliklerinde temiz bir kesme yüzeyi, iyi boyutsal doğruluk ve son derece küçük eğrilik verir. Bu işlemden önce dikkat edilmesi gereken nokta küçük kesme çapları tercih etme ve sacın basılması esnasında yeterli sıkıştırmanın sağlanmasıdır. En iyi sonuç sementitin küresel geometride olduğu ve yapı içinde düzgün dağıldığı yumuşak tavlanmış malzemelerde ortaya çıkar.

Zımbalama esnasında yağlayıcı kullanılması uygundur. Aşağıdaki tablo zımbalama için kesme pürüzlülüğü değerlerini verir.

Tablo 4.2: Zımbalama için kesme pürüzlülüğü değerleri[28]

Diameter of punch	Cutting clearance(%)
> 1,2 x t	0,5
0,8 x t - 1,2 x t	1,0
0,6 x t - 0,8 x t	1,2

4.3.10. Uygun Takım Malzemesi

Sertleştirilmiş Docol Bor Çeliklerine uygulanan kesme ve talaş kaldırma işlemleri için takımın sertliği 62-64 HRC ye çıkmalıdır. Bununla birlikte soğuk haddelenmiş veya yumuşak tavlanmış Bor Çeliklerinde takım için 58-62 HRC yeterlidir. Bor çeliğinin sertliği arttıkça takımın da sertliğini arttırmalıyız. Titanyum karbit(TIXON) ile kaplanan takımların ömrü daha uzun olur.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tezin deneysel boyutuna geçerek çalışmamıza devam edelim. Öncelikle yaptığımız deneysel çalışmaların birbirini takip eden işlem sırasından bahsedelim:

1. İsveç SSAB firmasından yukarıda detaylarını verdiğimiz Docol 22MnB5 bor çeliği sac kalıplar halinde getirtildi.

2. İTÜ Maslak KOSGEB MetalForm Müh. Tasarım İml. San. Ltd. Şti.' nde bor çeliğine ısıl işlem uygulandı.

3. Bu işlemin ardından son halini alan bor çeliğine Atlas Güvenlik firmasında balistik kurşun geçirmezlik testi yapıldı.

4. Kurşun geçirmezlik deneylerinden sonra numuneler malzeme özelliklerinin tesbiti için gerekli malzeme deneylerine tabi tutuldu. Bu deneyler:

    - Sertlik deneyi
    - Mikroyapı incelenmesi
    - Çekme deneyi

Şimdi bu maddeleri detaylandırarak deneysel çalışmalarımızı inceleyelim ve yorumlayalım:

1. İsveç SSAB firması Docol 22MnB5 Bor Çeliğini üreten firmalardan biridir. Ürettiği Bor Çelikleri dayanım, sertlik ve şekil değiştirme kabiliyetlerinin yüksek olmasıyla uygulamalarda sertlik ve dayanımın ön plana çıktığı birçok alanda kullanılır. Darbeli çalışma tezgahlarında, destek demiri, bıçak sektöründe ve otomotiv sanayiinde araçların güvenlik konsollarında... kullanılmaktadır.

2. Tezimizde kullandığımız Docol 22MnB5 çeliğine elektrikle ısıtma yoluyla ısıl

işlem uygulandı. Bu işlem İTÜ KOSGEB Maslak MetalForm Müh. Tasarım İml. San. Ltd. Şti. ile ortak çalışma yürütülerek yapıldı.

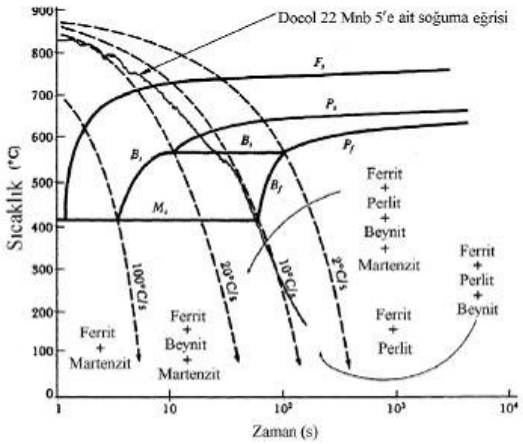
İşlemin esası sac üzerinden elektrik akımı geçirilmesi neticesinde sacın gösterdiği dirençle ısınmasına dayanır. Sac iki ucundan iletken elektrotlarla tespit ettirilir ve bu sayede elektrik akımının elektrotlar üzerinden saca aktarılması ve sacın üzerinden geçerek elektrik devresinin tamamlanabilmesi amaçlanır.

5.1. Elektrikle Isıtma Prosesi

Malzemenin rekristalizasyon sıcaklığının üstünde bir sıcaklıkta şekillendirilmesi olayına "sıcak şekillendirme işlemi" denir. Günümüze kadar sıcak şekillendirme işlemi fırın içinde malzemenin ısıtılmasıyla sağlanıyordu. Günümüzde sıcak şekillendirme için İTÜ KOSGEB Maslak' ta MetalForm Müh. Tasarım İml. San. Ltd. Şti. tarafından geliştirilen, daha sonra benzer çalışmaları başka ülkelerde de denenmeye başlayan elektrikle ısıtma ve anlık şekil verme işleminin daha başarılı ve hızlı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Fırında ısıtma işleminde metalin fırından çıkarılıp şekillendirme için pres makinasına götürülene kadar ısı ve zaman kaybettiği gözlenmiştir. İş parçasının boyutları, kalınlığı/uzunluğu arttıkça kayıp da artar. Diğer taraftan bunun için kullanılan fırınların büyük yer kaplaması ve yüksek maliyetli oluşu da bir dezavantajdır.

Balistik deneylerimiz için kullandığımız Docol 22MnB5 saca yapılan ısıl işlem elektrikle ısıtma prosesidir. Prosesin işleyişi elektrik akımı esaslıdır. Trafodan düşük gerilimde yüksek akımda elektrik üretilir. Buradan hidrolik preste oluşturduğumuz düzenekle krom alaşımlı yüksek iletkenlikte 2 elektroda akım 4000 Amper civarında ulaştırılır. Bu arada 2 elektrod pnömatik bir sistem vasıtasıyla Docol 22MnB5 Bor Çeliği sacı sıkıştırır. Sac, üzerinden geçen akıma direnç göstererek ısınmaya başlar. Kısa sürede(4 saniye gibi) rekristalizasyon sıcaklığının üstüne 900-1000 ^{0}C sıcaklığa kadar çıkılır. Isıtma işlemi tamamlandıktan sonra hidrolik presle şekillendirme ve "press hardening" dediğimiz soğutma işlemi yapılır. Akımın süresi, üst kalıbın hareket başlangıcı, hızı ve süresi, şekillendirmenin kaç saniye süreceği... bütün bu işlem parametreleri elektronik bir kontrol ünitesiyle kontrol edilir.



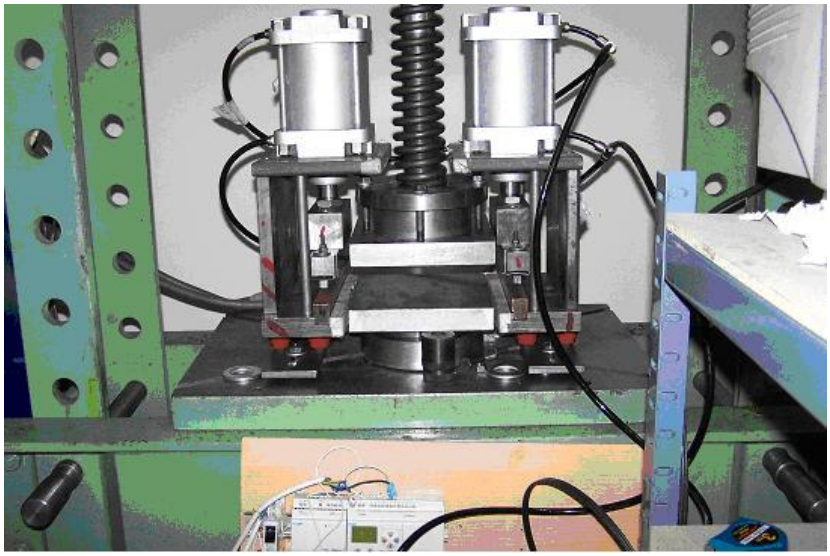
Şekil 5.1: Docol 22MnB5 soğuma eğrisi

Dikkat edilmesi gereken nokta bor çeliğinin rekristalizasyon sıcaklığının üzerinde östenit bölgesine çıkarılmasıdır. Ancak bu şekilde işlem sıcak şekillendirme adını alır.

Otomotiv endüstrisinde karoseri imalatında kullanılan saclar bu işlem için çok uygundur. Bu prosesle malzemenin dayanımı arttığı için araç karoserinde ağırlık tasarrufuna gidebilmek mümkün olmaktadır. Bu da yakıt tasarrufu, çevre kirliliğinde azalma, aracın çabukluğu gibi etkenlere çok olumlu sonuçlarla yansır.

Otomotiv endüstrisinde dikkat edilecek bir nokta da karoserinin çarpılma ve gerilmelere maruz kalmaması gerektiğidir. Özellikle elektrikle hızlı ısıtma ve soğutma işleminde bu durum daha önemli hal alır.

Soğutma işlemi kalıpla sağlandığı için her basma işleminden sonra kalıp, sacdan iletimle ısınma yoluyla bir miktar ısı çeker ve ısınır. Her prosesten sonra kalıbın tekrar soğumasını beklemek gerekir. Eğer pres üst kalıbının hızı daha düşük ayarlanırsa iş parçasının konstrüksiyonunda da bazı ayarlamalara(yuvarlatma ve düz yüzeyler kullanma) gidilmesi gerekebilecektir.



Şekil 5.2: Elektrikle ısıtma prosesi hidrolik pres tezgahı ve kontrol ünitesi

Bilindiği üzere hızlı soğutma ve hızlı şekillendirme çeliklerde boyun verme dayanımında artış sağlar. Hızlı soğutma ve şekil verme işleminin kalıplar arasında olması ve sınırlandırılmasıyla birlikte sacda boyutsal bir değişim ve çarpılma görülmez. Bu sayede tüm yüzey boyunca düzenli bir şekil değiştirme sağlanır. Bu da uzamaya olumlu etki yapar. Bu durumun ve elektrikle anlık ısıtmanın balistik bir malzemedeki etkilerinden ileride bahsedeceğiz.

Bu prosesin ısı enerjisi ve elektrik enerjisinin birbirine dönüşümüne bağlı teorik yaklaşımı aşağıdaki denklemde görülmektedir.

$$R.(1+\alpha'.\Delta T).I^2 = [m.c.\Delta T] + \left\{2.A.4{,}96.k.\left[\left(\frac{T_s}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_e}{100}\right)^4\right]\right\} + A.\alpha.\Delta T \qquad \textbf{(5.1)}$$

Yukarıdaki denklemde; iş parçası içinde akımla üretilen ısı enerjisi = İş parçasının kütlesine bağlı soğurulan ısı enerjisi + rasyasyonla kaybedilen ısı enerjisi + konveksiyonla kaybedilen ısı enerjisi ne eşittir.

Burada da görülen en önemli nokta ısının, sıcaklığın dördüncü kuvvetine bağlı olarak değiştiğidir.

Bu formül ile proses sürecinde herhangi bir andaki sıcaklığı hesaplayabiliriz. Pratik anlamda sıcaklık ölçümünü lazer okuyucu ile yaptık. Deney şartlarımızda aşağıda göreceğimiz eğrileri elde ettik.

5.1.1. Deney Şartları

Docol 22MnB5 sacına uyguladığımız ısıl işlem yukarıda bahsettiğimiz gibi elektrikle ısıtma esaslı olduğu için deneylerimizde amper esaslı sınıflandırma yapıldı.

3800, 3900, 4000, 4100, 4200(a), 4200(b), 4300 Amper' lik akımlarda 7 numune hazırlandı ve bu numunelerin ayrı ayrı balistik özellikleri incelendi. Şimdi numunelere uygulanan ısıl işleme ve işlem parametrelerine değinelim.

- Numune saclar 60*250*1,4 mm ölçülerinde kesilip hazırlandı.
- Numuneler tezgaha(hidrolik pres) bağlanırken saca yukarı doğru 15 mm bombe verildi. Bunun sebebi hızlı ısıtma esnasında ısınan sacın genleşmesiyle aşağı doğru kıvrılıp alt kalıba temasını engellemektir.
- Hidrolik presin alt üst kalıpları arasındaki uzaklık 120 mm olarak ayarlandı.
- Sac 4 saniye ısıtıldı.
- Hidrolik pres üst kalıbı 5 s de aşağıya inecek hızda ayar yapıldı.
- Hidrolik pres 5 s kilitli kalmaya ayarlandı. Yani şekillendirme ve soğutma işlemi hidrolik presin alt ve üst kalıplarının 5 s birbirine yapışık kalmasıyla sağlandı.

Elektrikle ısıtma prosesinde kullanılan hidrolik pres Türk Malı Hidroliksan marka Konya yapımıdır. Dijital Kontrol Ünitesi Dengensha Kawasaki Japon malıdır. Trafo Coşkunöz markadır.

5.1.1.1. Deney Şartları

Birinci deneyimizde numunemiz 3800 Amper akımda ısıl işlem uygulanarak hazırlandı. Kalıpta soğutuldu.

Akım I : 3800 Amper

Isınma çevrimi : 2*99 çevrim

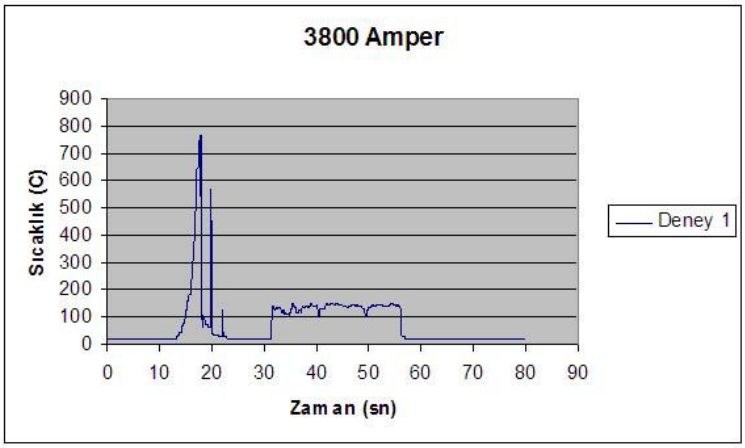
Soğutma : 1 çevrim

Isınma zamanı : 2*99+1 ≈ 4 s

Kalıpla soğutma: 5 s

Aşağıdaki şekilde bu şartlarda yapılan ısıtma, şekillendirme ve soğutma işlemine ait zaman-sıcaklık eğrisini görmekteyiz. Buradan sacın, östenitik bölgeye kadar ısınıp, ardından kalıp içinde hızla soğutulduğu net olarak görülmektedir.

Şekil 5.3' te de görüldüğü gibi Docol 22MnB5 sacı 4 saniye boyunca 3800 Amperlik bir akıma maruz bırakılmıştır. 13,5–17,5 saniye aralığının sonunda 22,5 ^{0}C oda sıcaklığındaki sac 765 ^{0}C civarında maksimum sıcaklığa ulaşmıştır. Buradan ısınma hızını hesaplarsak 185,6 ^{0}C/s gibi yüksek bir değere ulaşırız. Kalıpta soğutma da sacda şok etkisi yapacak kadar hızlıdır. Şekil 5.3' teki eğrinin sağ tarafına bakacak olursak bu durumu daha rahat anlarız. Yaklaşık olarak 22. saniyenin sonunda sacın sıcaklığı 765 ^{0}C den yaklaşık 126 ^{0}C sıcaklığa kadar düşmüştür. Kalıpta soğuma hızı 127,8 ^{0}C/s olarak hesaplanır.



Şekil 5.3: 3800 Amper akımda sıcaklık- zaman eğrisi

İkinci deneyimizde numunemiz 3900 Amper akımda ısıl işlem uygulanarak hazırlandı. Kalıpta soğutuldu.

Akım II : 3900 Amper

Isınma çevrimi : 2*99 çevrim

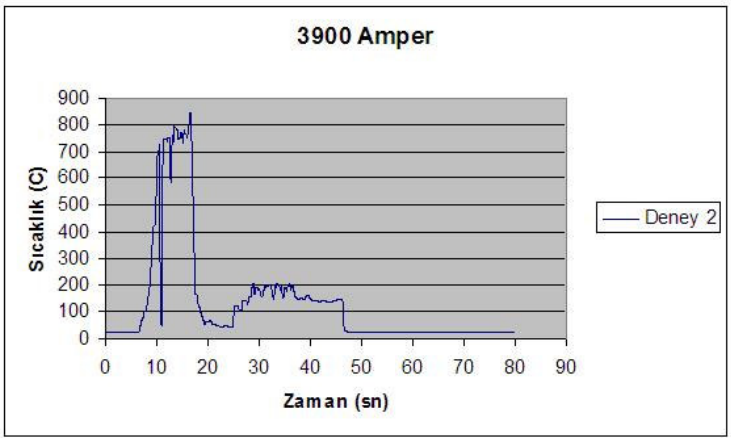
Soğutma : 1 çevrim

Isınma zamanı : 2*99+1 ≈ 4 s

Kalıpla soğutma: 5 s

Aşağıdaki şekilde bu şartlarda yapılan ısıtma, şekillendirme ve soğutma işlemine ait zaman-sıcaklık eğrisini görmekteyiz. Buradan sacın, östenitik bölgeye kadar ısınıp, ardından kalıp içinde hızla soğutulduğu net olarak görülmektedir.

Şekil 5.4' te görüldüğü gibi Docol 22MnB5 sacı 4 saniye boyunca 3900 Amperlik bir akıma maruz bırakılmıştır. 6,5–10,5 saniye aralığının sonunda 25 ^{0}C oda sıcaklığındaki sac 725 ^{0}C civarında sıcaklığa ulaşmıştır. Ardından saca etki eden iç gerilmelerle 845 ^{0}C de maksimum sıcaklığa çıkmıştır. Buradan ısınma hızını hesaplarsak 175,3 ^{0}C/s gibi yüksek bir değere ulaşırız. Kalıpta soğutma da sacda şok etkisi yapacak kadar hızlıdır. Şekil 5.4' teki eğrinin sağ tarafına bakacak olursak bu durumu daha rahat anlarız. Yaklaşık olarak 16,5. saniyede başlayan kalıpla soğutma işlemi sonunda sacın sıcaklığı 845 ^{0}C den yaklaşık 205 ^{0}C sıcaklığa kadar düşmüştür. Kalıpta soğuma hızı 128 ^{0}C/s olarak hesaplanır.



Şekil 5.4: 3900 Amper akımda sıcaklık- zaman eğrisi

Üçüncü deneyimizde numunemiz 4000 Amper akımda ısıl işlem uygulanarak hazırlandı. Kalıpta soğutuldu.

Akım III : 4000 Amper

Isınma çevrimi : 2*99 çevrim

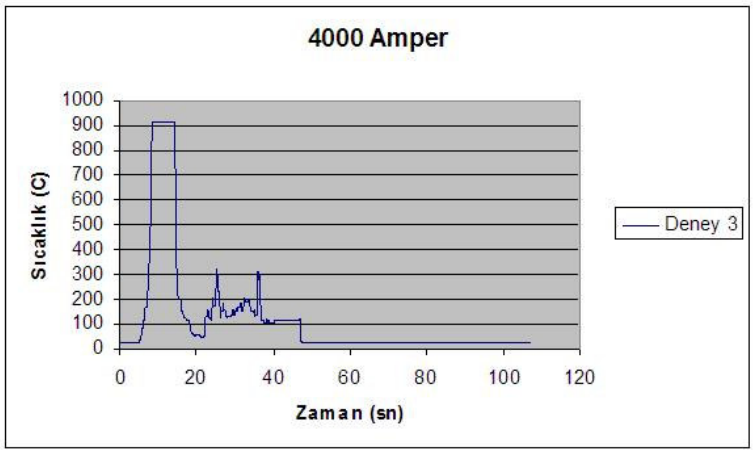
Soğutma : 1 çevrim

Isınma zamanı : 2*99+1 ≈ 4 s

Kalıpla soğutma: 5 s

Aşağıdaki şekilde bu şartlarda yapılan ısıtma, şekillendirme ve soğutma işlemine ait zaman-sıcaklık eğrisini görmekteyiz. Buradan sacın, östenitik bölgeye kadar ısınıp, ardından kalıp içinde hızla soğutulduğu net olarak görülmektedir.

Şekil 5.5' te görüldüğü gibi Docol 22MnB5 sacı 4 saniye boyunca 4000 Amperlik bir akıma maruz bırakılmıştır. 5–9 saniye aralığının sonunda 28 ^{0}C oda sıcaklığındaki sac 900 ^{0}C nin üzerinde sıcaklığa ulaşmıştır. Isınma hızı 200 ^{0}C/s nin üzerine kadar çıkar. Eğrinin sağ tarafında da gözlendiği gibi yaklaşık 6 saniye 900 ^{0}C nin üzerinde sıcaklıkta kalan sac, kalıpta soğutmanın şok etkisiyle 310 ^{0}C ye, oradan da 200 ^{0}C nin altındaki sıcaklıklara inmiştir. Bu aralıkta sıcaklığın tekrar yükselmesinin sebebi sacda biriken iç gerilmelerdir.



Şekil 5.5: 4000 Amper akımda sıcaklık- zaman eğrisi

Dördüncü deneyimizde numunemiz 4100 Amper akımda ısıl işlem uygulanarak hazırlandı. Kalıpta soğutuldu.

Akım IV : 4100 Amper

Isınma çevrimi : 2*99 çevrim

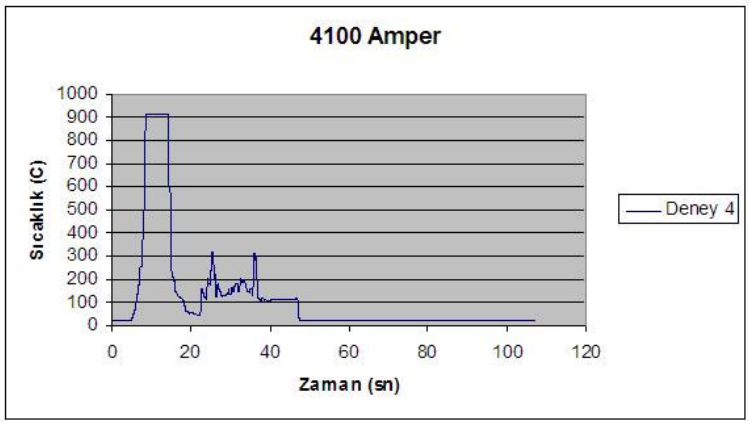
Soğutma : 1 çevrim

Isınma zamanı : 2*99+1 ≈ 4 s

Kalıpla soğutma: 5 s

Aşağıdaki şekilde bu şartlarda yapılan ısıtma, şekillendirme ve soğutma işlemine ait zaman-sıcaklık eğrisini görmekteyiz. Buradan sacın, östenitik bölgeye kadar ısınıp, ardından kalıp içinde hızla soğutulduğu net olarak görülmektedir.

