

**T.C.  
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI**

**AISI 304 PASLANMAZ ÇELİĞİNDE ÇOK ADIMLI BİLYALI  
DÖVME UYGULAMALARININ MİKROYAPI VE MALZEME  
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**Onur MUTLU**

**Danışman  
Dr.Öğr.Üyesi Simge İRİZALP**



**MANİSA-2021**

**Onur  
MUTLU**

**AISI 304 PASLANMAZ ÇELİĞİNDE ÇOK ADIMLI BİLYALI DÖYME  
UYGULAMALARININ MİKROYAPI VE MALZEME ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**2021**

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Onur MUTLU**



## İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER .....	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	IV
ŞEKİL DİZİNİ .....	V
TABLO DİZİNİ .....	VIII
TEŞEKKÜR.....	IX
ÖZET.....	X
ABSTRACT .....	XI
1. GİRİŞ .....	1
2. PASLANMAZ ÇELİKLER .....	2
2.1. Paslanmaz Çeliklerin Tarihçesi.....	2
2.2. Paslanmaz Çeliklerde Alaşım Elementlerinin Etkisi .....	3
2.2.1. Karbon (C) .....	3
2.2.2. Krom (Cr).....	3
2.2.3. Nikel (Ni) .....	4
2.2.4. Azot (N) .....	4
2.2.5. Alüminyum (Al).....	4
2.2.6. Molibden (Mo).....	4
2.2.7. Niyobyum (Nb) .....	5
2.2.8. Silisyum (Si) .....	5
2.2.9. Kükürt, Fosfor ve Selenyum (S, P ve Se) .....	5
2.2.10. Kobalt (Co) .....	5
2.2.11. Bakır (Cu) .....	5
2.2.12. Tungsten (W) .....	6
2.2.13. Titanyum (Ti).....	6
2.3. Paslanmaz Çelik Türleri.....	6
2.3.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler.....	6
2.3.2. Martenzitik Paslanmaz Çelikler .....	7
2.3.3. Dupleks Paslanmaz Çelikler .....	8
2.3.4. Çökelti Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler.....	8
2.3.5. Östenitik Paslanmaz Çelikler .....	8
2.3.5.1. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri.....	9
2.3.5.2. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kullanım Alanları.....	13
2.4. Paslanmaz Çeliklerde Bulunan Fazlar .....	14
2.4.1. Ferrit ( $\alpha$ -demir) .....	15

2.4.2. Sementit ( $Fe_3C$ ).....	16
2.4.3. Perlit .....	16
2.4.4. Östenit ( $\gamma$ -demir) .....	17
2.4.5. Martenzit .....	18
2.4.6. Ledeburit .....	18
2.4.7. Grafit .....	19
2.4.8. Sorbit.....	19
2.4.9. Beynit .....	19
2.4.10. Trostit .....	19
3. 304 KALİTE PASLANMAZ ÇELİK .....	20
4. PLASTİK DEFORMASYONUN TEMEL İLKELERİ.....	21
4.1. Deformasyonun Mekanizması .....	21
4.1.1. Kayma .....	21
4.1.1.1. Kritik Kayma Gerilmesi.....	21
4.1.2. İkizlenme.....	22
4.1.3. Tane Sınırlarının Kayması .....	22
4.1.4. Yayınma Sürünmesi .....	22
4.1.5. Aşırı Plastik Deformasyon .....	23
5. ÜRETİM SÜRECİNDE KALINTI GERİLMELER .....	24
5.1. Kalıntı Gerilmesinin Malzemenin Mekanik Özelliklerine Etkisi Bakımından Önemi.....	25
6. BİLYALI DÖVME .....	26
6.1. Bilyalı Dövme İşlemi .....	26
6.2. Bilyalı Dövme İşlemi Parametreleri.....	27
6.2.1. Bilya Seçimi .....	27
6.2.2. Püskürtme Basıncı.....	28
6.2.3. Püskürtme Debisi .....	28
6.2.4. Püskürtme Mesafesi .....	29
6.2.5. Püskürtme Açısı .....	29
6.3. Bilyalı Dövme Uygulama Alanları .....	29
6.4. Bilyalı Dövme Proses Kontrol Metodları .....	31
6.4.1. Almen Şiddeti .....	31
6.4.2. Yüzey Örtme Oranı .....	32
6.5. Bilyalı Dövme Yönteminin Kalıntı Gerilmesine Etkisi .....	33
6.6. Bilyalı Dövme Üzerine Yapılmış Benzer Çalışmalar .....	34