Şekil 5.6' da da görüldüğü gibi Docol 22MnB5 sacı 4 saniye boyunca 4100 Amperlik bir akıma maruz bırakılmıştır. 5–9 saniye aralığının sonunda 26 ^{0}C oda sıcaklığındaki sac 900 ^{0}C nin üzerinde sıcaklığa ulaşmıştır. Isınma hızı yine 200 ^{0}C/s nin üzerine kadar çıkar. Eğrinin sağ tarafında da gözlendiği gibi yaklaşık 6 saniye 900 ^{0}C nin üzerinde sıcaklıkta kalan sac, kalıpta soğutmanın şok etkisiyle 300 ^{0}C ye, oradan da 200 ^{0}C nin altındaki sıcaklıklara inmiştir. Bu aralıkta sıcaklığın tekrar yükselmesinin sebebi sacda biriken iç gerilmelerdir.



Şekil 5.6: 4100 Amper akımda sıcaklık- zaman eğrisi

Beşinci deneyimizde numunemiz 4200 Amper akımda ısıl işlem uygulanarak hazırlandı. Kalıpta soğutuldu.

Akım V : 4200 Amper

Isınma çevrimi : 2*99 çevrim

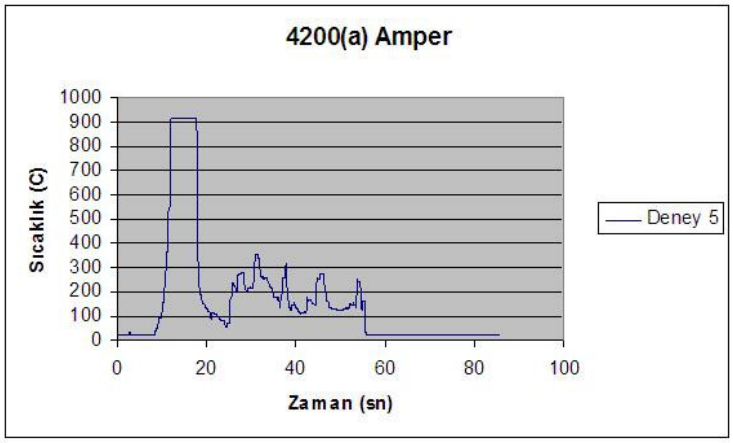
Soğutma : 1 çevrim

Isınma zamanı : 2*99+1 ≈ 4 s

Kalıpla soğutma: 5 s

Aşağıdaki şekilde bu şartlarda yapılan ısıtma, şekillendirme ve soğutma işlemine ait zaman-sıcaklık eğrisini görmekteyiz. Buradan sacın, östenitik bölgeye kadar ısınıp, ardından kalıp içinde hızla soğutulduğu net olarak görülmektedir.

Şekil 5.7' de görüldüğü gibi Docol 22MnB5 sacı 4 saniye boyunca 4200 Amperlik bir akıma maruz bırakılmıştır. 8,5-12,5 saniye aralığının sonunda 25 ^{0}C oda sıcaklığındaki sac 900 ^{0}C nin üzerinde sıcaklığa ulaşmıştır. Isınma hızı yine 200 ^{0}C/s nin üzerine kadar çıkar. Eğrinin sağ tarafında da gözlendiği gibi yaklaşık 5,5 saniye 900 ^{0}C nin üzerinde sıcaklıkta kalan sac, kalıpta soğutmanın şok etkisiyle 300 ^{0}C ye, oradan da 200 ^{0}C nin altındaki sıcaklıklara inmiştir. Bu aralıkta sıcaklığın bir ara yükselmesinin sebebi sacda biriken iç gerilmelerdir.



Şekil 5.7: 4200 Amper akımda sıcaklık- zaman eğrisi

Altıncı deneyimizde numunemiz 4200 Amper akımda ısıl işlem uygulanarak hazırlandı. Kalıpta soğutuldu. Bu deneyde kalıp içinde yapılan soğutmanın ardından sac, ek olarak havayla soğutuldu. Bu durum Şekil 5.7' de de görüldüğü gibi soğutma hızının artmasına yardımcı oldu.

Akım VI : 4200 Amper

Isınma çevrimi : 2*99 çevrim

Soğutma : 1 çevrim

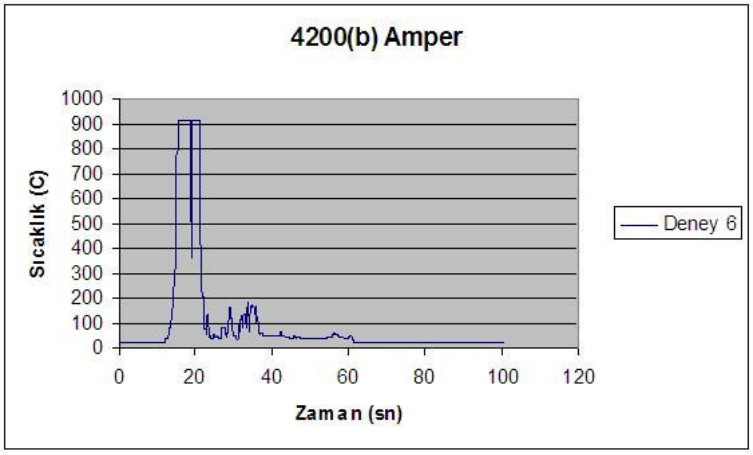
Isınma zamanı : 2*99+1 ≈ 4 s

Kalıpla soğutma : 5 s

Havayla soğutma: 8 s

Aşağıdaki şekilde bu şartlarda yapılan ısıtma, şekillendirme ve soğutma işlemine ait zaman-sıcaklık eğrisini görmekteyiz. Buradan sacın, östenitik bölgeye kadar ısınıp, ardından kalıp içinde hızla soğutulduğu net olarak görülmektedir.

Şekil 5.8' de görüldüğü gibi Docol 22MnB5 sacı 4 saniye boyunca 4200 Amperlik bir akıma maruz kalmıştır. 8,5-12,5 saniye aralığının sonunda 28 ^{0}C oda sıcaklığındaki sac 900 ^{0}C nin üzerinde sıcaklığa ulaşmıştır. Bu deneyin bir önceki deneyden farkı: kalıpta soğutmadan sonra sacın yüzeyine püskürtülen basınçlı hava ile soğutma işlemine devam edilmesidir. Buradan eğrinin sağ tarafına bakacak olursak soğuma eğrisi diğer deneylerdeki eğrilere kıyasla diktir. Sac 900 ^{0}C nin üzerinde 4 saniye kadar kaldı. İç gerilmelerin sacın sıcaklığına etkisine rağmen basınçlı havayla soğutmadan dolayı soğutmadan sonraki sıcaklık 200 ^{0}C nin üstüne çıkamamış, çok altında kalmıştır.



Şekil 5.8: 4200 Amper akımda sıcaklık- zaman eğrisi.

Yedinci deneyimizde numunemiz 4300 Amper akımda ısıl işlem uygulanarak hazırlandı. Isıtma işleminin ardından kalıpla soğuma başlayana kadar saca hava püskürtüldü ve sacın daha hızlı soğutulması amaçlandı. Ancak bu durum malzeme içindeki Borun oksijenle birleşerek yanmasına neden oldu. Sacın üzerindeki portakal kabuğu görüntüsü bu durumun izahıdır. Ardından Deney VI da uygulandığı gibi kalıpla soğutma işleminin ardından bu deneyde II. kez havayla soğutma işlemi

yapıldı.

Akım VII : 4300 Amper

Isınma çevrimi : 2*99 çevrim

Soğutma : 1 çevrim

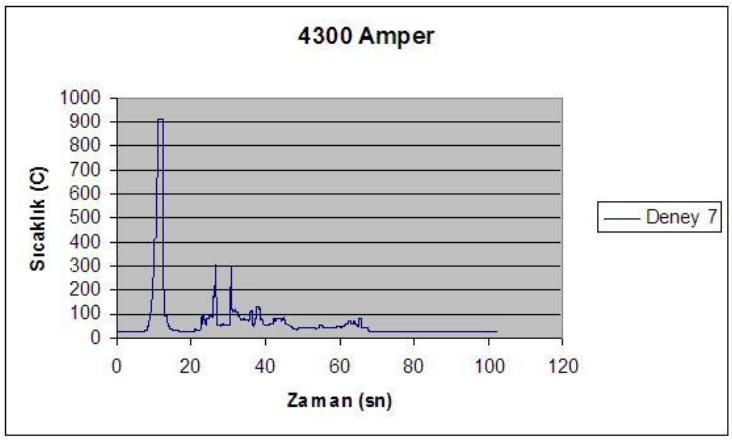
Isınma zamanı : 2*99+1 ≈ 4 s

Kalıpla soğutma : 5 s

II. havayla soğutma: 8 s

Aşağıdaki şekilde bu şartlarda yapılan ısıtma, şekillendirme ve soğutma işlemine ait zaman-sıcaklık eğrisini görmekteyiz. Buradan sacın, östenitik bölgeye kadar ısınıp, ardından kalıp içinde hızla soğutulduğu net olarak görülmektedir.

Şekil 5.9' da görüldüğü gibi Docol 22MnB5 sacı 4 saniye boyunca 4300 Amperlik bir akıma maruz kaldı. 8-12 saniye aralığının sonunda 27,5 ^{0}C oda sıcaklığındaki sac 900 ^{0}C nin üzerinde sıcaklığa ulaştı. Bu deneyde sıcaklığın maksimum olduğu anda hava püskürtmeye başlandı, kalıpta soğuma sırasında ara verildi ve ardından havayla püskürtme işlemine 8 saniye boyunca devam edildi. Yüksek akım şiddetine rağmen sıcaklığın 900 ^{0}C nin çok üzerine çıkmadığı(yaklaşık 1 saniye boyunca) görülür. Eğrinin sağ tarafına bakacak olursak soğuma eğrisi diğer deneylerdeki eğrilere kıyasla diktir. Soğuma havayla ekstra soğutmaya bağlı olarak daha hızlıdır. I. ve II. hava ile soğutmanın sonucu olarak kalıpta soğutmayla sacın sıcaklığı 100 ^{0}C ye kadar indirilebildi.



Şekil 5.9: 4300 Amper akımda sıcaklık- zaman eğrisi.

5.2. Balistik Deneyi

Tezimizin bu bölümünde elektrik akımı verilerek ısıtılan ve kalıpta hızla soğutularak ısıl işlemi tamamlanan 1,4 mm kalınlığındaki Docol 22MnB5 sacına balistik deney uygulandı.

Balistik deneyimizde daha önce hazırlamış olduğumuz 7 numuneyi kullandık. Numunelere teker teker mermi sıkıldı. Deneyler özel bir poligon olan Atlas Güvenlik' te, mermi atışı için hazırlanmış kapalı, tam güvenlikli, özel bir odada yapıldı. Test 7 m uzaklıktan saclara yapıldı. Deneylerde kullanılan silah, Alman yapımı Walther marka silahtır. Walther markası 100 yılı aşkın bir süredir kullanılmaktadır. 1886 yılında Carl Walther adında bir Alman silah uzmanı tarafından üretilmiştir.

Kullanılan silah 9*19 mm parabellum dur. Namlu boyu 98 mm, mermi çıkış hızı 360± 10-15 m/s(1180 ft/s) dir. Merminin etkili olduğu mesafe 50 m dir. Bu mesafede çevre şartlarının etkisi olabilir. Uygun mermi 8.0 g (124 gr) olabilir. Bu durumda merminin enerjisi 518 joules (386 ft·lbf) olur.



Şekil 5.10: Mermi çekirdeği ve kovanı.

Piyasada 9*19 Parabellum mühimmat için ticari olarak kullanılan zırh- para nakil vasıtalarında- 2,5 mm kalınlığında kara sacdır. Bizim balistik deneylerde kullandığımız sac 1,4 mm kalınlığındadır (Hardox firması uzun namlulu silahlar-G3, M16- için 4 mm kalınlığında yassı mlz. üretiyor).

Testler sırasında Docol 22MnB5 sacının arkasına destek malzemesi olarak sert kauçuk konmuştur. Şimdi deney sonuçlarına bakalım:

Piyasada 9*19 Parabellum mühimmat için ticari olarak kullanılan zırh- para nakil vasıtalarında- 2,5 mm kalınlığında kara sacdır. Bizim balistik deneylerde kullandığımız sac 1,4 mm kalınlığındadır (Hardox firması uzun namlulu silahlar-G3, M16- için 4 mm kalınlığında yassı mlz. üretiyor).

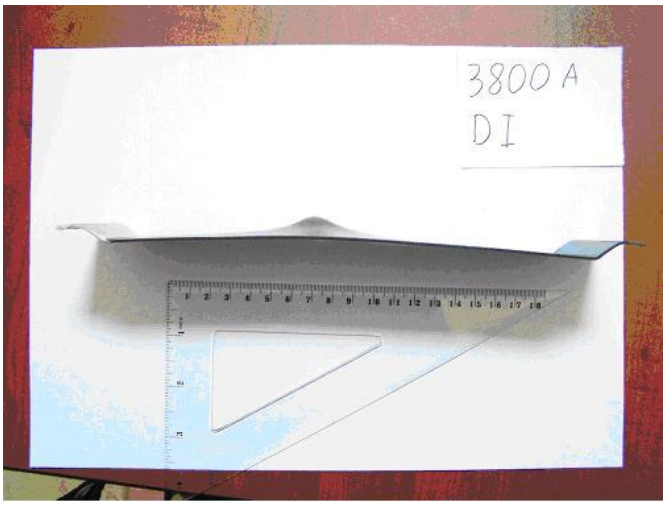
Testler sırasında Docol 22MnB5 sacının arkasına destek malzemesi olarak sert kauçuk konmuştur. Şimdi deney sonuçlarına bakalım:

5.2.1. 3800 Amperlik Numune

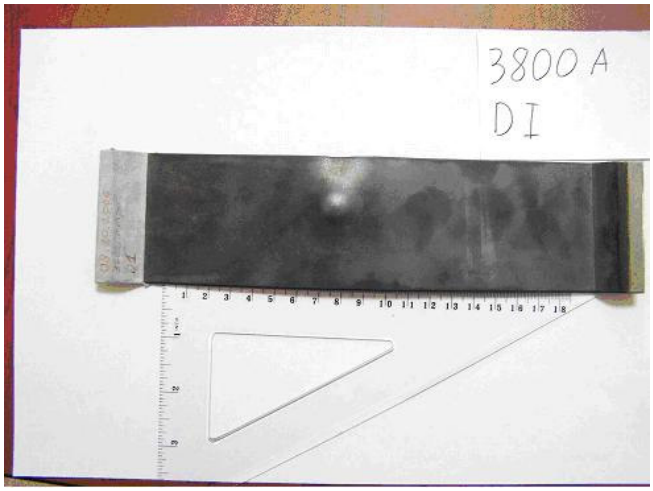
Şekil 5.11, 5.12, 5.13, 5.14' te 3800 Amperlik akımla ısıl işlem uyguladığımız 1. deney numunesine ait dört açıdan çektiğimiz fotoğrafları görmekteyiz. Fotoğraflarda; balistik deneyde 3800 Amperlik numunenin mermiyi geçirmediğini, bunun ötesinde sacın kırılmadığını görmekteyiz. Buradan sacın sünekliğinin ve dayanımının yüksek olduğunu, yeterli tokluğuyla merminin bütün enerjisini soğurabildiğini anlıyoruz. Böylece deney sonunda mermi çekirdeği tamamen parçalandı, mermi çekirdeği parçalar halinde etrafa saçıldı. 1. deneyde sac 765 ^{0}C sıcaklığa kadar hızla ısıtılıp soğutulmuştu. Bu deneyde merminin sacın içinde girdiği derinlik 14 mm olarak ölçüldü.



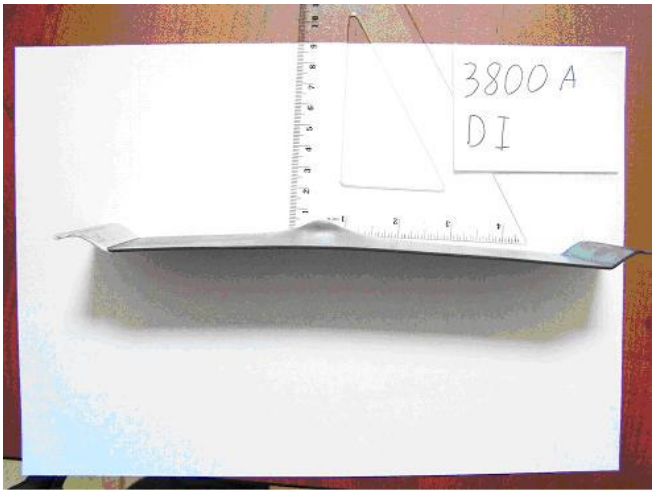
Şekil 5.11: 3800 Amperlik sacda mermi izinin önden görünüşü.



Şekil 5.12: 3800 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.



Şekil 5.13: 3800 Amperlik sacda mermi izinin arkadan görünüşü.

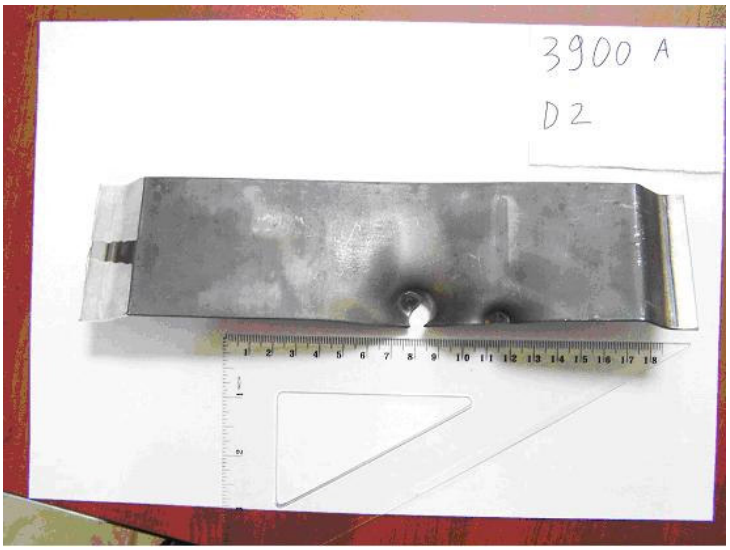


Şekil 5.14: 3800 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.

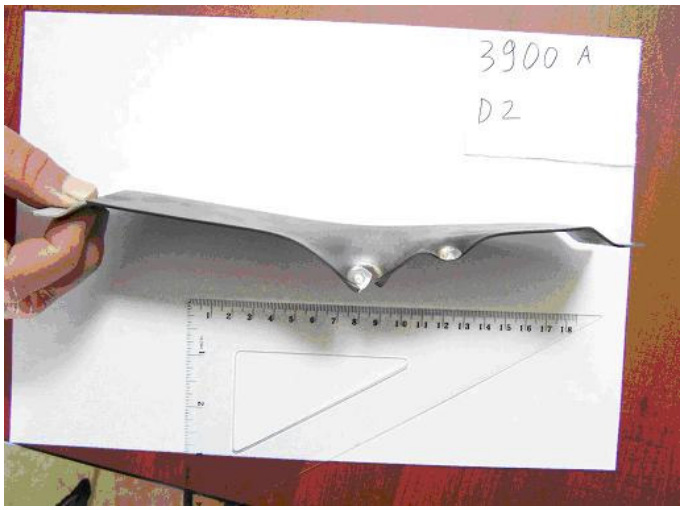
5.2.2. 3900 Amperlik Numune

Şekil 5.15, 5.16, 5.17, 5.18' de 3900 Amperlik akımla ısıl işlem uyguladığımız 2. deney numunesine ait dört açıdan çektiğimiz fotoğrafları görmekteyiz. Şekillerde de görüldüğü gibi 3900 Amperlik numuneye 2 defa mermiyle ateş edilmiştir. İlk atış sacın kenarına isabet aldığı için hatalı sayıldı ve 2. atış yapıldı. Ancak bu atışta da mermi sacın kenarına isabet aldı. Bu durumda 3900 Amperlik numunenin balistik deneyinin hatalı yapıldığına karar verildi. Yine de bu numuneden bazı sonuçlara ulaşmak mümkün oldu. Fotoğrafa bakıldığında ilk merminin sacın kenarına gelmesine rağmen sacı delemediğini görmekteyiz. Sacın yeterince sünek ve

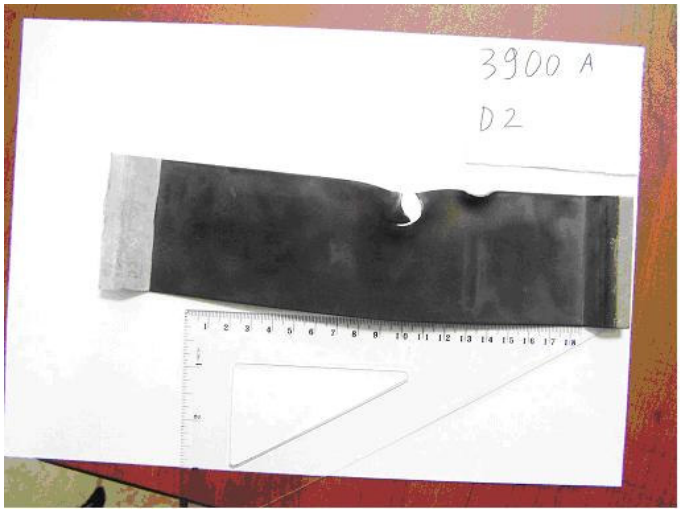
dayanıklı yani merminin enerjisini absorbe edebilecek kadar tok olması birinci merminin sacı delip geçememesinin nedenidir. 3900 Amperlik numuneye yapılan ikinci atış ise sacın sünekliğinin görülen bir ispatıdır. Bu atışta sac delinmesine rağmen(ki bu kırılmada ilk atış sonucunda sacın dayanımındaki düşüş etkilidir) merminin dalma derinliği oldukça yüksektir. Şekillerde sac önce uzayarak şekil değiştirmiş, ardından kırılmıştır. Deney 2 de Docol 22MnB5 sacı 845 ^{0}C ye kadar hızla ısıtılıp ardından soğutulmuştu. 1. atışta merminin dalma derinliği 14,55 mm ve 2. atışta bu derinlik 32,3 mm olarak ölçüldü.



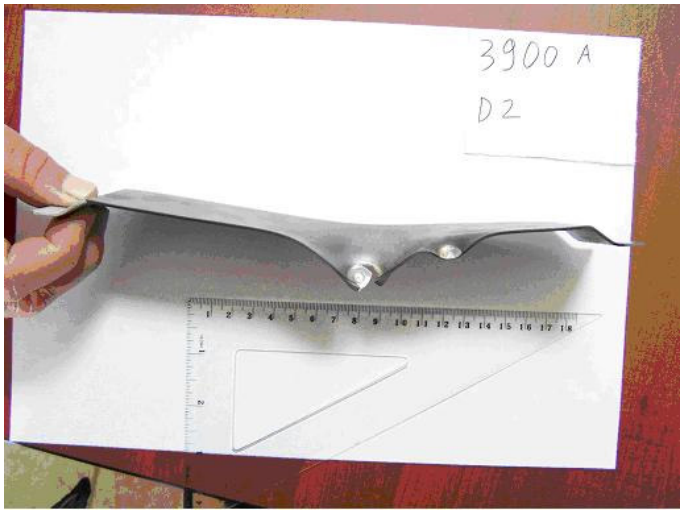
Şekil 5.15: 3900 Amperlik sacda mermi izinin önden görünüşü.



Şekil 5.16: 3900 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.



Şekil 5.17: 3900 Amperlik sacda mermi izinin arkadan görünüşü.

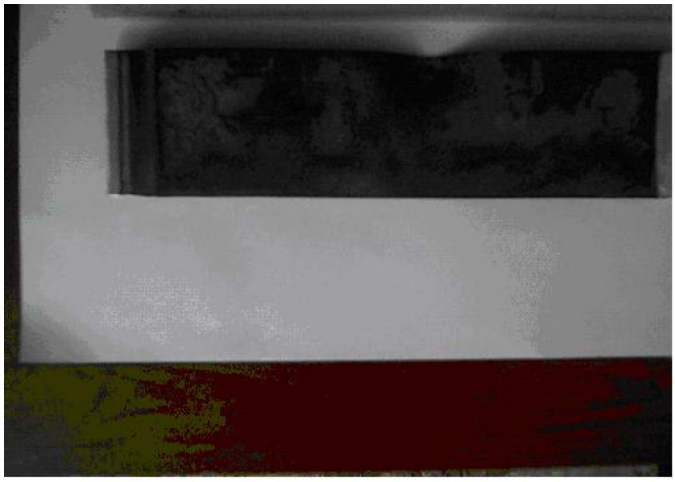


Şekil 5.18: 3900 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.

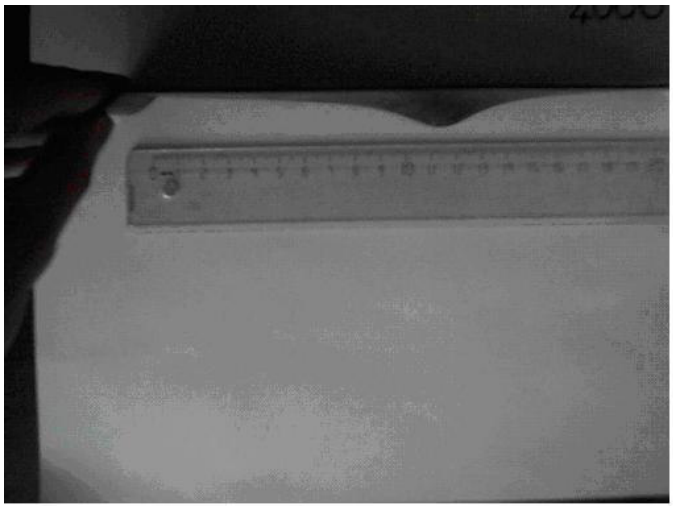
5.2.3. 4000 Amperlik Numune

Şekil 5.19, 5.20, 5.21, 5.22' de, 4000 Amperlik akımla ısıl işlem uyguladığımız 3. deney numunesine ait 4 açıdan çekilen fotoğrafları görmekteyiz. Bu fotoğraflarda mermi yine sacın kenarına isabet almış olmasına rağmen sacı delemediği gözlendi. Bunun yanında mermi sacı delip geçemediği için parçalandı, ve bu parçacıklar etrafa yayıldı. Merminin dayanımı sacın dayanımından daha düşük olduğu için bu durum gelişti. Bu deneyde mermi izi derinliği 15,9 mm olarak ölçülüp kaydedildi.

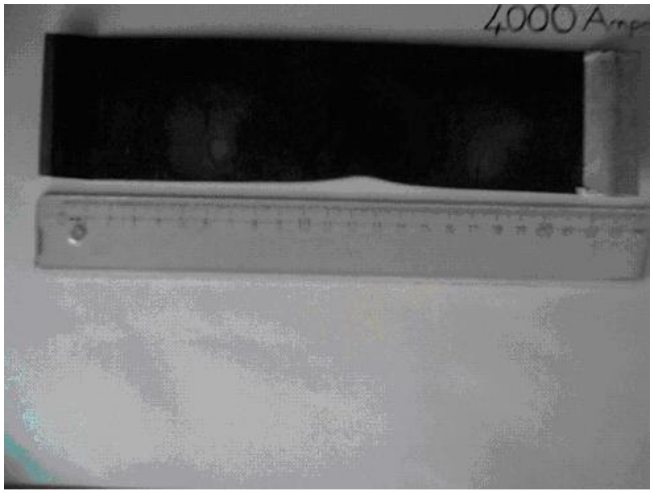
Bu deneyde sac, merminin enerjisinin tümünü soğurabilmiş ve bu enerjiyi tüketecek kadar şekil değiştirebilmiş, merminin enerjisi sacın tokluğundan düşük olduğundan sac kırılmadan mermiyi durdurabilmiştir. Deney 3 te numunemiz 900 ^{0}C nin üzerinde 6 saniye kadar kalmış, oradan hızla 200- 300 ^{0}C sıcaklığa kalıpta soğutulmuştu.



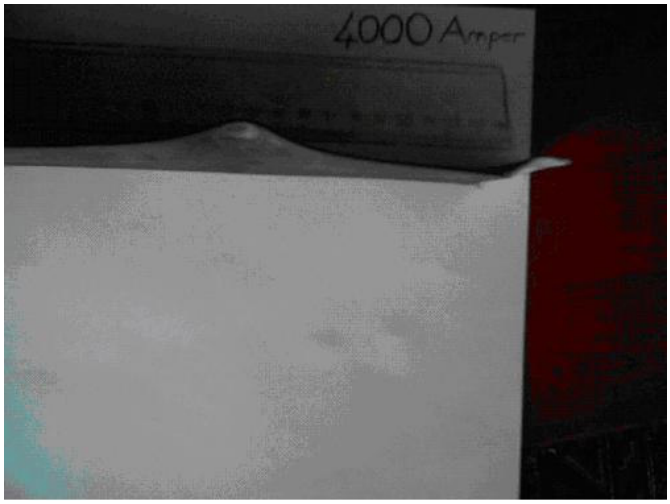
Şekil 5.19: 4000 Amperlik sacda mermi izinin önden görünüşü.



Şekil 5.20: 4000 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.



Şekil 5.21: 4000 Amperlik sacda mermi izinin arkadan görünüşü.



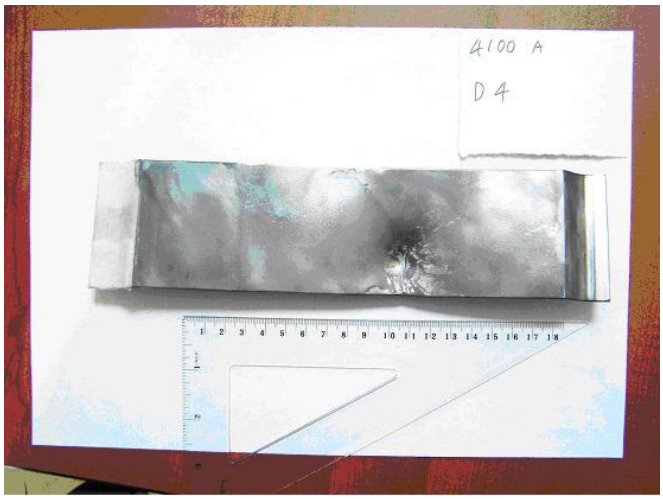
Şekil 5.22: 4000 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.

5.2.4. 4100 Amperlik Numune

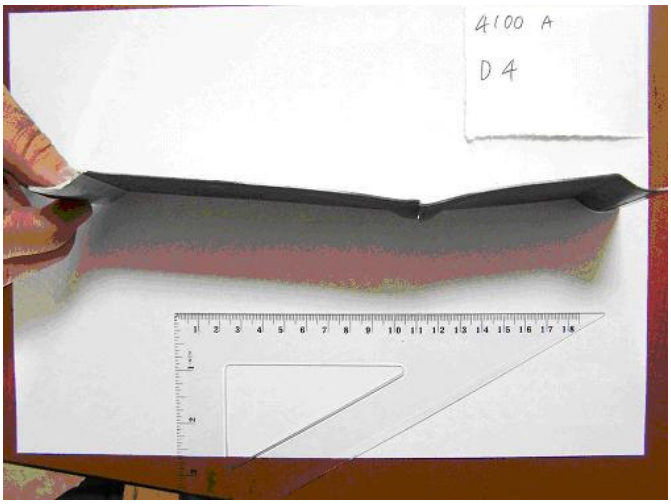
Şekil 5.23, 5.24, 5.25' te, 4100 Amperlik akımla ısıl işlem uyguladığımız 4. deney numunesine ait çekilen fotoğrafları görmekteyiz. Bu fotoğraflarda sacın şekil değiştirdikten sonra kırıldığını görüyoruz. Buna rağmen mermi sacı delip geçememiştir. Deneyin sonunda sac, mermi ve çekirdeğinin enerjisiyle sac kırıldı. Bunun yanında mermi çekirdeği, sacı delip geçemediği gibi parçalandı ve bu parçacıklar etrafa yayıldı. Merminin enerjisi sacın enerjisinden daha düşüktür ki mermi sacı delip geçememiştir. Deneyde mermi izi derinliği 16,1 mm olarak

ölçüldü.

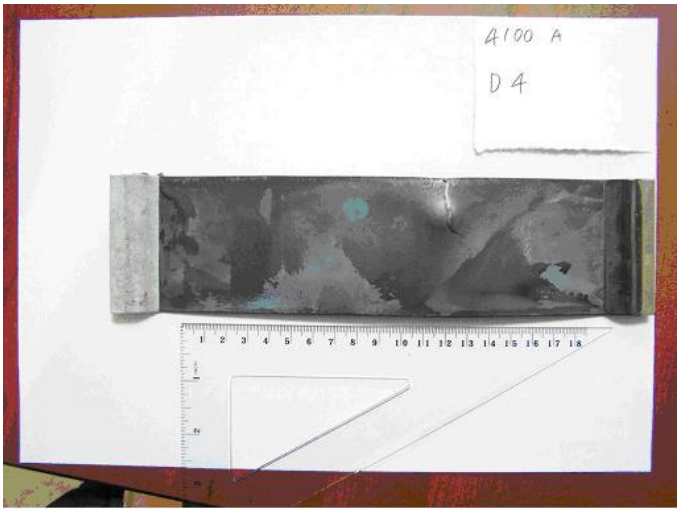
Bu deneyde sac, merminin enerjisinin tümünü soğurabilmesine rağmen bu enerjiyi tüketecek kadar şekil değiştirememiş, maksimum şekil değişiminden sonra kırılma hattı oluşturarak kalan enerjinin dışarı yayılmasına engel olamamıştır. Deney 4 te numunemiz 900 ^{0}C nin üzerinde 6 saniye kadar kalmış, oradan hızla 200- 300 ^{0}C sıcaklığa kalıpta soğutulmuştur.



Şekil 5.23: 4100 Amperlik sacda mermi izinin önden görünüşü.



Şekil 5.24: 4100 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.

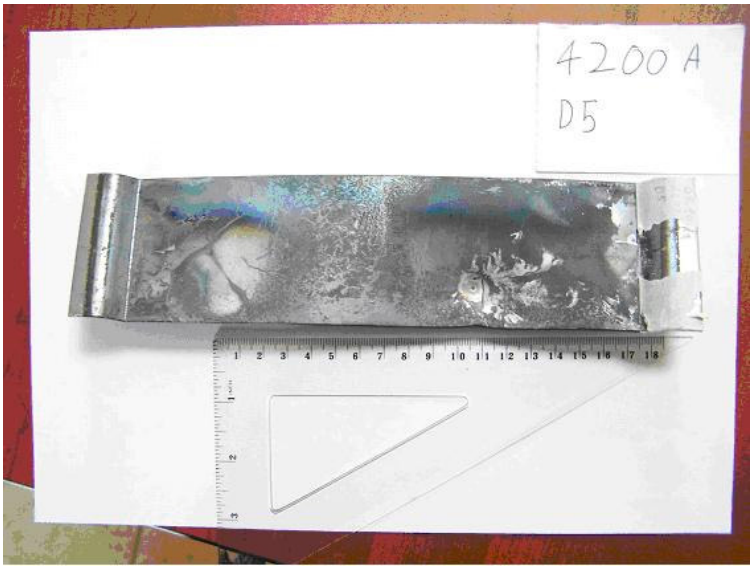


Şekil 5.25: 4100 Amperlik sacda mermi izinin arkadan görünüşü.

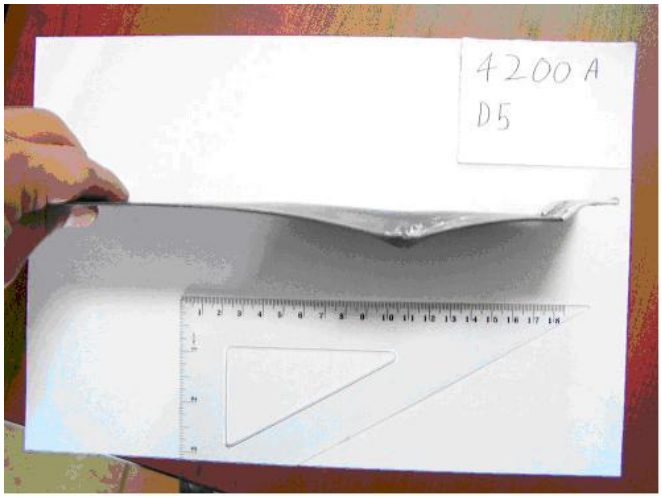
5.2.5. 4200 Amperlik Numune

Şekil 5.26, 5.27, 5.28' de, 4200 Amperlik akımla ısıl işlem uyguladığımız 5. deney numunesine ait çekilen fotoğrafları görmekteyiz. Sac, bir miktar uzadıktan sonra kırılmıştır. Merminin malzeme dayanımı sacın malzemesinin dayanımından daha düşüktür ki mermi sacı delip geçemeden parçalanarak etrafa saçılmıştır. Ancak sacın tokluğu, merminin çarpma anından hemen sonra saca aktardığı enerjiyi tamamen absorbe etmeye yetmemiş ve buradan sacın kırılarak enerjiyi boşaltma yoluna gitmiştir. Mermi iz derinliği 16,2 mm olarak ölçüldü.

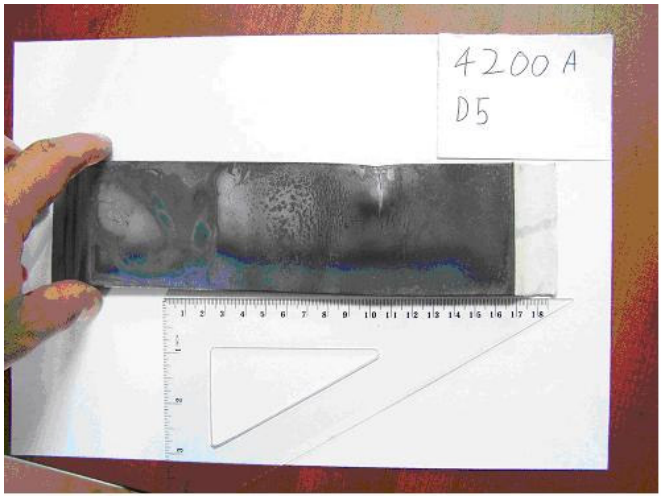
Bu deneyde sac, merminin enerjisinin tümünü soğurabilmesine rağmen bu enerjiyi tüketecek kadar şekil değiştirememiş, maksimum şekil değişiminden sonra kırılma hattı oluşturarak kalan enerjinin dışarı yayılmasına engel olamamıştır. Bu durumda 4200 Amperlik numunenin sünekliğinin ve dolayısıyla tokluğunun 3800, 3900, 4000 Amperlik numunelere göre daha düşük olduğu yorumu yapılır. Deney 5 te numunemiz 900 ^{0}C nin üzerinde 5,5 saniye kadar kalmış, oradan hızla 200- 300 ^{0}C sıcaklığa kalıpta soğutulmuştur.



Şekil 5.26: 4200 Amperlik sacda mermi izinin önden görünüşü.



Şekil 5.27: 4200 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.

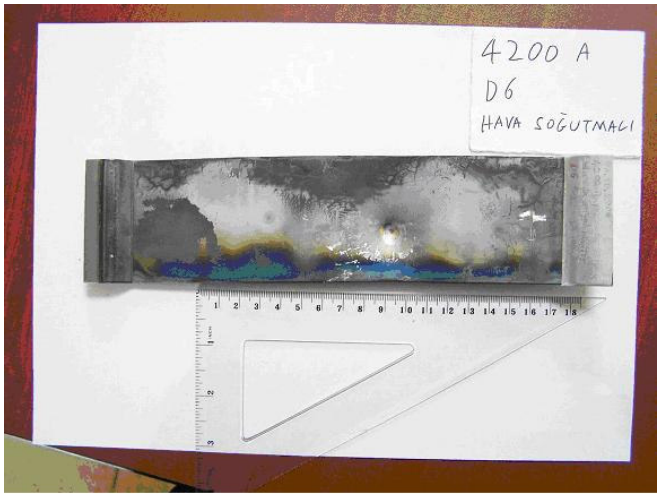


Şekil 5.28: 4200 Amperlik sacda mermi izinin arkadan görünüşü.

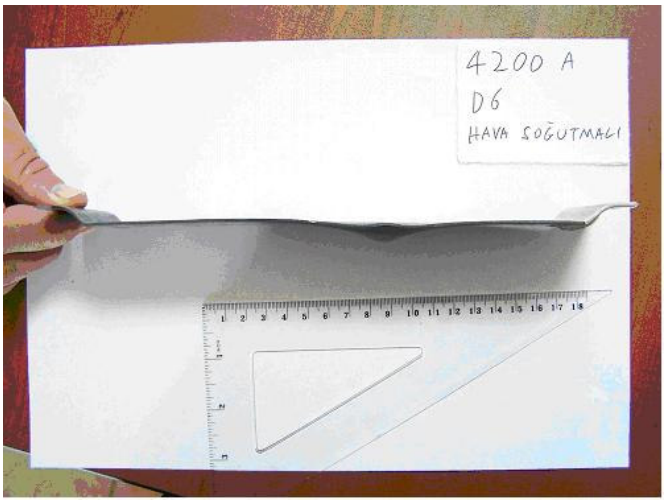
5.2.6. 4200 Amperlik Havayla Soğutulmuş Numune

Şekil 5.29, 5.30, 5.31' de, 4200 Amperlik akımla ısıl işlem uyguladığımız 6. deney numunesine ait 3 açıdan çekilen fotoğrafları görmekteyiz. Sac kırılmamıştır. Bu durumda diyebiliriz ki; sac, merminin enerjsini absorbe ettikten sonra şekil değiştirmesi enerjinin tamamını yok etmeye yetmiştir. Yani sacın tokluğu, merminin saca çarpma anındaki enerjisinden daha fazladır. Başka bir deyişle sac yeterince sünektir ve dayanıklıdır. Merminin malzeme dayanımı sacın malzemesinin dayanımından daha düşüktür ki mermi sacı delip geçemeden parçalanarak etrafa saçılmıştır. Mermi iz derinliği 10,5 mm olarak ölçüldü.

6. deneyde 5. deneyden farklı olarak sac, kalıpta soğutulduktan sonra basınçlı havayla ekstra soğutuldu. 4200 Amperlik ekstra havayla soğutulmuş numunenin sünekliği ve dolayısıyla tokluğu 3800, 3900, 4000 Amperlik numuneler gibi iyidir. Deney 6 da numunemiz 900 ^{0}C nin üzerinde 4 saniye kadar kalmış, oradan hızla 200- 300 ^{0}C sıcaklığa kalıpta soğutulmuştur. Basınçlı havayla soğutmadan dolayı sonraki sıcaklık 200 ^{0}C üstüne çıkamamış, çok altında kalmıştır.



Şekil 5.29: 4200 Amperlik hava soğutmalı sacda mermi izinin önden görünüşü.



Şekil 5.30: 4200 Amperlik hava soğutmalı sacda mermi izinin yandan görünüşü.



Şekil 5.31: 4200 Amperlik hava soğutmalı sacda mermi izinin arkadan görünüşü.