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	36
7.1. Malzeme Seçimi.....	36
7.1.1. Çekme Testi Numunesi Malzemesi ve Ölçüleri.....	36
7.1.2. Kullanılan Bilyaların Malzemesi ve Ölçüleri .....	36
7.2.Bilyalı Dövme Öncesi Deneysel Çalışmalar .....	37
7.2.1. Çekme Numunesinin Hazırlanması.....	37
7.2.2. İşlem Uygulanmamış Numunelerde Mikro Sertlik Ölçümü .....	37
7.2.3. İşlenmemiş Çekme Numunesinin Yüzey Pürüzlülük Ölçümü.....	38
7.3. Bilyalı Dövme İşlemi .....	39
7.3.1. Bilyalı Dövme İşlemi Parametreleri.....	39
7.3.2. Bilyalı Dövme İşlemi Uygulaması.....	40
7.4. Bilyalı Dövme Sonrası Deneysel Çalışmalar .....	43
7.4.1. Mikroyapı İncelemesi.....	43
7.4.1.1. Bakalite Alma ve Yüzey Parlatma İşlemi .....	43
7.4.1.2. Mikroyapı Görüntüleme İşlemi.....	45
7.4.2. Bilyalı Dövme İşlemi Sonrası Çekme Testi.....	45
7.4.3. Xrd (X-Işını Kırınım Yöntemi) Testi.....	46
7.4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemesi.....	48
7.4.5. Almen Şiddetinin Belirlenmesi .....	49
8. SONUÇLAR .....	52
8.1. Mikroyapı Görüntüleri .....	52
8.2. XRD Görüntü Sonuçları.....	58
8.3. Yüzey Pürüzlülük Sonuçları .....	66
8.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri .....	68
8.5. Mikro-Sertlik Ölçümü Sonuçları.....	74
8.6. Çekme Testi Sonuçları .....	84
9. GENEL SONUÇLAR .....	86
KAYNAKLAR .....	88
ÖZGEÇMİŞ .....	96

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>AISI</b>	American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
<b>DEFAM</b>	DeneySEL Fen Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi
<b>EDX</b>	Energy Dispersive Spectrometry (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi)
<b>FWHM</b>	Full Width at Half Maximum (Maksimum Yarısı Tam Genişlik)
<b>gf</b>	Gram-Force (Yük Birimi)
<b>HB</b>	Brinell Sertlik Birimi
<b>HV</b>	Vickers Sertlik Birimi
<b>HRC</b>	Rockwell Sertlik Birimi
<b>HMK</b>	Hacim Merkezli Kübik Yapı
<b>HSP</b>	Hegzagonal Sıkı Paket Yapı
<b>ODS</b>	Oxide Dispersion Strengthened (Oksit dispersiyonuyla güçlendirilmiş)
<b>SAE</b>	Society of Automotive Engineers (Amerikan Otomotiv Mühendisleri Birliği)
<b>SEM</b>	Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
<b>Ra</b>	Aritmetik Ortalama Pürüzlülük
<b>Rq</b>	Merkez hattından ortalama kuadratik sapma
<b>Rz</b>	Yüzey pürüzlülük profilinin en yüksek ve en düşük noktaları arasındaki dikey mesafe
<b>TTT</b>	Time, Temperature, Transformation (Zaman, Sıcaklık, Dönüşüm)
<b>YMK</b>	Yüzey Merkezli Kübik Yapı
<b>XRD</b>	X-Ray Diffraction (X Işını Difraksiyonu)
<b><math>\sigma</math></b>	Sigma Fazı
<b><math>\beta</math></b>	Beta Fazı
<b><math>\gamma</math></b>	Gama (Östenit Fazı)
<b><math>\alpha'</math></b>	Alfa üssü (Martenzit Fazı)
<b>°C</b>	Celsius (Sıcaklık Birimi)
<b><math>\mu\text{m}</math></b>	Mikrometre (Ölçü Birimi)

## ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 2.1. Nikel ve krom oranına göre paslanmaz çelik türleri [4] .....	6
Şekil 2.2. AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelikte C içeriğine bağlı olarak $M_{23}C_6$ karbür oluşumu [4] .....	10
Şekil 2.3. AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çeliğe ait Schaffler diyagramındaki yeri [4] .....	11
Şekil 2.4. Demir(Fe) – karbon(C) denge diyagramı [25] .....	15
Şekil 2.5. a) Ferrit fazı mikroyapı görüntüsü b) Ferrit fazı HMK atom dizilimi .....	16
Şekil 2.6. Ortorombik Yapı .....	16
Şekil 2.7. Perlit fazının örnek mikroyapı görüntüsü .....	17
Şekil 2.8. YMK yapı .....	17
Şekil 2.9. YMK yapıdan tetragonal yapıya dönüşüm .....	18
Şekil 2.10. Ledeburit fazının örnek mikroyapı görüntüsü .....	18
Şekil 4.1. Tipik aşırı plastik deformasyon yöntemleri [10] .....	23
Şekil 6.1. Bilyalı Dövme Prosesi [34] .....	26
Şekil 6.2. Bilyalı dövme işlemi sonrası oluşan deformasyon ve gerilmeler [37] .....	26
Şekil 6.3. Bilyalı dövme işleminde kullanılan bilya cinsleri, a) Seramik bilya, b) Cam bilya, c) Çelik bilya [42] .....	27
Şekil 6.4. Bilyanın yüzeye çarpma açısı [44] .....	29
Şekil 6.5. Uçak iniş takımı [41] .....	30
Şekil 6.6. Uçak motorunun fan diski .....	30
Şekil 6.7. Almen Test Cihazı ve Numuneler .....	31
Şekil 6.8. Almen Testi doyum noktası grafiği [47] .....	32
Şekil 6.9. Ghost View yüzey örtme oranı görselleri [48] .....	33
Şekil 6.10. Bilyalı dövme sırasında yüzey derinliği-gerilme büyüklüğü grafiği .....	34
Şekil 7.1. Kullanılan bilyaların boyutları .....	36
Şekil 7.2. Çekme Testi Numunesi Ölçüleri .....	37
Şekil 7.3. a) Future-Tech FM-700 sertlik cihazı, b) Ölçümler arası mesafenin görseli .....	37
Şekil 7.4. Mitutoyo SJ-310 yüzey pürüzlülük cihazı .....	38
Şekil 7.5. Bilyalı Dövme İşlemi Parametreleri .....	39
Şekil 7.6. Bilyalama Cihazı Dış Bölüm .....	40
Şekil 7.7. Bilyalama Cihazı İç Bölüm .....	40