5.2.7. 4300 Amperlik Çift Soğutmalı Numune

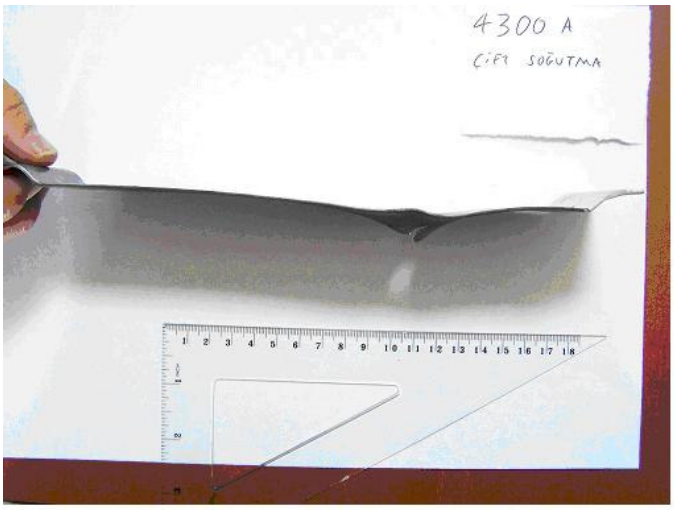
Şekil 5.29, 5.30, 5.31' de, 4300 Amperlik akımla ısıl işlem uyguladığımız 7. deney numunesine ait 3 açıdan çekilen fotoğrafları görmekteyiz. Sac, bir miktar şekil değiştirdikten sonra kırılmıştır. Kırılmanın yüksek sıcaklıkta hava soğutmasıyla alakası vardır. Bu sıcaklıkta Bor oksijenle yanmış ve malzemeden ayrılarak bileşimini kaybetmiştir. Bor, östenitten ferrit ve perlit fazına geçişi geciktirir. Bu durum östenitten 900-500 ^{0}C sıcaklığına soğutulan çeliğin faz bileşiminde martenzit ve beynit yapılarının yüksek oranda olmasını sağlar. Böylece malzemenin dayanımı artar. Ancak 7. deneyimizde kullandığımız malzemede Bor yanınca dayanımda diğer deneylere oranla düşüş olmuştur. Dayanımdaki bu düşüş merminin enerjisini soğuracak sacın tokluğunda azalmaya sebep olur ve bu azalma merminin çarpma anından hemen sonra saca aktardığı enerjiyi tamamen absorbe etmeye yetmediği gibi sacın kırılarak enerjiyi boşaltma yoluna gitmesine sebep olur. Mermi iz derinliği 17,1 mm olarak ölçüldü.

Bu deneyde sac, merminin enerjisinin tümünü soğurabilmesine rağmen bu enerjiyi tüketecek kadar şekil değiştirememiş, maksimum şekil değişiminden sonra kırılma hattı oluşturarak kalan enerjinin dışarı yayılmasına engel olamamıştır. Bu durumda 4300 Amperlik numunenin sünekliğinin ve dolayısıyla tokluğunun 3800, 3900, 4000 Amperlik numunelere göre daha düşük olduğu yorumu yapılır. Bu son deneyde numunemiz yüksek akım şiddetine rağmen çift hava soğutmanın etkisiyle 900 ^{0}C nin

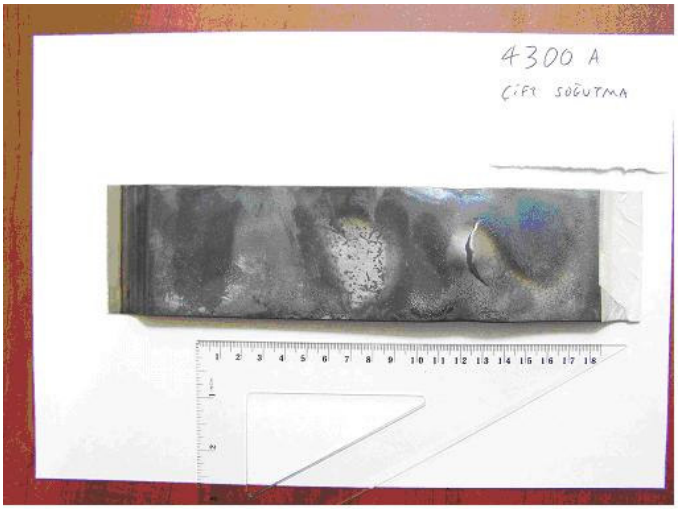
üzerinde 1 saniye kadar kaldı, oradan 100 ^{0}C civarında sıcaklığa soğutuldu.



Şekil 5.32: 4300 Amperlik sacda mermi izinin önden görünüşü.



Şekil 5.33: 4300 Amperlik sacda mermi izinin yandan görünüşü.



Şekil 5.34: 4300 Amperlik sacda mermi izinin arkadan görünüşü.

5.2.8. Sonuçlar

Tüm deneylere ait sonuçları yorumlayacak olursak:

1. Saclar daha yüksek sıcaklığa ısıtıldıkça sünekliklerinin arttığı görülmüştür. Bu durumu 3800 Amperden 4300 Ampere doğru gittikçe mermi iz derinlikleri ölçüldü. 4300 Amper mermi iz derinliğinin maksimum olduğu değeri verdi. 4300 Amperlik sac en tazla şekil değişimini vermiştir.

2. Daha düşük amperlerde (3800, 3900, 4000) mermi sacı delememiştir. Bu, sacın dayanımının ve tokluğunun merminin enerjisini emebildiğini, tokluğun düşük amper değerlerinde daha yüksek olduğunu göstermiştir.

5.3. Sertlik Deneyi

Yukarıda araştırdığımız Docol 22MnB5 saclarını incelemeye devam edelim. Bu bölümde saclara uyguladığımız sertlik deneylerinden bahsedeceğiz. İncelenen numuneler 3800 Amper, 3900 Amper, 4000 Amper numuneleridir. Bu numunelere 5 ayrı noktadan sertlik ölçümü yapıldı. Buna göre sonuçlar değerlendirildi.

Sertlik ölçümü kolay dönüşümü gözönünde bulundurularak Rockwell C (H_RC) sertlik ölçümüyle yapıldı. Malzememizin yüksek sertlikte olacağı önceden tahmin edilerek “C” ucu kullanıldı. Buna bağlı olarak da elmas uç seçilmiş oldu. Sertlik

ölçümü Şekil 5.35' te gördüğümüz Rockwell Sertlik Ölçüm Cihazı' nda yapıldı.



Şekil 5.35: Rockwell Sertlik Ölçüm cihazı.

Aşağıdaki tablodan sonuçlara bakacak olursak:

Tablo 5.1: Balistik saclara uygulanan sertlik ölçümleri.

Amper	**1.sertlik ölçümü**	**2.sertlik ölçümü**	**3.sertlik ölçümü**	**4.sertlik ölçümü**	**5.sertlik ölçümü**	**Ortalama Sertlik(H_Rc)**
3800	47,0	46,3	45,8	46,1	46	46,24
3900	47,1	46,8	47,0	45,6	44,9	46,28
4000	44,0	43,6	47,1	45,9	46,2	45,36

Bu sonuçlara göre sertlik değerlerinin saca uyguladığımız ısıl işlemle değişmediğini görmekteyiz. Bu değerlerden çıkan sonuç Docol 22MnB5 sacı yüksek sertlikte bir sacdır. H_Rc değeri 46 dır.

Yüksek sertlik değerleri balistik malzemeler için çok önemlidir. Çünkü yüksek

sertlik değerlerine sahip malzemeler balistik darbe anında düşük sertlik değerlerine sahip malzemelere göre, mermi ucunu kırıp, daha çok kütleştirerek etkinliğini azaltmakta ve yüksek balistik koruma sağlamaktadır. Ayrıca mermi ucundaki kütleşmeyle, balistik korumayı arttırmak için ikinci bir arka plaka kullanıldığı takdirde bu plakaya etki eden darbe kuvvetinin daha geniş bir alanda etkisini göstermesi sağlanır. Bu sayede merminin malzeme üzerinde uyguladığı noktasal kuvvette azalma gözlemlenir.

Mermi ucunun deforme olması merminin delme kabiliyetini azaltmakta ve dolayısıyla balistik metal malzemesine daha az penetrasyon yapmaktadır. Bu olay, yani mermi ucu geometrisinin kütleştirilmesi ya da balistik malzemenin sertliğinin yüksek olması, metalin balistik performansını artıran etkenlerden birisidir.

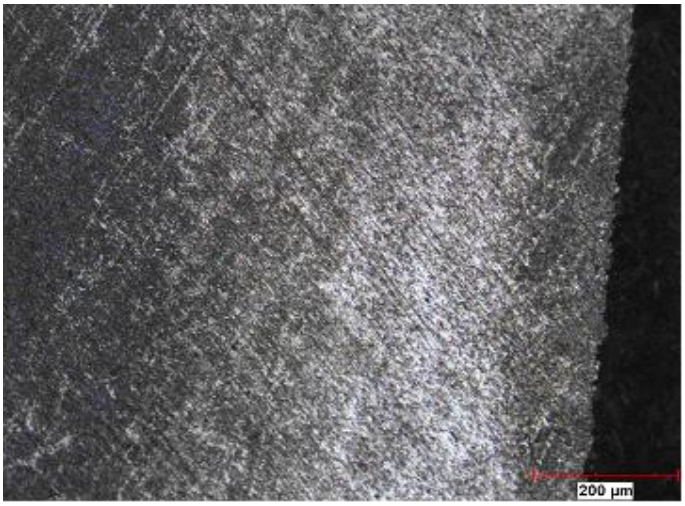
5.4. Mikroyapı İncelemesi

Mikroyapı balistik testlerde önemlidir. Mikroyapı incelenmesi 7 numune için yapıldı. Öncelikle numuneler mikroyapı incelemesi için hazırlandı.

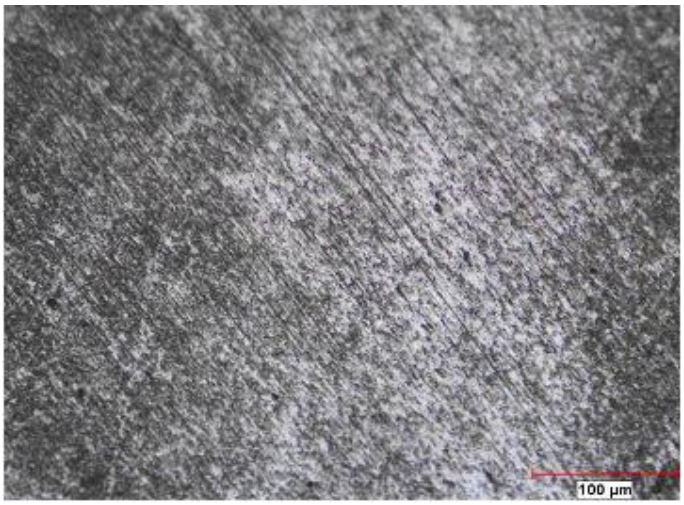
1. Döner kesme testere ile 10 mm^2 lik numuneler kesilip hazırlandı,
2. Basınçta ve 200 ^{0}C sıcaklıkta bakalit tozu numuneler üzerinde eriyene kadar beklendi. Ardından numuneler soğutuldu ve bakalite alınmış oldu,
3. Numuneler 80 den 1200 e kadar bütün zımparalardan geçirildi,
4. 3 Mikronluk elmas pasta ile parlatıldı,
5. Sonra % 4 nital ile dağlandı. Dağlama matrisi görmek için yapıldı.

5.4.1. 3800 Amperlik Numune

3800 Amperlik numunenin ışın mikroskobunda 100, 200, 500 ve 1000 büyütme fotoğrafları Şekil 5.36, 5.37, 5.38, 5.39' da görülmektedir. Yapıda küresel formda sementit ve martenzit kendini göstermektedir. Isıtma esnasında yapı içinde östenit bölgesine geçemeyen tanecikler sementit olarak kalmış, östenit bölgesine geçebilen tanecikler martenzite dönüşmüştür.



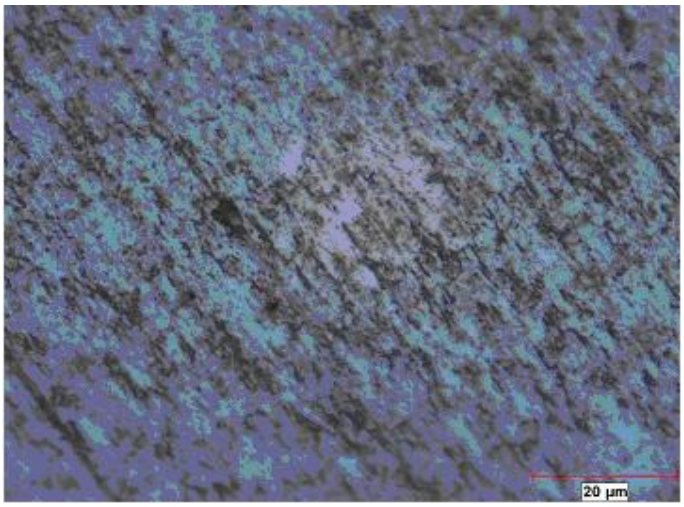
Şekil 5.36: 3800 Amperlik numune x100 büyütme.



Şekil 5.37: 3800 Amperlik numune x200 büyütme.

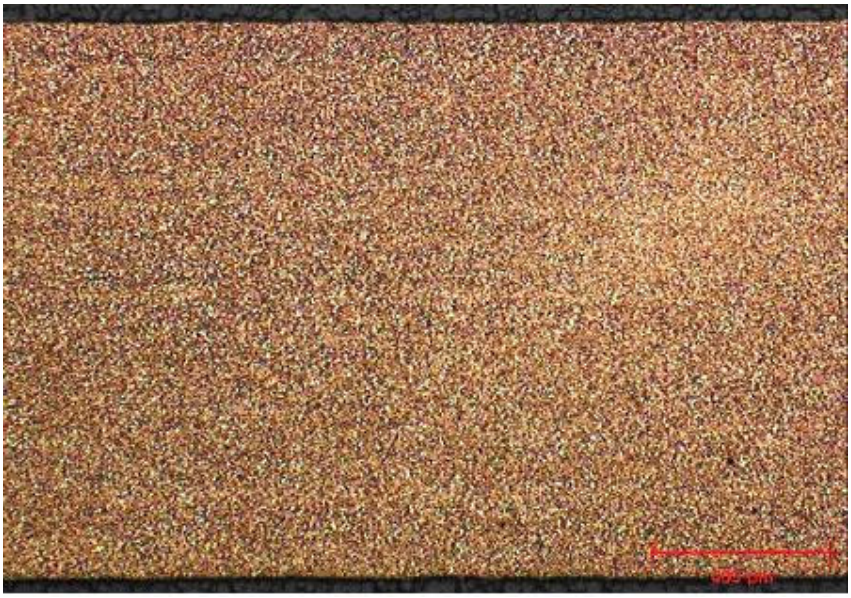


Şekil 5.38: 3800 Amperlik numune x500 büyütme.

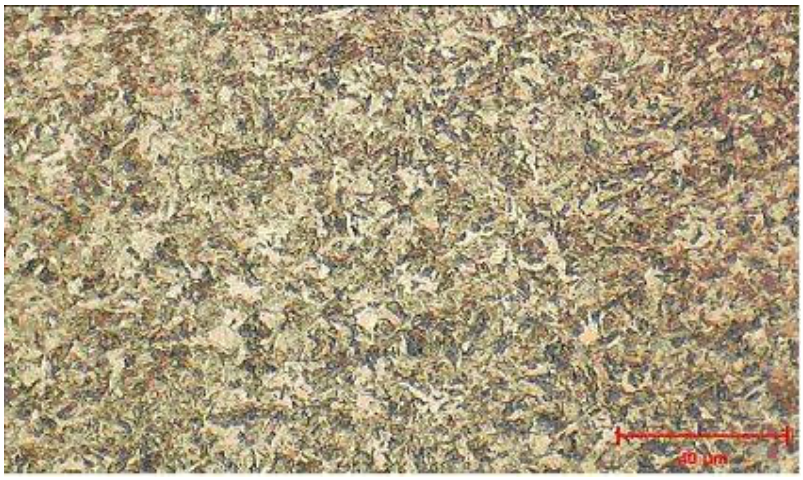


Şekil 5.39: 3800 Amperlik numune x1000 büyütme.

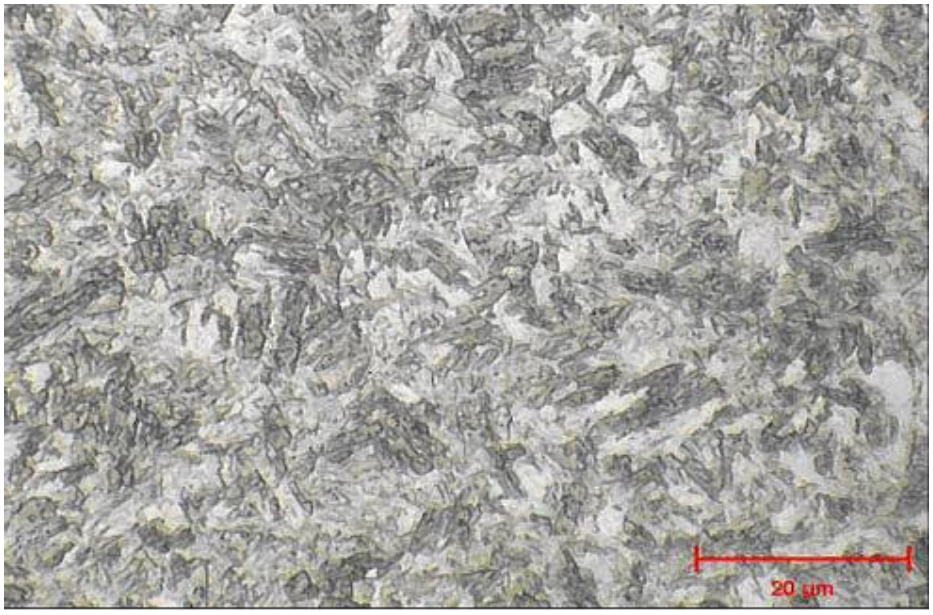
Aşağıdaki şekillerde bakalit yerine nitalle dağlanmış ve içyapısı daha net görülen fotoğrafları görmekteyiz. Şekil 5.44, 5.45, 5.46' da 3800 amperlik numuneye ait elektron mikroskobunda x1000, x2000, x5000 büyütmeyle fotoğraflanan içyapı resimlerini görüyoruz. Şekil 5.44' te görüldüğü gibi malzemede çatalsı yapı kendini göstermektedir. Bu yapı martenzitik yapı formudur. Şekil 5.45 ve özellikle Şekil 5.46' da tane sınırlarında ve içinde küresel formda sementit yapısı görülmektedir.



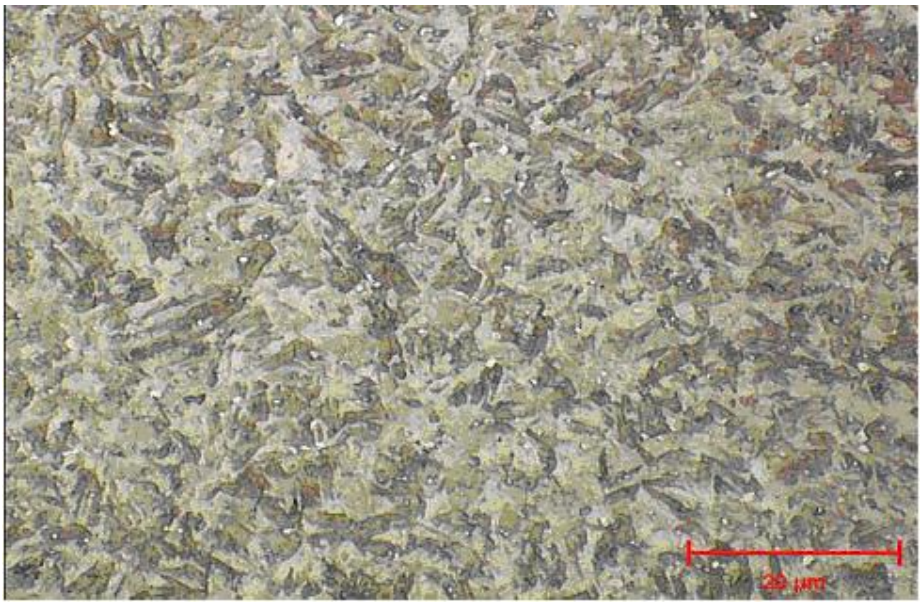
Şekil 5.40: Nitalle dağlanmış 3800 Amperlik numune iç yapısı x50 büyütme.



Şekil 5.41: Nitalle dağlanmış 3800 Amperlik numune iç yapısı x500 büyütme.

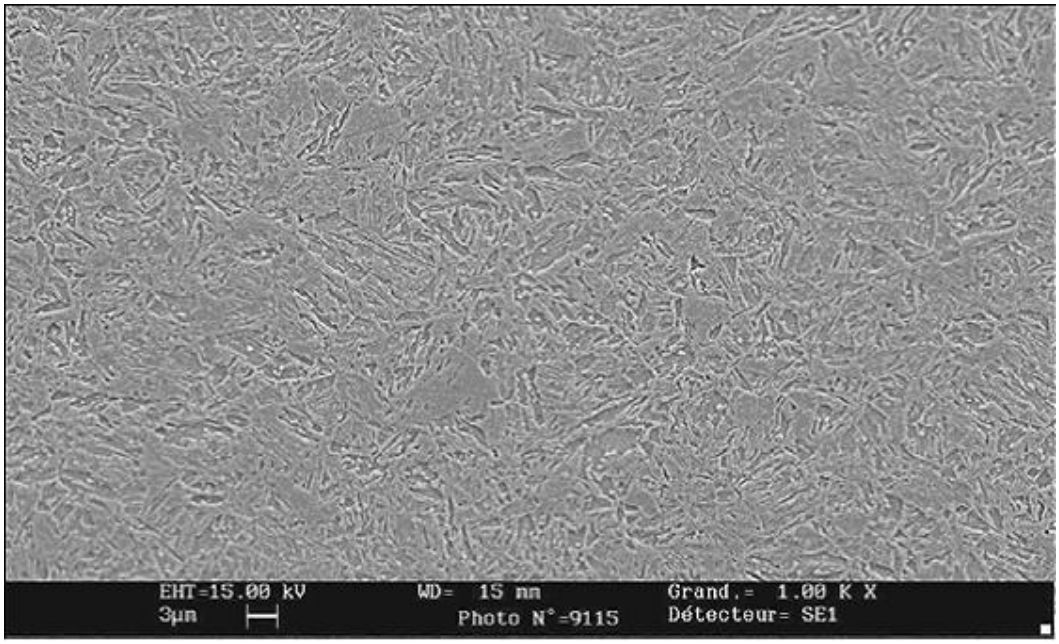


Şekil 5.42: Nitalle dağlanmış 3800 Amperlik numune iç yapısı x1000 büyütme.