<b>Şekil 7.8.</b> Mengene altında kalan bilyalı dövme uygulanmayan bölge .....	41
<b>Şekil 7.9.</b> a) ön yüzey, b) arka yüzey, c) büyük büyütmede ön yüzey d) büyük büyütmede arka yüzey.....	41
<b>Şekil 7.10.</b> a) Struers Citopress -1 bakalit cihazı, b) Bakalite alınmış bir numuneye ait görüntü .....	43
<b>Şekil 7.11.</b> Metkon Forcipol 1V parlatma cihazı.....	44
<b>Şekil 7.12.</b> Dağlayıcı Çözelti .....	44
<b>Şekil 7.13.</b> Nikon Eclipse LV150N mikroskop .....	45
<b>Şekil 7.14.</b> Shimadzu Autograph AG-IS 100 kN.....	45
<b>Şekil 7.15.</b> Çekme işlemi a) öncesi ve b) sonrası örnek görüntüler.....	46
<b>Şekil 7.16.</b> DEFAM bünyesindeki XRD Cihazı .....	46
<b>Şekil 7.17.</b> OriginPro ile FWHM değerinin belirlenmesi .....	47
<b>Şekil 7.18.</b> SEM cihazının tüm bileşenleri [58].....	48
<b>Şekil 7.19.</b> DEFAM SEM Cihazı.....	49
<b>Şekil 7.20.</b> N, A ve C tipi Almen testi için kullanılan şerit ölçüleri [72] .....	49
<b>Şekil 7.21.</b> a) Almen şeriti dövme aparatı, b) Almen şiddeti ölçüm aparatı.....	50
<b>Şekil 7.22.</b> a) Almen şiddeti ölçümü, b) Bilyalı dövme uygulanmış şerit .....	50
<b>Şekil 8.1.</b> Bilyalama işlemi uygulanmamış numunenin mikroyapı görüntüsü .....	52
<b>Şekil 8.2.</b> 0,8 mm çapındaki bilya ile dövülmüş numuneye ait farklı bölgelerden elde edilen mikroyapılar (a, b, c) ve yüzeyaltı bölgeden büyük büyütmedeki mikroyapı görüntüsü(d).....	53
<b>Şekil 8.3.</b> 0,8 mm üzerine 0,3 mm çapındaki bilya ile dövülmüş numuneye ait farklı bölgelerden elde edilen mikroyapılar (a, b, c) ve yüzeyaltı bölgeden büyük büyütmedeki mikroyapı görüntüsü(d).....	54
<b>Şekil 8.4.</b> 0,8mm üzerine 0,6 mm çapındaki bilya ile dövülmüş numuneye ait farklı bölgelerinden 200x (a, b, c) ve 1000x (d) ölçek ile büyütülmüş mikroyapı görüntüsü .....	55
<b>Şekil 8.5.</b> Sırasıyla 0,8mm, üzerine 0,6 mm ve üzerine 0,3mm çapındaki bilya ile dövülmüş numuneye ait farklı bölgelerinden 200x (a, b, c) ve 1000x (d) ölçek ile büyütülmüş mikroyapı görüntüsü .....	56
<b>Şekil 8.6.</b> Bilyalı dövülmemiş numunenin XRD paterni .....	58
<b>Şekil 8.7.</b> 0,8 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numunenin XRD paterni.....	59
<b>Şekil 8.8.</b> 0,8 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numunenin XRD paterni. 59	
<b>Şekil 8.9.</b> 0,8 mm ve 0,6 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numunenin XRD paterni. 60	