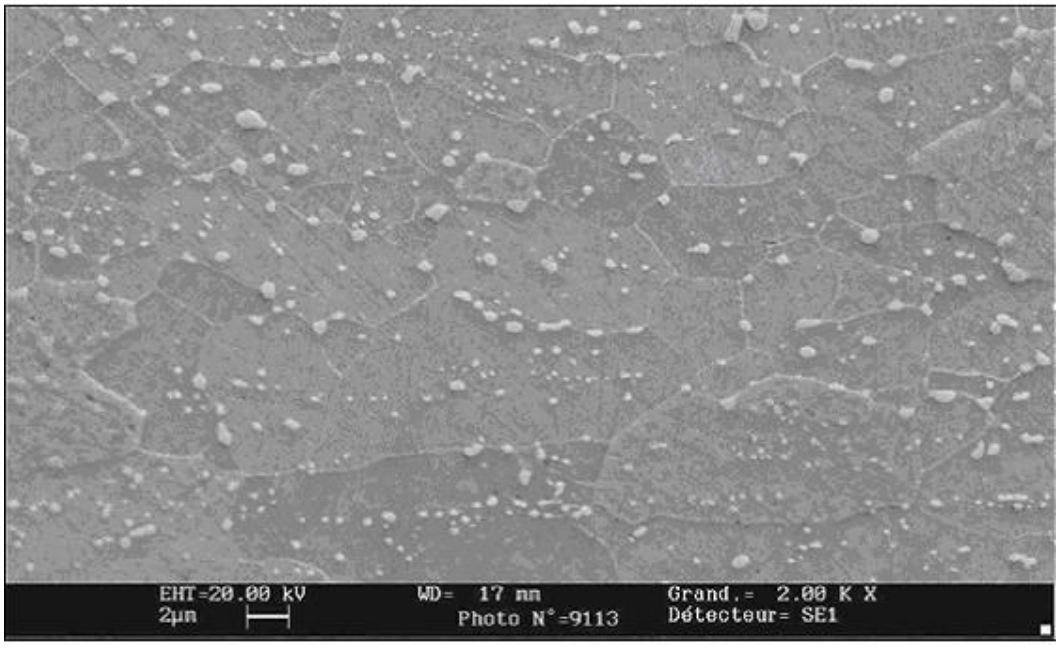


Şekil 5.43: Lepera ile dağlanmış 3800 Amperlik numune iç yapısı x1000 büyütme.

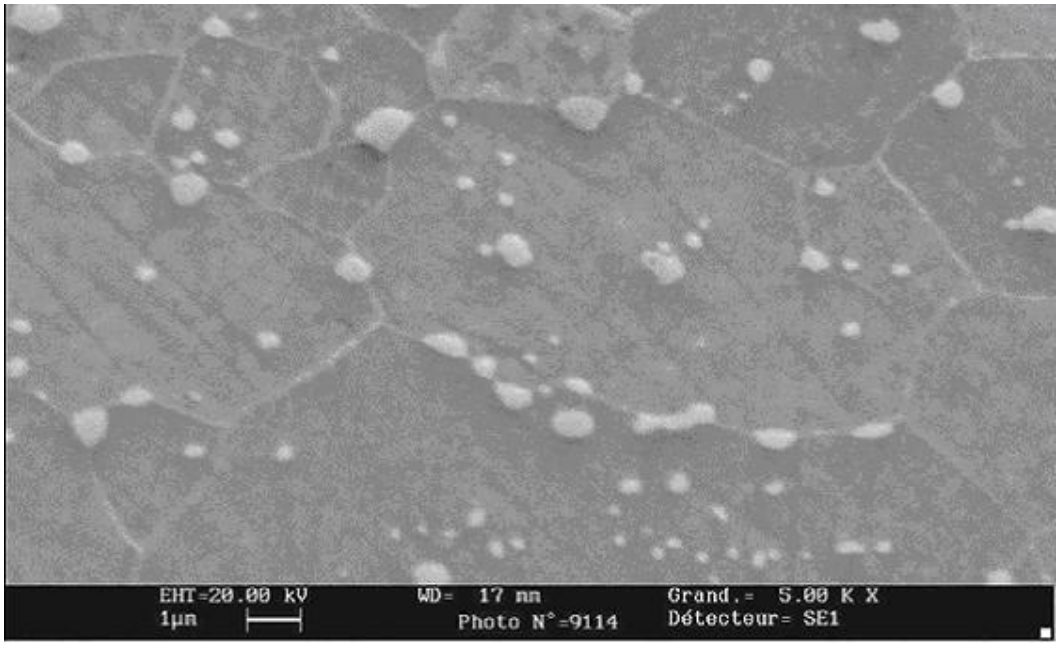
Yukarıda nitalle 3800 Amperlik numune için x50, x500, x1000 büyütme ve Lepera ile dağlanarak x1000 büyütme fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 5.44: 3800 Amperlik numune elektron mikroskobunda x1000 büyütme.



Şekil 5.45: 3800 Amperlik numune elektron mikroskobunda x2000 büyütme.



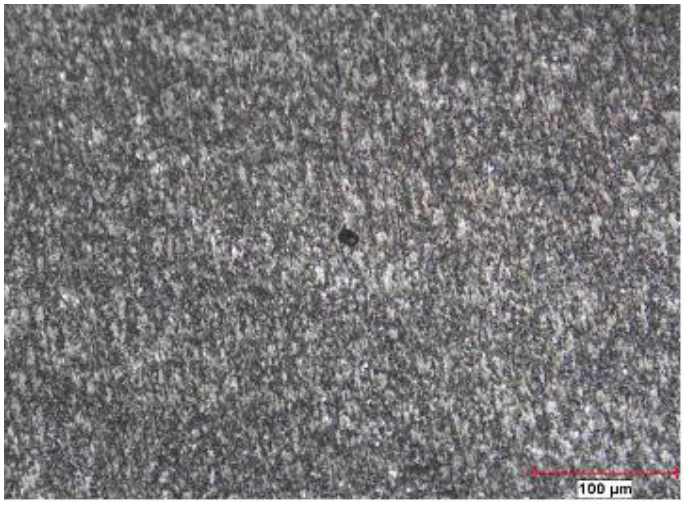
Şekil 5.46: 3800 Amperlik numune elektron mikroskobunda x5000 büyütme.

5.4.2. 3900 Amperlik Numune

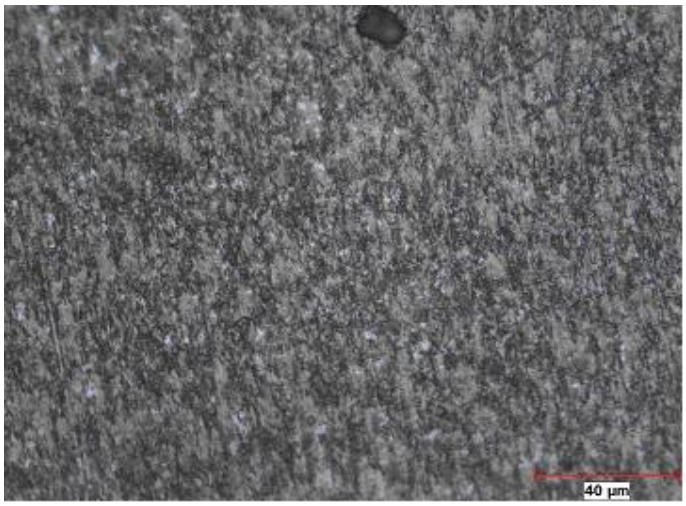
3900 Amperlik numunenin ışın mikroskobunda 100, 200, 500 ve 1000 büyütme fotoğrafları Şekil 5.47, 5.48, 5.49, 5.50' de görülmektedir. Yapıda küresel formda sementit ve martenzit kendini göstermektedir. Isıtma esnasında yapı içinde östenit bölgesine geçemeyen tanecikler sementit olarak kalmış, östenit bölgesine geçebilen tanecikler martenzite dönüşmüştür. 3800 Amperlik numuneye göre daha hızlı soğutma olduğu resimlerde görülmektedir. Yapı daha sıktır.



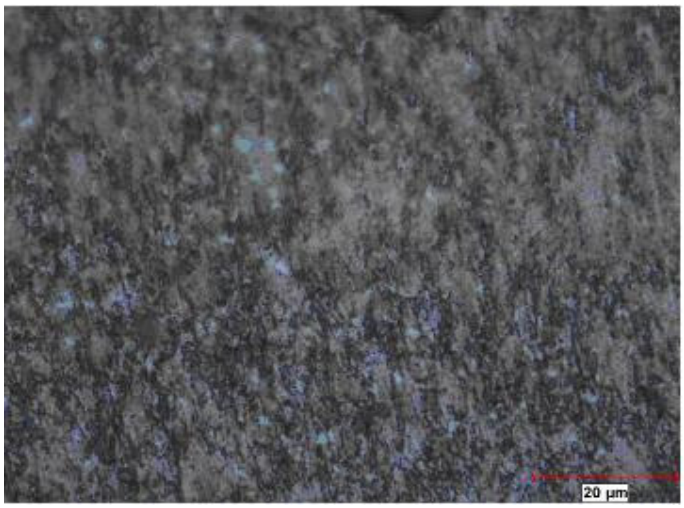
Şekil 5.47: 3900 Amperlik numune x100 büyütme.



Şekil 5.48: 3900 Amperlik numune x200 büyütme.

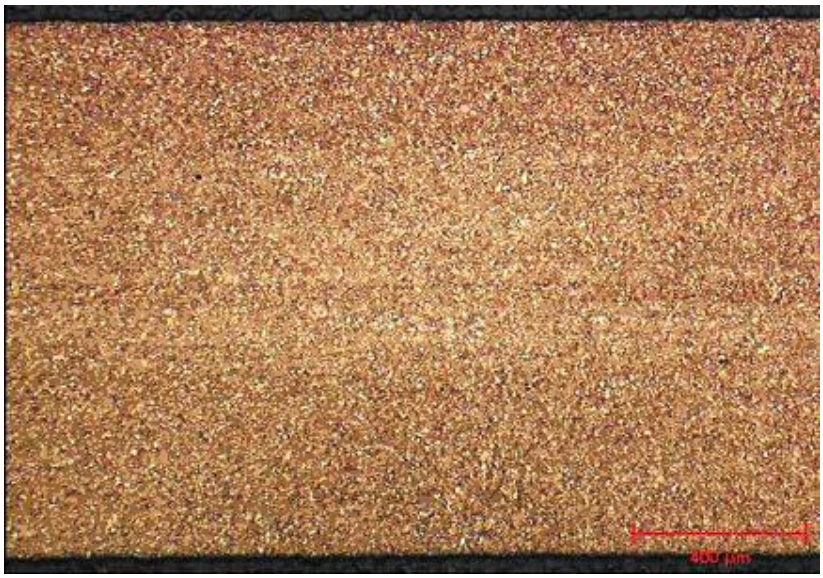


Şekil 5.49: 3900 Amperlik numune x500 büyütme.

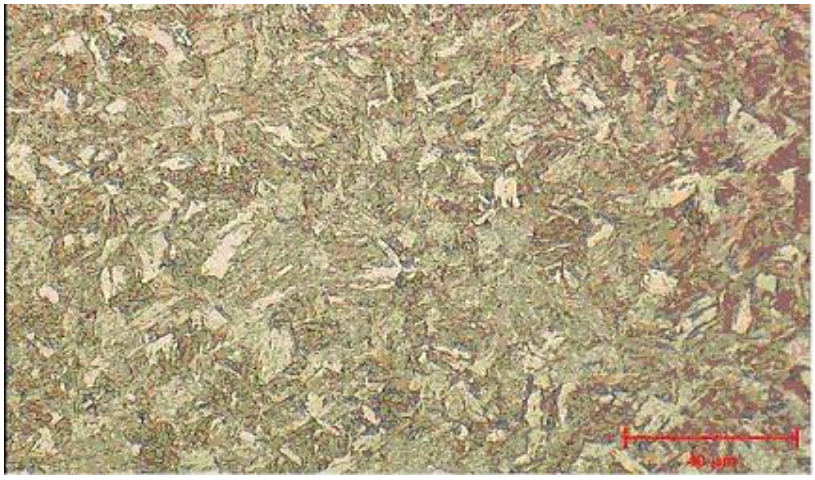


Şekil 5.50: 3900 Amperlik numune x1000 büyütme.

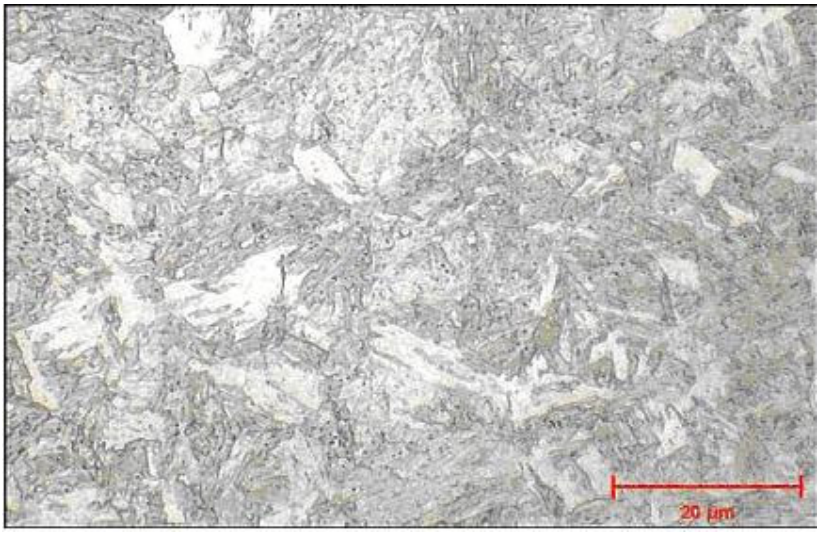
Aşağıdaki Şekil 5.51, 5.52, 5.53, 5.54' te bakalit yerine nitalle dağlanmış ve içyapısı daha net görülen fotoğrafları görmekteyiz. Şekil 5.55, 5.56, 5.57' de 3900 amperlik numuneye ait elektron mikroskobunda x1000, x2000, x5000 büyütmeyle fotoğraflanan içyapı resimlerini görüyoruz. Şekil 5.56' da görüldüğü gibi malzemedeki çatalsı yapı kendini göstermektedir. Bu yapı martenzitik yapı formudur. Şekil 5.57 ve özellikle Şekil 5.58' de tane sınırlarında ve içinde küresel formda sementit yapısı görülmektedir.



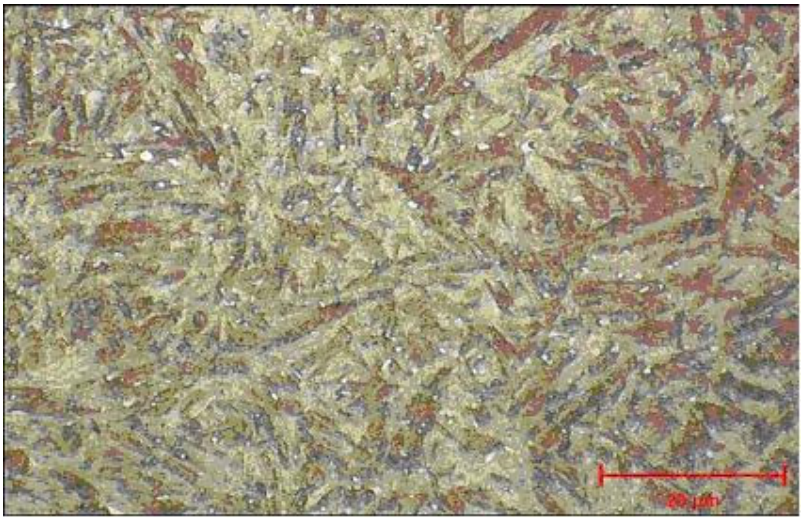
Şekil 5.51: Nitalle dağlanmış 3900 Amperlik numune iç yapısı x50 büyütme.



Şekil 5.52: Nitalle dağlanmış 3900 Amperlik numune iç yapısı x500 büyütme.

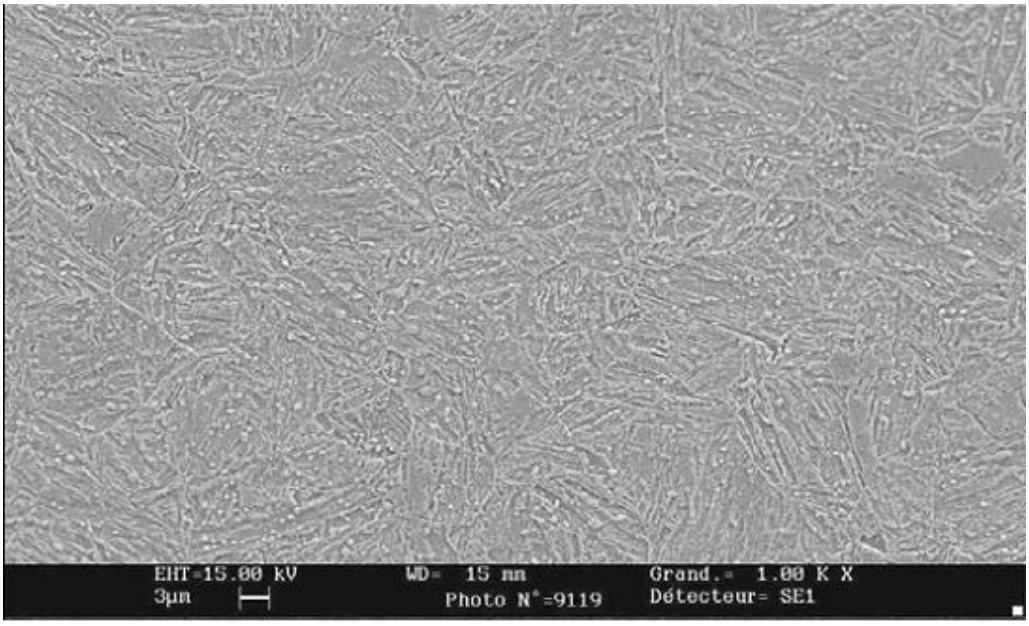


Şekil 5.53: Nitalle dağlanmış 3900 Amperlik numune iç yapısı x1000 büyütme.

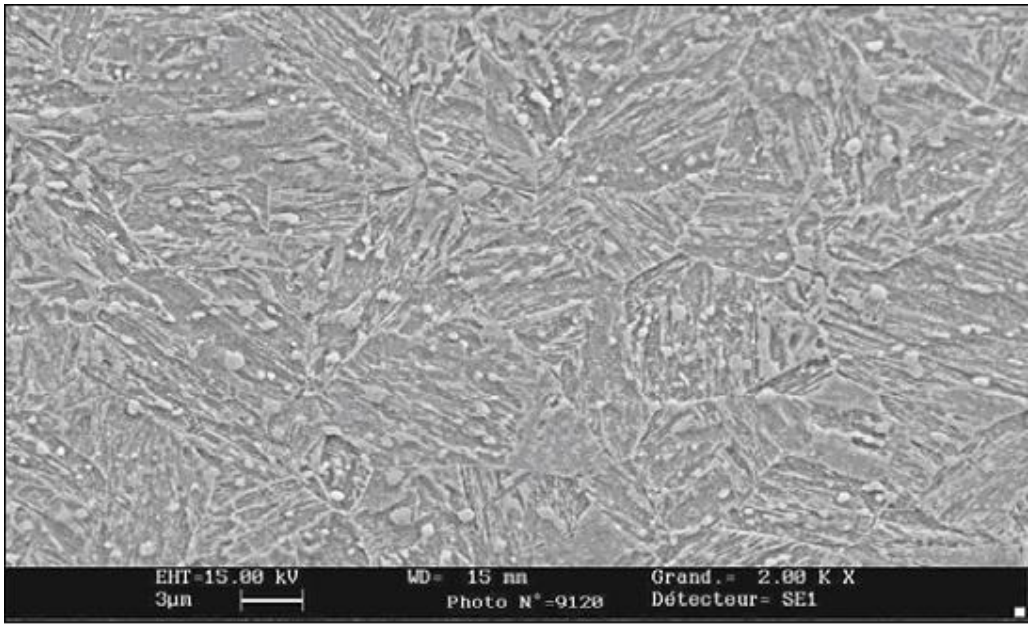


Şekil 5.54: Lepera ile dağlanmış 3900 Amperlik numune iç yapısı x1000 büyütme

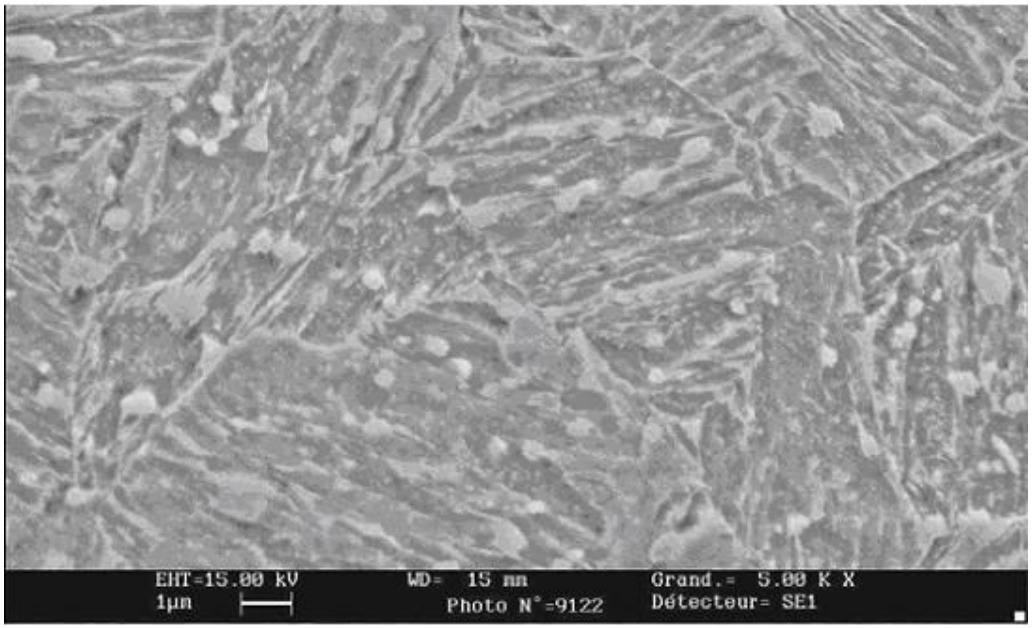
Yukarıda 3900 Amperlik numune nitalle için x50, x500, x1000 büyütme ve Lepera ile dağlanarak x1000 büyütme fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 5.55: 3900 Amperlik numune elektron mikroskobunda x1000 büyütme.



Şekil 5.56: 3900 Amperlik numune elektron mikroskobunda x2000 büyütme.

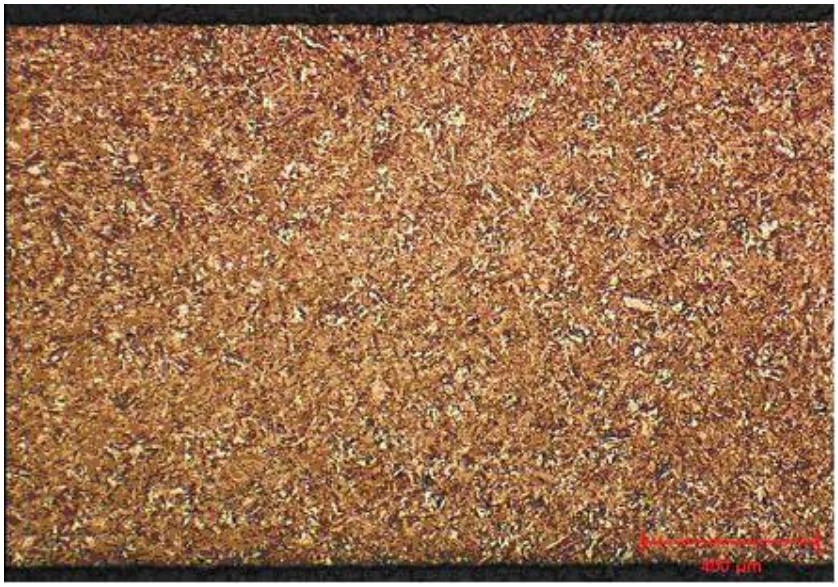


Şekil 5.57: 3900 Amperlik numune elektron mikroskobunda x5000 büyütme.

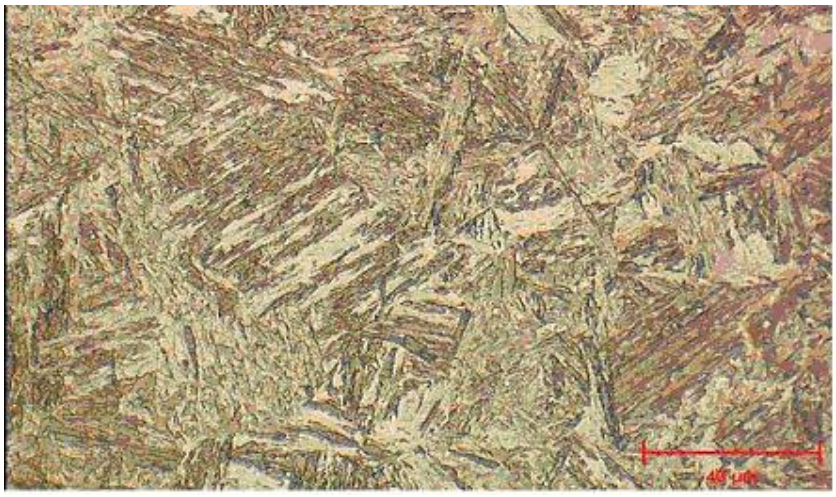
5.4.3. 4000 Amperlik Numune

4000 Amperlik numunenin yapısında küresel formda sementit ve martenzit kendini göstermektedir. Isıtma esnasında yapı içinde östenit bölgesine geçemeyen tanecikler

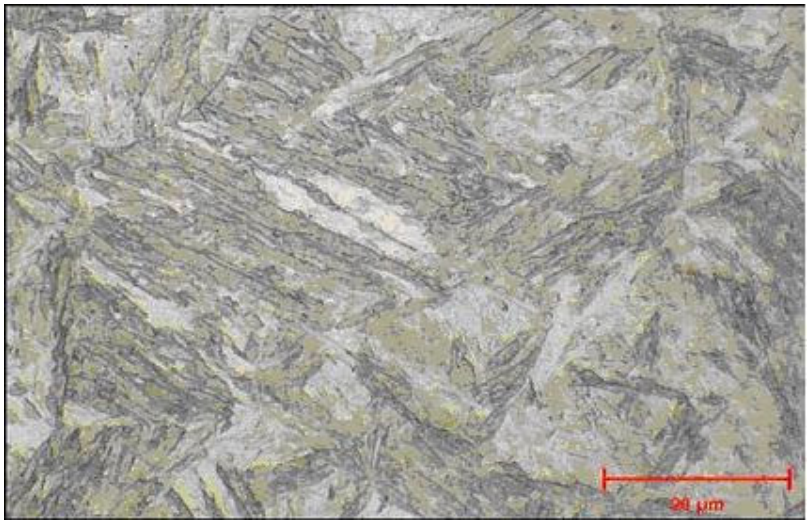
sementit olarak kalmış, östenit bölgesine geçebilen tanecikler martenzite dönüşmüştür. 3900 Amperlik numuneye göre daha hızlı soğutma olduğu resimlerde görülmektedir. Yapı daha sıktır.



Şekil 5.58: Nitalle dağlanmış 4000 Amperlik numune iç yapısı x50 büyütme.



Şekil 5.59: Nitalle dağlanmış 4000 Amperlik numune iç yapısı x500 büyütme.

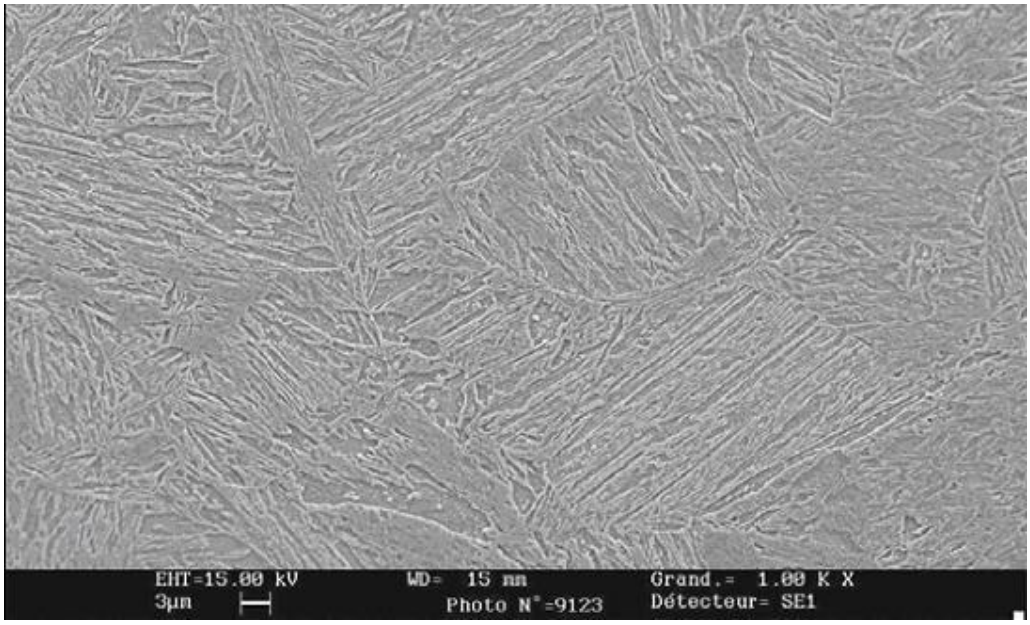


Şekil 5.60: Nitalle dağlanmış 4000 Amperlik numune iç yapısı x1000 büyütme.

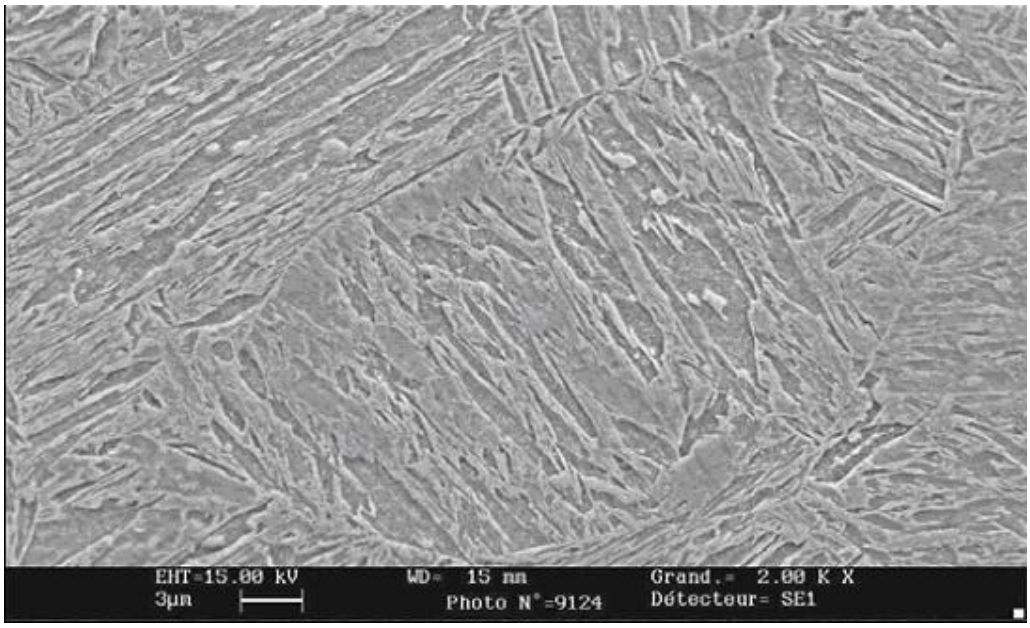


Şekil 5.61: Lepera ile dağlanmış 4000 Amperlik numune iç yapısı x1000 büyütme.

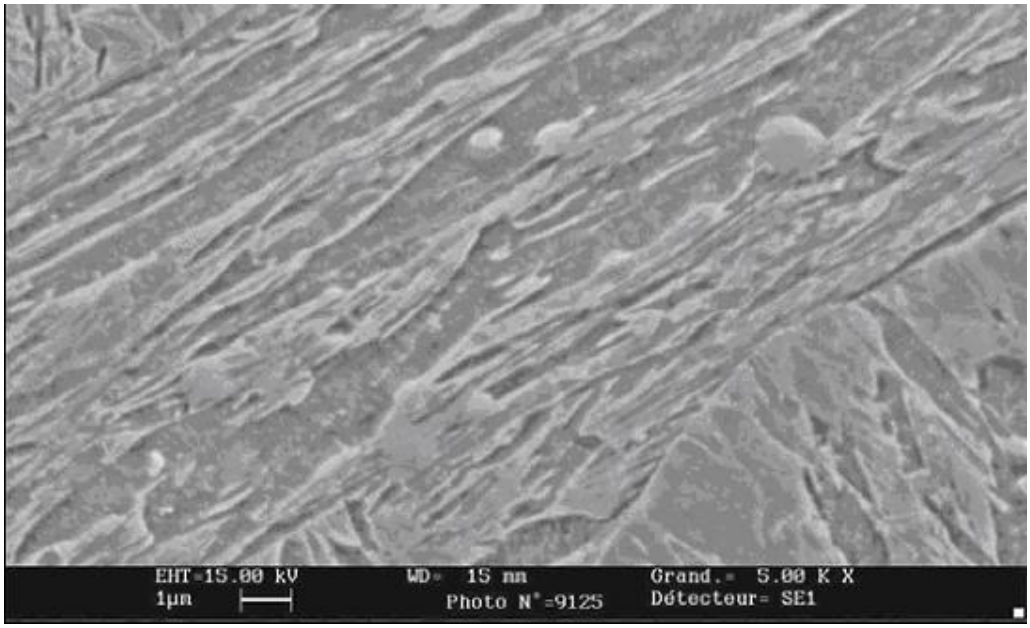
Yukarıda 4000 Amperlik numune nitalle için x50, x500, x1000 büyütme ve Lepera ile dağlanarak x1000 büyütme fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 5.62: 4000 Amperlik numune elektron mikroskobunda x1000 büyütme.



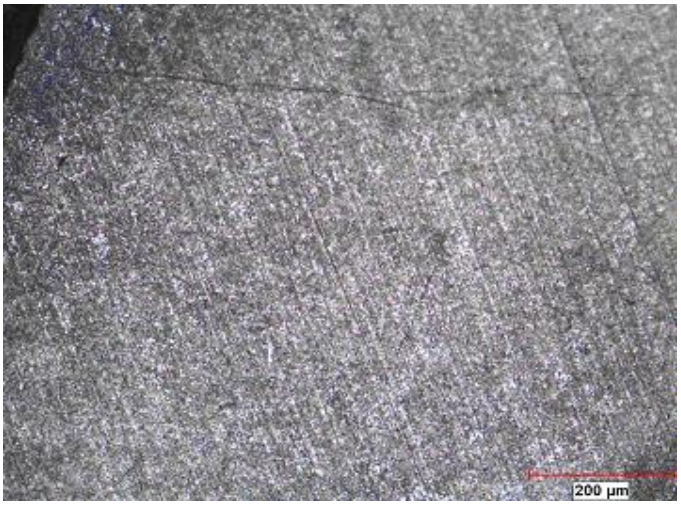
Şekil 5.63: 4000 Amperlik numune elektron mikroskobunda x2000 büyütme.



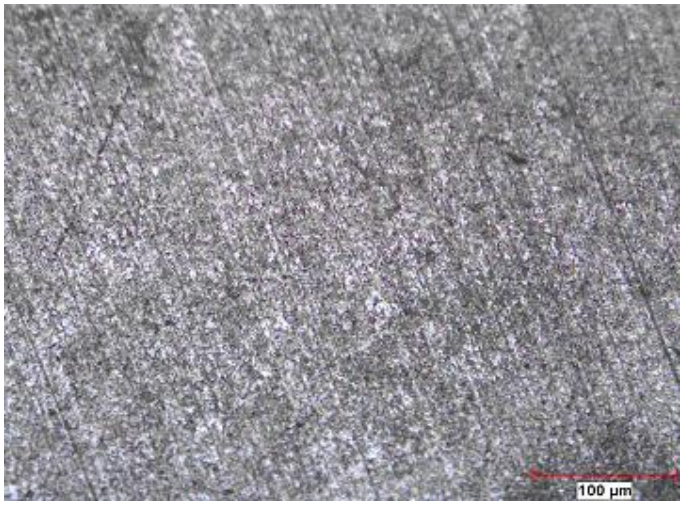
Şekil 5.64: 4000 Amperlik numune elektron mikroskobunda x5000 büyütme.

5.4.4. 4100 Amperlik Numune

4100 Amperlik numunenin ışın mikroskobunda 100, 200, 500 ve 1000 büyütme fotoğrafları Şekil 5.65, 5.66, 5.67, 5.68' de görülüyor. Martenzitik ve beynitik yapı kendini göstermektedir. Daha sık ve ince yapıya sahip olması daha hızlı bir soğuma olduğunun göstergesidir. Isıtma esnasında yapı içinde östenit bölgesine geçemeyen tanecikler sementit olarak kalmış, östenit bölgesine geçebilen tanecikler martenzit ve beynite dönüşmüştür.



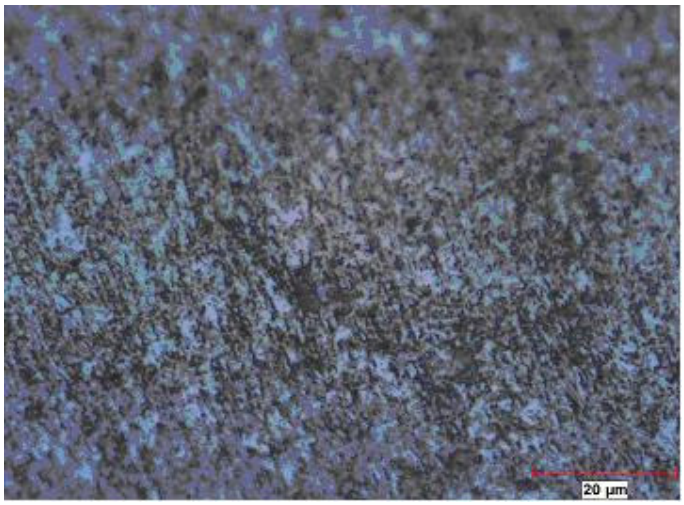
Şekil 5.65: 4100 Amperlik numune x100 büyütme.



Şekil 5.66: 4100 Amperlik numune x200 büyütme.



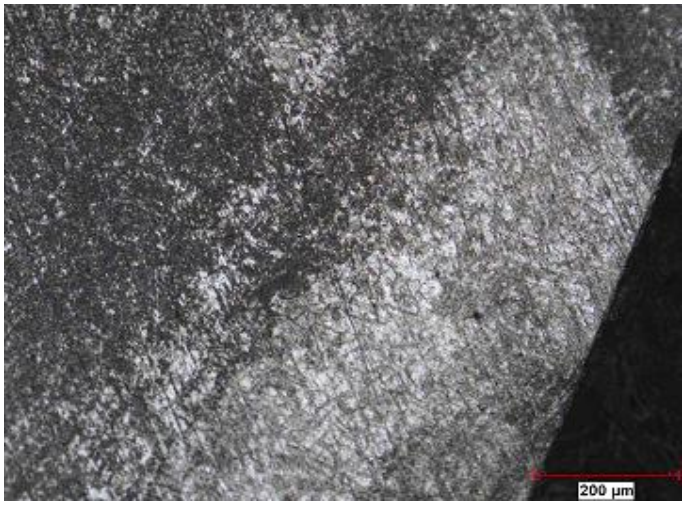
Şekil 5.67: 4100 Amperlik numune x500 büyütme.



Şekil 5.68: 4100 Amperlik numune x1000 büyütme.

5.4.5. 4200 Amperlik Numune

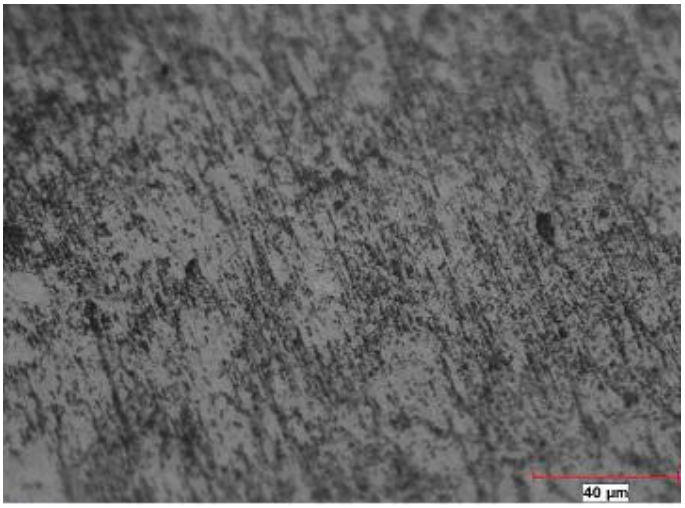
4200 Amperlik numunenin ışın mikroskobunda 100, 200, 500 ve 1000 büyütme fotoğrafları Şekil 5.69, 5.70, 5.71, 5.72' de görülüyor. Martenzitik ve beynitik yapı kendini göstermektedir. Daha seyrek yapıya sahip olması daha yavaş bir soğuma olduğunun göstergesidir. Isıtma esnasında yapı içinde östenit bölgesine geçemeyen tanecikler sementit olarak kalmış, östenit bölgesine geçebilen tanecikler martenzit ve beynite dönüşmüştür.



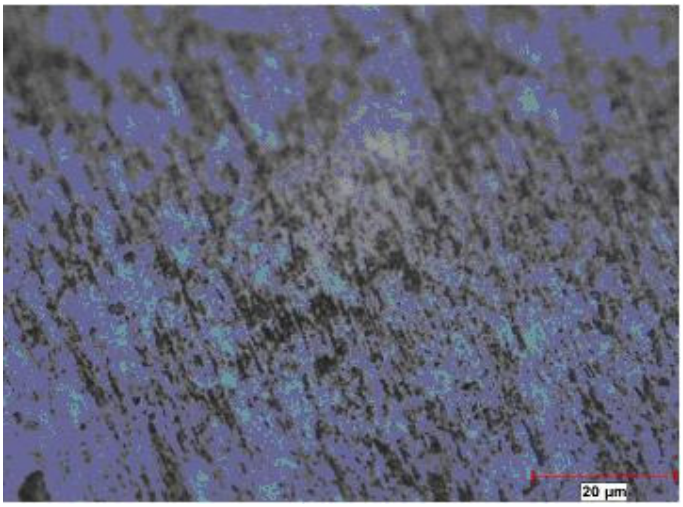
Şekil 5.69: 4200 Amperlik numune x100 büyütme.



Şekil 5.70: 4200 Amperlik numune x200 büyütme.



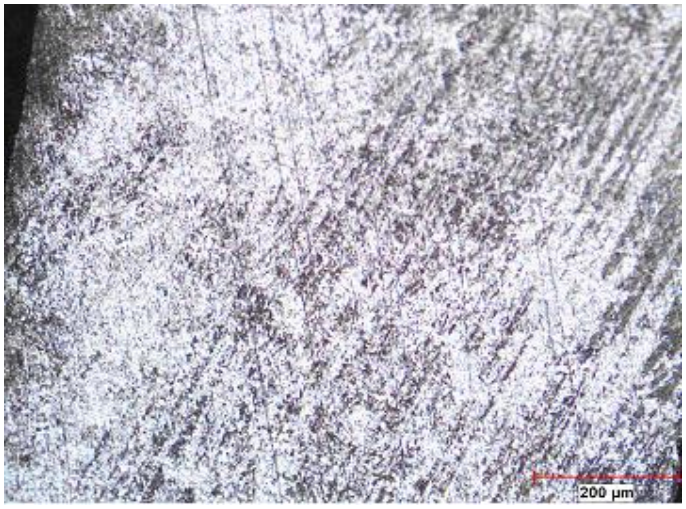
Şekil 5.71: 4200 Amperlik numune x500 büyütme.



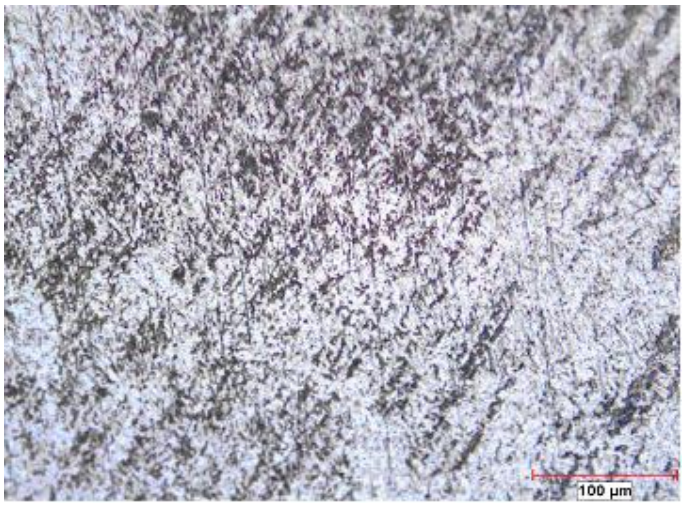
Şekil 5.72: 4200 Amperlik numune x1000 büyütme.

5.4.6. 4200 Amperlik Hava Soğutmalı Numune

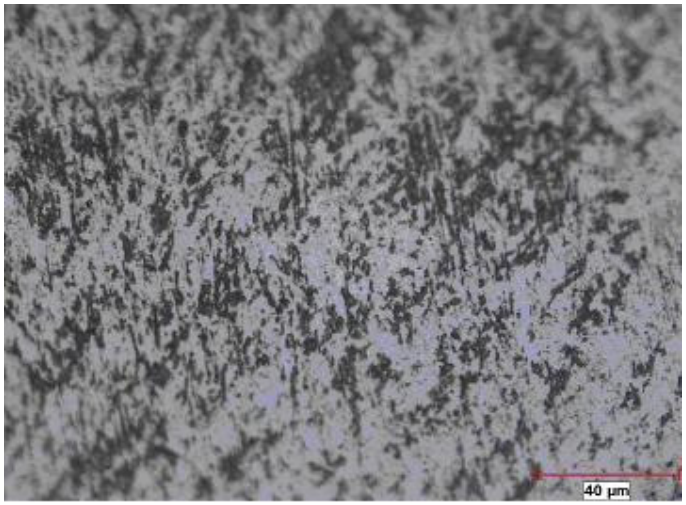
4200 Amperlik kalıpla birlikte havayla soğutulan numunenin ışın mikroskobunda x100, 200, 500 ve 1000 büyütme fotoğrafları Şekil 5.73, 5.74, 5.75, 5.76' da görülmektedir. Yapıda küresel formda sementit, martenzit ve beynitik yapı kendini göstermektedir. Isıtma esnasında yapı içinde östenit bölgesine geçemeyen tanecikler sementit olarak kalmış, östenit bölgesine geçebilen tanecikler tekrar hızla soğuyunca martenzite dönüşmüştür. Fotoğraflarda görülen çatalsı yapı martenzitik yapı formu olarak kendini göstermektedir.



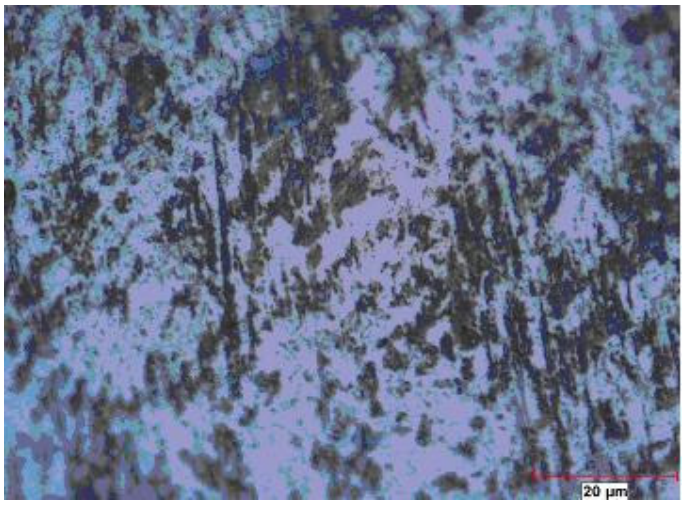
Şekil 5.73: 4200 Amperlik hava soğutmalı numune x100 büyütme.



Şekil 5.74: 4200 Amperlik hava soğutmalı numune x200 büyütme.



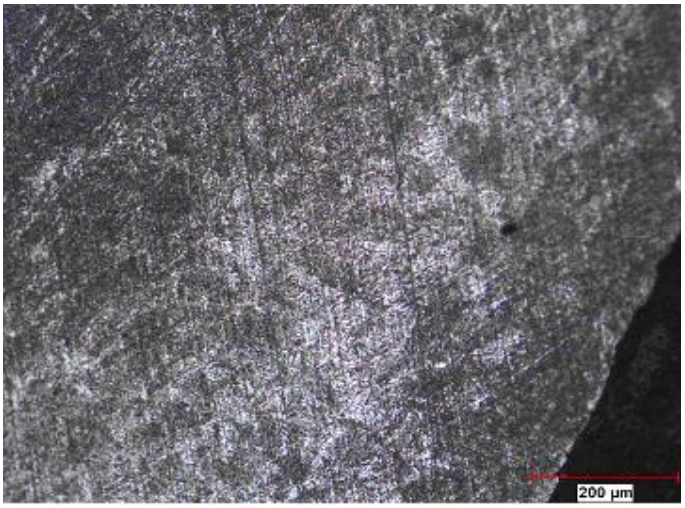
Şekil 5.75: 4200 Amperlik hava soğutmalı numune x500 büyütme.



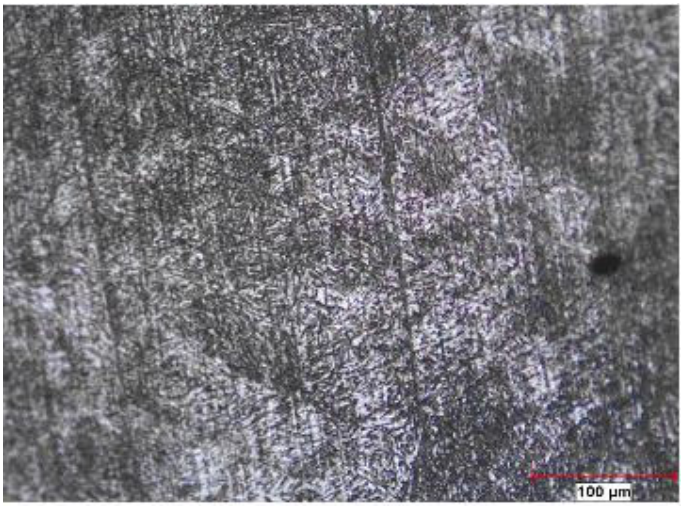
Şekil 5.76: 4200 Amperlik hava soğutmalı numune x1000 büyütme.

5.4.7. 4300 Amperlik Numune

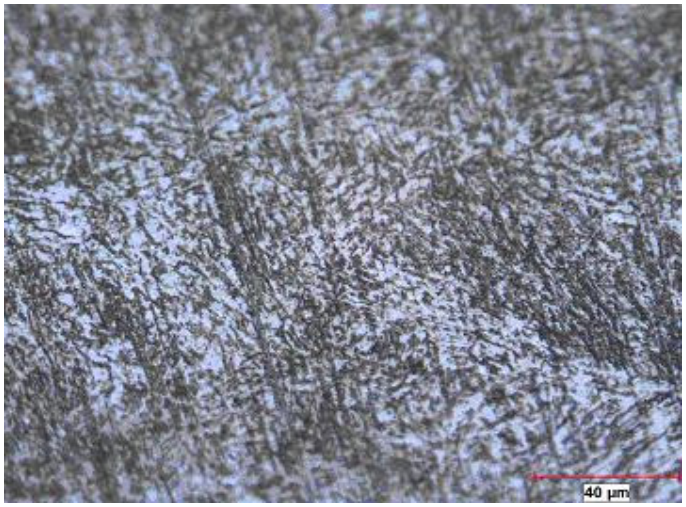
4300 Amperlik, ısıtılırken hava püskürtülen ve daha sonra kalıpla birlikte havayla soğutulan numunenin ışın mikroskobunda x100, 200, 500 ve 1000 büyütme fotoğrafları Şekil 5.77, 5.78, 5.79, 5.80' de görülmektedir. Yapıda küresel formda sementit, martenzit ve beynitik yapı kendini göstermektedir. Isıtma esnasında yapı içinde östenit bölgesine geçemeyen tanecikler sementit olarak kalmış, östenit bölgesine geçebilen tanecikler tekrar hızla soğuyunca martenzite dönüşmüştür.



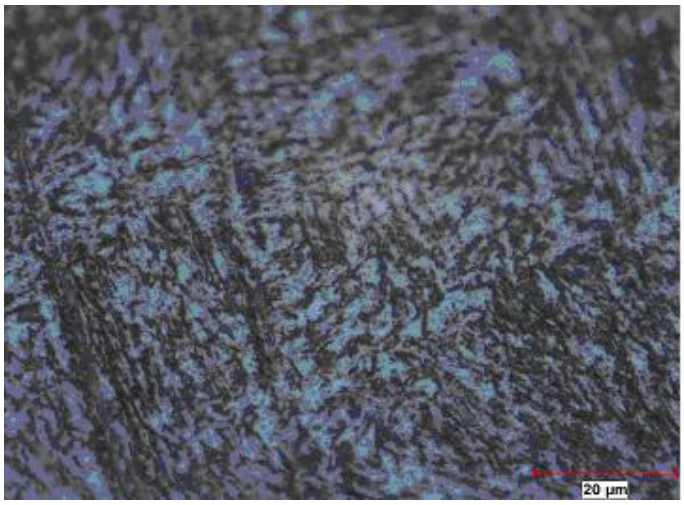
Şekil 5.77: 4300 Amperlik numune x100 büyütme.



Şekil 5.78: 4300 Amperlik numune x200 büyütme.



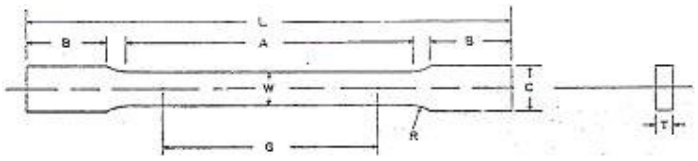
Şekil 5.79: 4300 Amperlik numune x500 büyütme.



Şekil 5.80: 4300 Amperlik numune x1000 büyütme.

5.4.8. Çekme Deneyi

Çekme deneyleri İTÜ Makina Fakültesi Mekanik Laboratuarında yapıldı. Çekme numuneleri için gerekli saclar Maslak İTÜ Kosgeb te MetalForm Müh. Tasarım İml. San. Ltd. Şti.' nden temin edildi. Numuneler 250*20*1,4 mm ölçülerinde kesildi ve standart çekme numunesi hazırlandı. Standart çekme numuneleri freze tezgahında işlendi. Şekil 5.81 de standart çekme numunesi görülmektedir.



Şekil 5.81: Standart çekme numunesi.

G – ölçme bölgesi uzunluğu (mm)

W – genişlik (mm)

T – kalınlık (mm)

R – radyüs (mm)

L – sacın uzunluğu

A – boyun bölgesi uzunluğu

B – tutma bölgesi uzunluğu

C – tutma bölgesi genişliği

Sac şeklinde numuneler boyun bölgesi genişliği (W) 12,5 mm ölçü standardında kesilir. Bu ölçüye göre teknik resimde görülen diğer ölçüler standarda göre işlenir. Çekme numunemizde bu ölçüler:

W – 12,5 mm

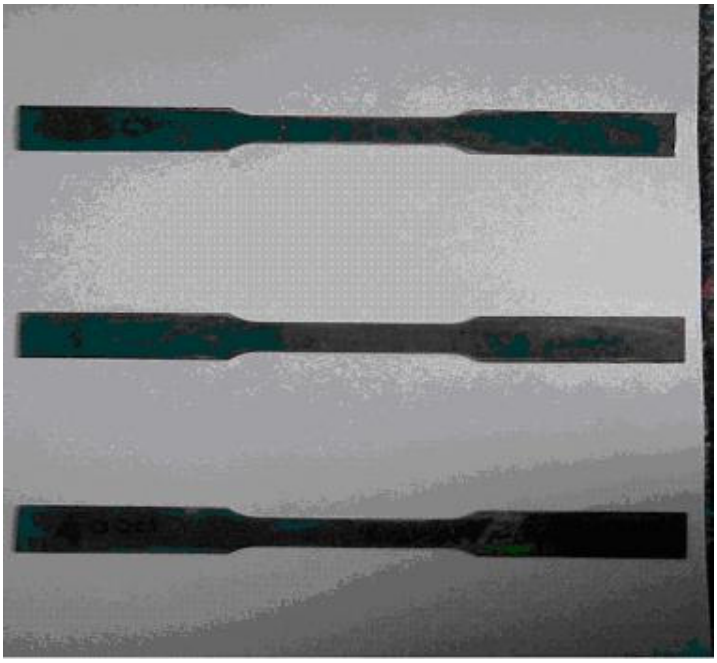
G – 50 mm

A – 57 mm

C – 20 mm

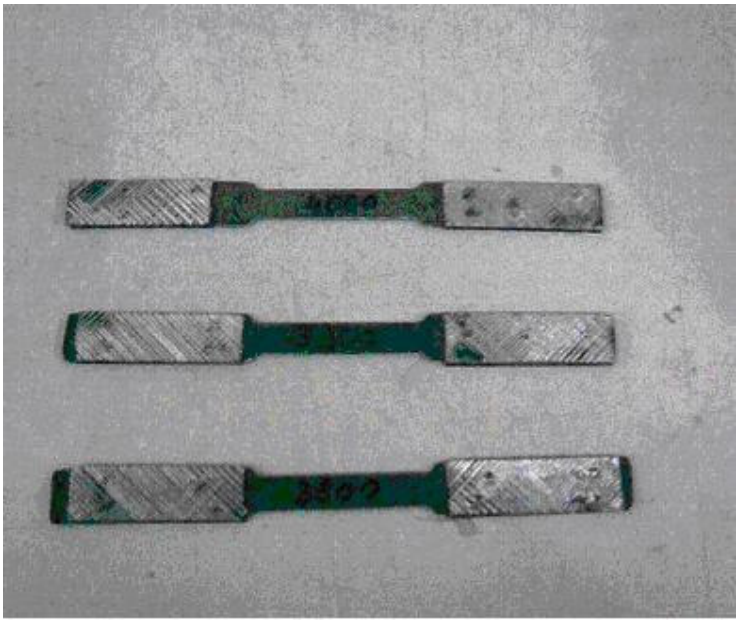
L – 250 mm

Freze tezgahında standart değerlerde işlenen ölçülerdir. Şekil 5.82' de sırasıyla 3800, 3900, 4000 Amperlik çekme numunelerine ait fotoğraflar görülmektedir.



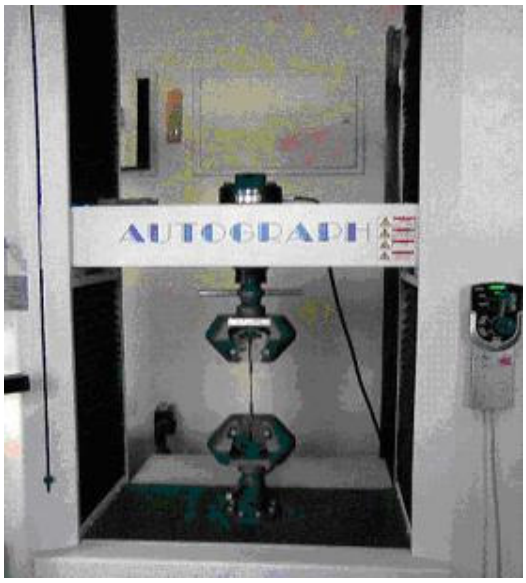
Şekil 5.82: 3800, 3900, 4000 Amperlik çekme numuneleri.

Docol 22MnB5 çeliğinin sertliği sertlik deneyi bölümünden de hatırladığımız gibi yüksektir. Bu sebeple çekme deneyi esnasında sacın tutucu çenelerden sıyrılma tehlikesi vardır. Bunun üstesinden gelebilmek için çekme numunelerinin tutma bölgesine ısıl işlem uygulanmamış Docol 22MnB5 çeliği kaynatıldı. Kaynak işlemi punto kaynağı ile sacın üzerine nokta vuruşları yapılarak uygulandı. Ek olarak kaynatılan bu plakaların üzerine planya ile çapraz ince kanallar açıldı. Bu sayede çekme numunesinin tutma bölgesinde sürtünme katsayısı arttırıldı ve Docol malzemenin çeneler tarafından sıyrılmadan tutulması kolaylaştırıldı.



Şekil 5.83: Çekme numunelerine sürtünmeyi artırmak için puntolanan plakalar.

Bu işlemden sonra çekme işleminin yapılması için hiçbir problem kalmadığına karar verildi ve çekme deneyinin yapılmasına geçildi. Şekil 5.84' te deneylerin yapıldığı çekme tezgahı görülmektedir.



Şekil 5.84: Çekme tezgahı.

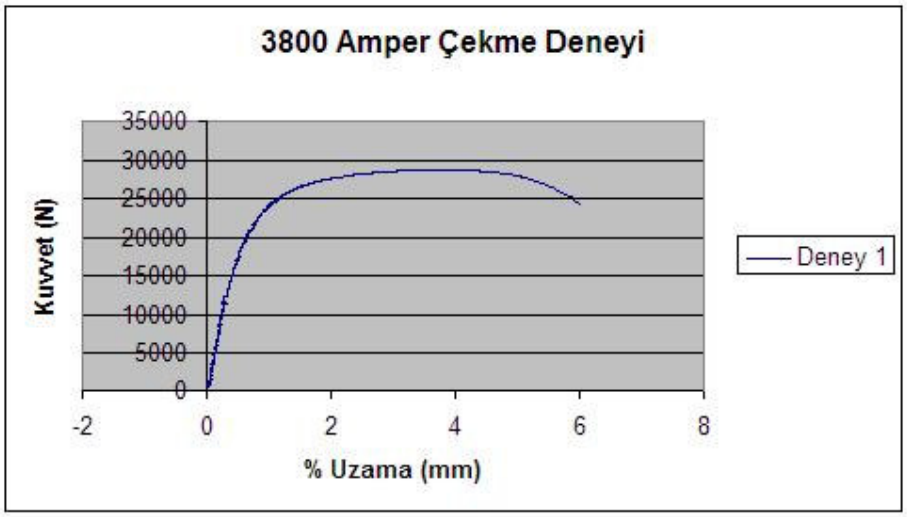
3800, 3900, 4000 Amperlik numuneler 5 mm/dak çekme hızına tabi tutuldu ve %

uzama, kuvvet diyagramlarıyla Docol 22MnB5 sacına ait birim şekil değişimi, akma dayanımı ve kopma dayanımı değerleri yorumlandı.

5.4.8.1. 3800 Amperlik Numune Çekme Deneyi

3800 amperlik numuneye ait % uzama – kuvvet diyagramı aşağıda şekilde görülmektedir. Bu eğride akma kuvveti 21040,6 N luk kuvvet değerinde, akma dayanımı 1183,39 MPa değerinde bulunmuştur. Çekme kuvveti 28717,2 N, çekme dayanımı ise 1615,14 MPa dır. Kopma anındaki maksimum kuvvet 24150 N, dayanım ise 1358,27 MPa dır.

3800 Amperlik numune için birim şekil değişimi % 6,01875 tir. Ayrıca aşağıda Şekil 5.85' te 3800 Amperlik numuneye ait çekme diyagramı görülmektedir. Şekil 5.86' da 3800 Amperlik numuneye ait kopma fotoğrafı görülmektedir.

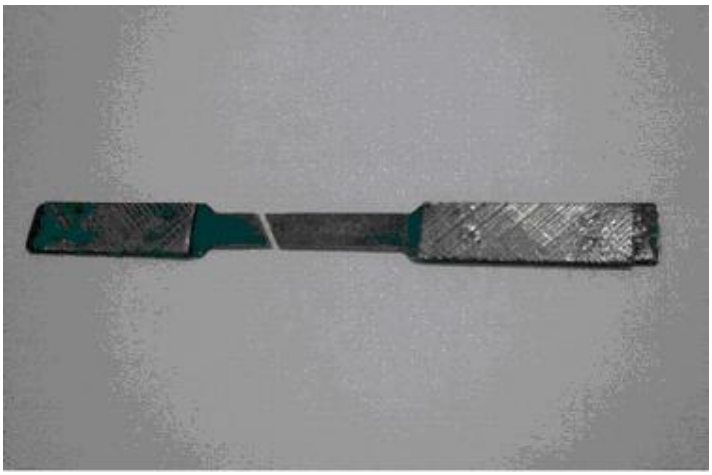


Şekil 5.85: 3800 Amperlik numune çekme diyagramı.

Tablo 5.2: 3800 amperlik çekme deneyleri

3800 Amperlik Çekme Deneyleri

	Akma Kuvveti (N)	Akma Dayanımı (N/mm2)	Çekme Kuvveti (N)	Çekme Dayanımı (N/mm2)	Kopma Kuvveti (N)	Kopma Dayanımı (N/mm2)	% Uzama (mm)
3800_ Deney1	23481,3	1320,66	28417,2	1598,27	23873,4	1342,71	5,73750
3800_ Deney2	21232,8	1194,20	26265,6	1477,26	22795,3	1282,08	6,40625
3800_ Deney3	21040,6	1183,39	28717,2	1615,14	24150,0	1358,27	6,01875
3800_ Deney4	24762,5	1392,72	27284,4	1534,55	23917,2	1345,17	5,77500

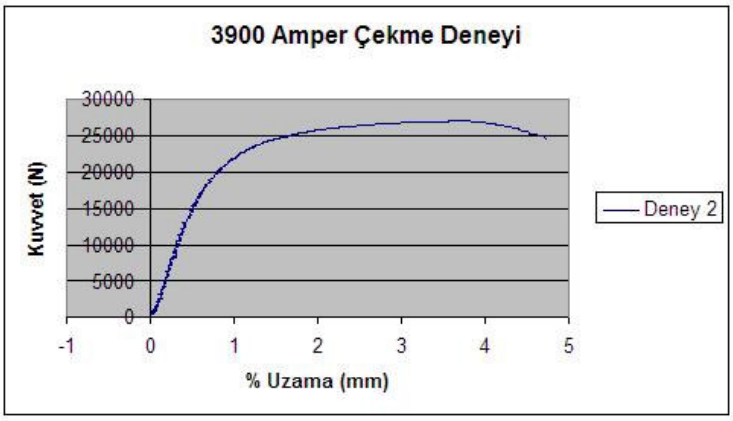


Şekil 5.86: – 3800 Amperlik çekme sonrası numune.

5.4.8.2. 3900 Amperlik Numune Çekme Deneyi

3900 amperlik numuneye ait % uzama – kuvvet diyagramı aşağıda şekilde görülmektedir. Bu eğride akma kuvveti 20120,3 N luk kuvvet değerinde, akma dayanımı 1131,63 MPa değerinde bulunmuştur. Çekme kuvveti 26993,8 N, çekme dayanımı ise 1518,21 MPa dır. Kopma anındaki maksimum kuvvet 24460,9 N, dayanım ise 1375,76 MPa dır.

3900 Amperlik numune için birim şekil değişimi % 4,75000 tir. Ayrıca aşağıda Şekil 5.87' de 3900 Amperlik numuneye ait çekme diyagramı görülmektedir. Şekil 5.88' de 3900 Amperlik numuneye ait kopma fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 5.87: 3900 Amperlik numune çekme diyagramı.

Tablo 5.3: 3900 amperlik çekme deneyleri

3900 Amperlik Çekme Deneyleri

	Akma Kuvveti (N)	Akma Dayanımı (N/mm2)	Çekme Kuvveti (N)	Çekme Dayanımı (N/mm2)	Kopma Kuvveti (N)	Kopma Dayanımı (N/mm2)	% Uzama (mm)
3900_ Deney1	21553,1	1212,21	26929,7	1514,61	22979,7	1292,45	7,02500
3900_ Deney2	22682,8	1275,75	28545,3	1605,47	24892,2	1400,01	7,18750
3900_ Deney3	22821,9	1283,57	28085,9	1579,64	24096,9	1355,28	7,03750
3900_ Deney4	20120,3	1131,63	26993,8	1518,21	24460,9	1375,76	4,75000

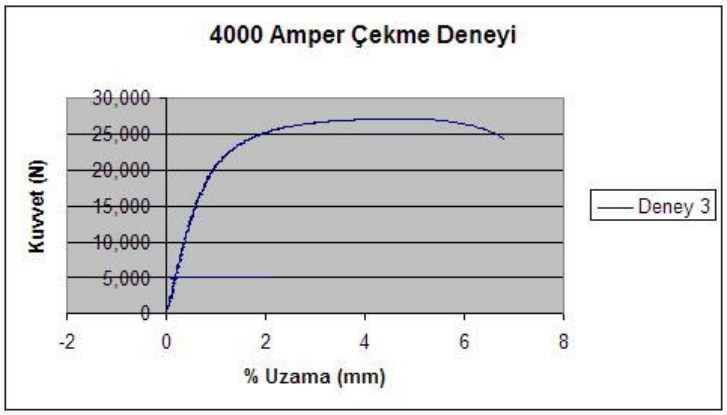


Şekil 5.88: 3900 amperlik numune çekme deneyi.

5.4.8.3. 4000 Amperlik Numune Çekme Deneyi

4000 amperlik numuneye ait % uzama – kuvvet diyagramı aşağıda şekilde görülmektedir. Bu eğride akma kuvveti 20506,3 N luk kuvvet değerinde, akma dayanımı 1153,33 MPa değerinde bulunmuştur. Çekme kuvveti 27118,8 N, çekme dayanımı ise 1525,24 MPa dır. Kopma anındaki maksimum kuvvet 24293,8 N, dayanım ise 1366,35 MPa dır.

4000 Amperlik numune için birim şekil değişimi % 6,81250 dir. Ayrıca aşağıda Şekil 5.89' da 4000 Amperlik numuneye ait çekme diyagramı görülmektedir. Şekil 90' da 4000 Amperlik numuneye ait kopma fotoğrafı görülmektedir.

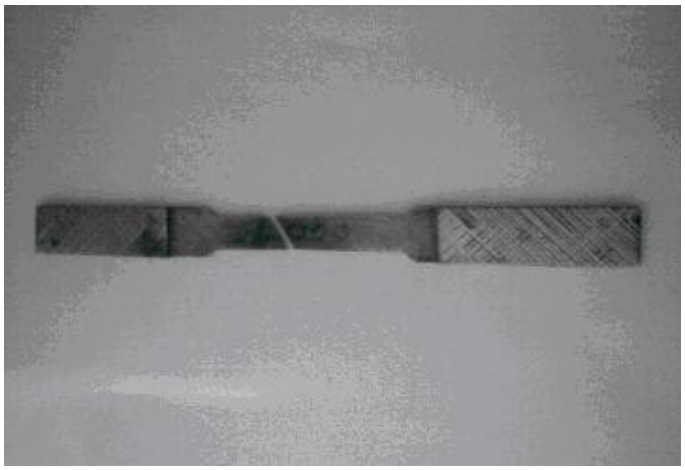


Şekil 5.89: 4000 Amperlik numune çekme diyagramı.

Tablo 5.4: 4000 amperlik çekme deneyleri

4000 Amperlik Çekme Deneyleri

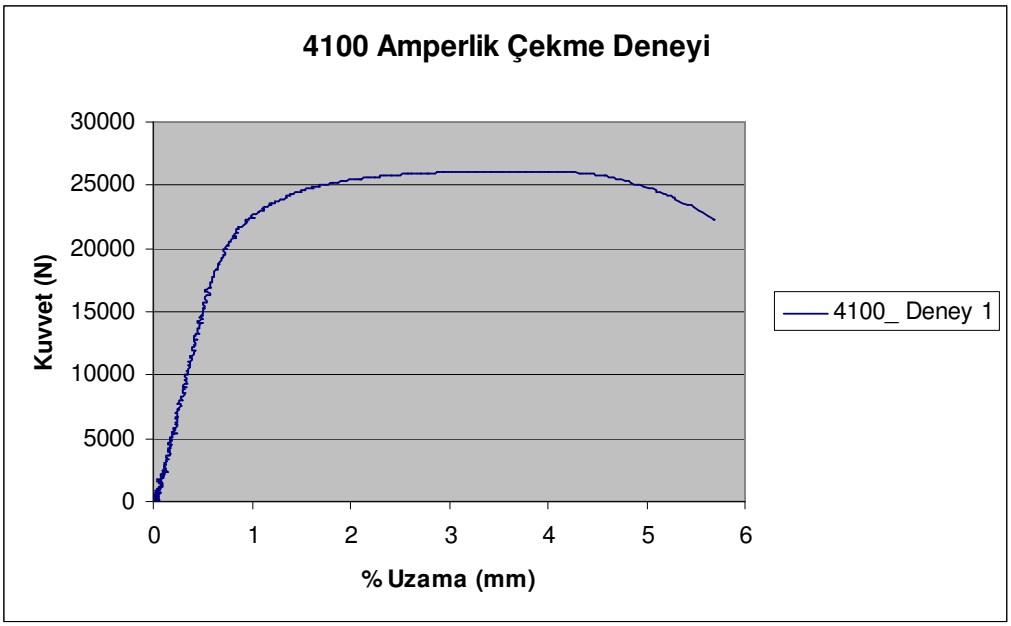
	Akma Kuvveti (N)	Akma Dayanımı (N/mm2)	Çekme Kuvveti (N)	Çekme Dayanımı (N/mm2)	Kopma Kuvveti (N)	Kopma Dayanımı (N/mm2)	% Uzama (mm)
4000_ Deney1	21776,6	1224,78	27162,5	1527,70	23607,8	1327,77	6,09375
4000_ Deney2	21654,7	1217,92	26765,6	1505,38	22825,0	1283,75	7,08125
4000_ Deney3	22168,8	1246,84	27120,3	1525,33	25220,3	1418,47	3,87500
4000_ Deney4	20506,3	1153,33	27118,8	1525,24	24293,8	1366,35	6,81250



Şekil 5.90: 4000 amperlik numune çekme deneyi.

5.4.8.4. 4100 Amperlik Numune Çekme Deneyi

4100 amperlik numuneye ait % uzama – kuvvet diyagramı aşağıda şekilde görülmektedir. 4100 Amperlik numunenin tokluğunun diğer numunelere göre daha düşük olduğu grülmektedir ki mermi, sacı kırmıştır.

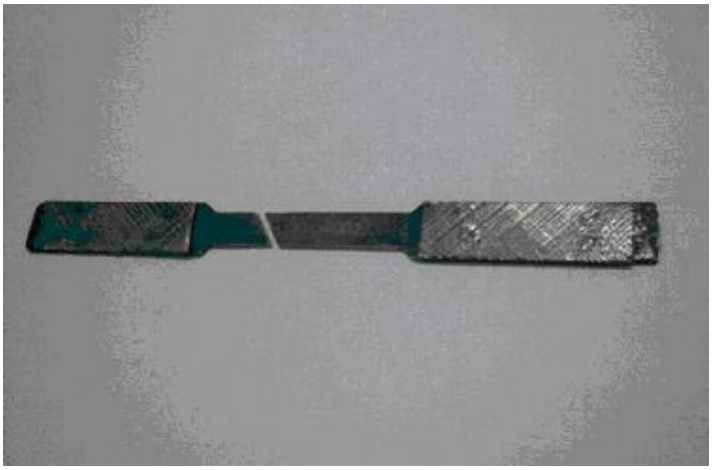


Şekil 5.91: 4100 amperlik numune çekme deneyi.

Tablo 5.5: 4100 amperlik çekme deneyleri

4100 Amperlik Çekme Deneyleri

	Akma Kuvveti (N)	Akma Dayanımı (N/mm2)	Çekme Kuvveti (N)	Çekme Dayanımı (N/mm2)	Kopma Kuvveti (N)	Kopma Dayanımı (N/mm2)	% Uzama (mm)
4100_ Deney1	21492,2	1208,78	26268,8	1477,43	22110,9	1243,58	6,59375
4100_ Deney2	21932,8	1233,57	26132,8	1469,79	22210,9	1249,21	5,67500
4100_ Deney3	21768,8	1224,34	26312,5	1479,89	23489,1	1321,09	3,61875



Şekil 5.92: 4100 amperlik numune çekme deneyi.

5.5. İyi Bir Zırhta Olması Gereken Özellikler

1. Ön blok, yüksek çarpma mukavemetine sahip olmalı (örneğin seramik zırh). Bu sayede merminin hızını yavaşlatarak kinetik enerjisinin emilmesini sağlamalı,

2. Mermide meydana getireceği form değişikliği ile deformasyonu zorlaştırmalı,

3. Arka tabakada ise enerji emiş kapasitesi yüksek bir yapı tercih edilmeli. Kompozit malzemeler bu yapı için uygundur,

4. Zırh, etkin bir ağırlık tasarrufu sağlamaya yönelik imal edilmeli ve perforasyonu önleme görevini üstlenebilmeli,

5. Mermi geometrisini -formunu- bozarak çarpma yüklerinin daha geniş bir alana yayılmasını sağlamalı,

6. Zırhlardan, sadece merminin zırh içinde ilerlemesini engellemeleri değil, önemli yapısal yükleri taşımaları da beklenir,

7. Zırhın kullanıldığı aracın ya da giysinin vb. etkinliğini arttırmak için "stealth" adı verilen kamuflaj karakteristiğini iyileştirmede kullanılan en dış yapıya uygun katman yerleştirilmesi önemlidir,

8. Personel ve teçhizat emniyetini geliştirmek ve ateş, duman ve toksik koruma

yeteneğini arttırmak için de , “phenolic” türü değişik kompozit yapıların zırhın yapısına eklenmesi tavsiye edilir,

9. Zırh, çarpma sonrasındaki hasarı asgariye indirecek ve tamir, yeniden kullanım kabiliyetini kolaylaştıracak şekilde tasarlanmalı.

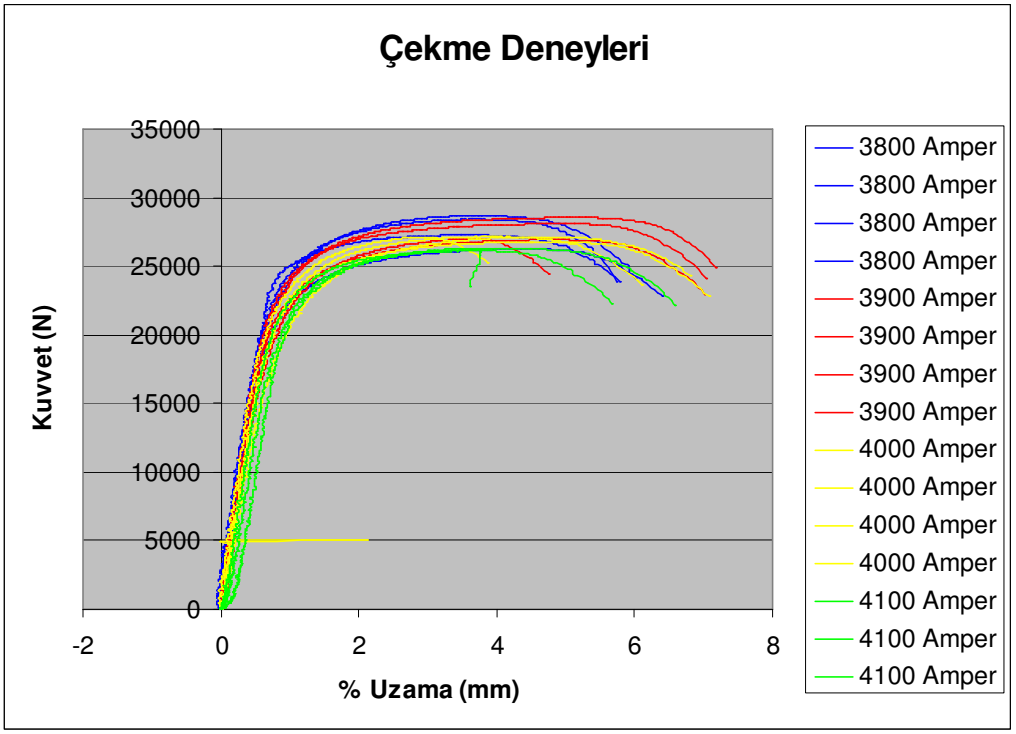
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada balistik malzemelerde yüksek dayanım ve yeterli sünekliliğe imkan veren mikroyapının istendiği anlaşıldı. Bunu sağlayan mikroyapı beynitik ve martenzitik içerikli mikroyapıdır. Bu sayede numune, merminin hareketine karşı şekil değiştirerek tepki verirken yüksek dayanımıyla da merminin geçişini engellemeye yönelik direnç sağlar.

Yüksek sertlik değerlerinin balistik malzemeler için çok önemli olduğu anlaşıldı. Çünkü yüksek sertlik değerlerine sahip malzemeler balistik darbe anında düşük sertlik değerlerine sahip malzemelere göre, mermi ucunu kırıp daha çok kütleştirerek etkinliğini azaltmakta ve yüksek balistik koruma sağlamaktadır. Ayrıca mermi ucundaki kütleşmeyle, balistik korumayı arttırmak için ikinci bir arka plaka kullanıldığı taktirde bu plakaya etki eden darbe kuvvetinin daha geniş bir alanda etkisini göstermesi sağlanır. Bu sayede merminin malzeme üzerinde uyguladığı noktasal kuvvette azalma gözlemlenir.

Yapılan çekme deneylerine ait sonuçlar Şekil 6.1' deki eğriye göre değerlendirildi. Şekilde de görüldüğü gibi 3800, 3900, 4000 Amperlik numuneler 4100 Amperlik numunelere göre daha iyi tokluğa sahiptir ki 4100 Amperlik numune balistik testlerde kırılmıştır. Buradan, malzemenin tokluğundaki artışla çeliğin balistik dayanımının da arttığı anlaşımaktadır.

Sonuçta ilk deneylerde mermi enerjisini soğurmakta ve mermiyi durdurmakta sacın tokluğu yeterli olmuş, sonraki deneylerde(4100 Amper ve devamı) bu durum zorlaşmıştır.



Şekil 6.1: Çekme deneyleri.

Daha düşük amperlerde(3800, 3900, 4000) mermi sacı delememiştir. Bu, sacın dayanımının ve tokluğunun merminin enerjisini emebildiğini, tokluğun düşük amper değerlerinde daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Bu çalışma, farklı amper değerlerinde ısıl işlem uygulanmış Docol 22MnB5 sacına ait sıcak şekillendirme işlemi ve balistik testler ile ilgili literatür araştırması ve çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş deneysel veriler ve sonuçlarını içermektedir. Bu bilgiler ilerde gerçekleştirilecek çalışmalarda yol gösterme ve karşılaştırma amaçlı olarak kullanıldığında faydalı olacak niteliktedir. Sac malzememelerin balistik teçhizatta yaygın şekilde kullanılabilmesi için yüksek dayanımlı ısıl işleme müsait malzemelerle deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Konunun devamında Docol 22MnB5 sacına ait ileri çalışmalarda balistik malzeme için dinamik deneyler yapılması öngerülebilir, bununla birlikte kırılma tokluğu, çentik darbe deneyi yapılabilecek gelecek çalışmalar konusunda yer alır.

KAYNAKLAR

[1] **Zee RH, Jang BZ, Mount A, Wang CJ.,** 1989. Microvelocity sensor for instantaneous velocity determination. Rev Sci Instr. 60(12):3692}7.

[2] **Nurick GN.,** 1985. A new technique to measure the detection-time history of a structure subjected to high strain rates. Int. J. Impact Eng. 3(1):17}26.

[3] **Ramesh KT, Kelkar N.,** 1995. Technique for the continuous measurement of projectile velocities in plate impact experiments. Rev Sci Instr. 66(4):3034}6.

[4] **Sanders TA.,** 1997. Penetration of composite laminates by conical indenters and projectiles. Masters thesis, Department of Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, British Columbia.

[5] **T. Borvik*, M. Langseth, O.S. Hopperstad, K.A. Malo.** 2000. Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses Part I: Experimental study. Structural Impact Laboratory (SIMLab), Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology, N-7491 Trondheim, Norway,

[6] **James W. McCauley, Andrew Crowson, William A.Gooch, Jr., A.M. Rajendran, Stephan J. Bless, Kathryn V. Logan, Michael Normandia, Steven Wax.,** 2002. Ceramic Armor Materials by Design. The American Ceramic Society, 735 Ceramic Place Westerville, Ohio 43081,.

[7] **P.S. Bulson.,** 1997. Explosive loading of engineering structures : a history of research and a review of recent developments. London ; New York : E & FN Spon.

[8] **R.R. Franzen, D.L. Orphal[2], C.E. Anderson Jr.,** 1996. The influence of experimental design on depth-of-penetration (DOP) test results and derived ballistic efficiencies.

[9] **V. Skvortsov, J. Keplerb, E. Bozhevolnaya.,** 2003. Energy partition for ballistic penetration of sandwich panels.

[10] **Fikret ŞENEL, Bora BALYA, Levend PARNAS.,** 2004. İleri Kompozit Zırh Malzemelerinin Balistik Analizi.

[11] **J.E. Field, S.M. Walley*, W.G. Proud, H.T. Goldrein, C.R. Siviour.,** 2004. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies. International Journal of Impact Engineering 30 (2004) 725-775. Cavendish Laboratory, Physics and Chemistry of Solids (PCS), Magindly Road, Cambridge CB3 0HE, UK.

[12] **Mr. Patrick Woolsey.,** 1992. Ceramic materials screenig by residual penetration ballistic testing. 13th International Symposium on Ballistics. U.S. Army Technology Laboratory, ATTN: SLCMT-MRD, Watertown, MA 02172-0001, USA. Stockholm, Sweden,

[13] **Darlene Starratt, Tim Sanders, Elvis Cepus, Anoush Poursartip, Reza Vaziri.,** 1999. An efficient method for continuous measurement of projectile motion in ballistic impact experiments.

[14] **Murat Vural.,** 1998. Ballistic performance and impact behavior of alumina armor ceramics. Tez (Doktora)-İTÜ Fen Bil. Enst.,.

[15] **http://www.ume.tubitak.gov.tr/ume.php**, 2007. ume@ume.tubitak.gov.tr. Gebze - Kocaeli / Turkey , 54 41470

[16] **Prof. Dr. Metin Gürses.,** 2005. gurses@fen.bilkent.edu.tr. Einstein'ın Gravitasyon Kuramı'nın Önümüzdeki On Yılı. TÜBA Asli Üyesi**.**

[17] **S.J. Cimpoeru, B.J.Baxter and R.L. Woodward.,** 1996. Some extensions of simplified ballistic test procedures to comparative protection analysis. Ballistics 96 Vol.3,.

[18] **H. Khoda-rahmia , A. Fallahib and G.H. Liaghatc.,** 2005. Incremental deformation and penetration analysis of deformable projectile into semi-infinite target. International Journal of Solids and Structures Volume 43 Issues 3-4 (2006) Pages 569-582.

[19] **Ulusal Metroloji Enstitüsü.,** 2007.

http://www.ume.tubitak.gov.tr/lablar/menu_lablar.php?f=207.
ume@ume.tubitak.gov.tr. Gebze - Kocaeli / Turkey, P.K 54 41470

[20] **Garry Harrison,** 2005. Head, Circulating Collections Conservation, Indiana University Libraries Preservation Department. Indiana University, Bloomington

[21] **Introduction to Mylar® Polyester Films.,** 2003. DuPont Teijin Films 1 Discovery Drive Hopewell, VA 23860 USA.

[22] **N. Tarım, F. Fındık *, H. Uzun.,** 2002. Ballistic impact performance of composite structures. Composite Structures 56, 13-20. Metallurgy Division, Technical Education Faculty, Sakarya University, 54040 Esentepe, Adapazarı, Turkey.

[23]**http://www.efunda.com/designstandards/sensors/laser_doppler/laser_doppler_intro.cfm.,** 2007. Laser Doppler Introduction. eFunda, Inc. P.O. Box 64400 Sunnyvale, CA 94088.

[24]**http://www.efunda.com/designstandards/sensors/laser_doppler/laser_doppler_effect_theory.cfm.,** 2007. Doppler Effect. eFunda, Inc. P.O. Box 64400 Sunnyvale, CA 94088.

[25]**http://www.efunda.com/designstandards/sensors/laser_doppler/laser_doppler_flow_theory.cfm.,** 2007. Laser Doppler Theory. eFunda, Inc. P.O. Box 64400 Sunnyvale, CA 94088.

[26] **SSAB Tunnplåt AB.,** 2007. Docol Hardenable Steel -Boron Steel Cold rolled hardenable sheet. http://www.ssabdirekt.com/upload/dokument/Datasheets/GB/Docol/

GB8211Docol.pdf, Borlänge.

[27] **Lucoil Steel.** 2007. http://www.lucoil.se/index.php?Id=21&lang=eng. s-971 88 Lulea Sweden.

[28] **Evren Özşahin.,** 2003. Entegre bir zırhın yüksek hızlı çarpma yükleri altındaki davranışı. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bil. Enst., İstanbul.

[29] **Lucoil Steel.** 2007. http://www.lucoil.se/index.php?Id=22&lang=eng. s-971 88 Lulea Sweden.

[30] **Alper AYDINEL, Bilgehan ÖGEL, R. Orhan YILDIRIM.** 2007. Al2O3 Seramik – Cam Elyaf Takviyeli Polyester Katmanlı Kompozit Zırh Sisteminin 7,62 mm Zırh Delici Mermiler İçin Sayısal ve Analitik Balistik İncelenmesi. ODTÜ, BİLTİR/SAVSİS Birimi, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa USLU 27.12.1981 tarihinde Ankara'da doğdu. 1992 yılında Şenlik İlkokulunu, 1999 Ankara Yıldırım Bayezid Anadolu Lisesini bitirdi. 2003 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makina Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2003 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Malzeme ve İmalat programında yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen Malzeme ve İmalat programında yüksek lisans öğrencisi olup, yüksek lisans derecesini Haziran 2007' de almayı planlamaktadır.