<b>Şekil 8.10.</b> 0,8 mm, 0,3 mm ve 0,6 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numunenin XRD paterni.....	60
<b>Şekil 8.11.</b> XRD paternleri.....	62
<b>Şekil 8.12.</b> XRD paternlerinin kıyaslaması.....	62
<b>Şekil 8.13.</b> FWHM (maksimum yarı yüksekliği) değişim değerleri.....	63
<b>Şekil 8.14.</b> Kristalit boyutu değişim değerleri .....	64
<b>Şekil 8.15.</b> Latis mikro gerinim değişim değerleri .....	65
<b>Şekil 8.16.</b> Ortalama pürüzlülük grafiği .....	67
<b>Şekil 8.17.</b> Bilyalı dövülmemiş numuneye ait farklı büyütmelelerdeki yüzey SEM fotoğrafları (a), (b), (c) ve EDX sonuçları (d).....	69
<b>Şekil 8.18.</b> 0,8 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numuneye ait farklı büyütmelelerdeki yüzey SEM fotoğrafları (a),(b),(c) ve EDX sonuçları (d).....	70
<b>Şekil 8.19.</b> Sırasıyla 0,8 mm ve 0,6 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numuneye ait farklı büyütmelelerdeki yüzey SEM fotoğrafları (a),(b),(c) ve EDX sonuçları (d) .....	71
<b>Şekil 8.20.</b> Sırasıyla 0,8 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numuneye ait farklı büyütmelelerdeki yüzey SEM fotoğrafları (a),(b),(c) ve EDX sonuçları (d) .....	72
<b>Şekil 8.21.</b> Sırasıyla 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numuneye ait farklı büyütmelelerdeki yüzey SEM fotoğrafları (a),(b),(c) ve EDX sonuçları (d) .....	73
<b>Şekil 8.22.</b> Bilyalı dövülmemiş numunenin HV sertlik değişimi .....	75
<b>Şekil 8.23.</b> 0,8 mm çaplı bilya ile dövülmüş numunenin sertlik değişimi.....	77
<b>Şekil 8.24.</b> 0,8 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numunenin HV sertlik değişimi .....	79
<b>Şekil 8.25.</b> 0,8 mm ve 0,6 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numunenin sertlik değişimi .....	81
<b>Şekil 8.26.</b> 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numunenin sertlik değişimi .....	83
<b>Şekil 8.27.</b> Tüm numunelere ait ortak sertlik grafiği .....	84

## TABLO DİZİNİ

<b>Tablo 3.1.</b> AISI 304'ün mekanik genel özellikleri [9] .....	20
<b>Tablo 6.1.</b> Farklı tip bilyalar ve fiziksel özellikleri [44] .....	28
<b>Tablo 7.1.</b> Kullanılan malzemenin kimyasal analiz tablosu.....	36
<b>Tablo 7.2.</b> Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri .....	36
<b>Tablo 7.3.</b> Yüzeyde uygulanan pürüzlülük ölçümü standartları .....	38
<b>Tablo 7.4.</b> Bilyalama Parametreleri.....	42
<b>Tablo 7.5.</b> Eğri yüksekliği-Almen yoğunluğu dönüşüm tablosu [73].....	51
<b>Tablo 8.1.</b> Bilyalı dövülmemiş numune yüzeyindeki pürüzlülük değerleri .....	66
<b>Tablo 8.2.</b> 0,8 mm çapında bilyalar ile dövülmüş numune yüzeydeki pürüzlülük değerleri.....	66
<b>Tablo 8.3.</b> 0,8 mm ve 0,3 mm çapında bilyalar ile dövülmüş numune yüzeyindeki pürüzlülük değerleri .....	67
<b>Tablo 8.4.</b> 0,8 mm ve 0,6 mm çapında bilyalar ile dövülmüş numune yüzeyindeki pürüzlülük değerleri .....	67
<b>Tablo 8.5.</b> 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm çapında bilyalar ile dövülmüş numune yüzeydeki pürüzlülük değerleri.....	67
<b>Tablo 8.6.</b> Bilyalı dövülmemiş numunenin kesit boyunca sertlik değerleri.....	75
<b>Tablo 8.7.</b> 0,8 mm çaplı bilyalar ile dövme sonrası kesit boyunca sertlik değerleri .	76
<b>Tablo 8.8.</b> 0,8 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar ile çoklu bilyalama sonrası kesit boyunca sertlik değerleri .....	78
<b>Tablo 8.9.</b> 0,8 mm ve 0,6 mm çaplı bilyalar ile çoklu bilyalama sonrası kesit boyunca sertlik değerleri .....	80
<b>Tablo 8.10.</b> 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar ile çoklu bilyalama sonrası kesit boyunca sertlik değerleri .....	82
<b>Tablo 8.11.</b> Çekme Testi Sonuçları .....	84

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında ve yürütülmesinde danışmalığııı üstlenen ve süreç boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Simge İRİZALP'e, laboratuvar çalıőmalarım boyunca her konuda yardımcı olan üniversitemiz çalıőanlarından Gökhan EYİCİ'ye, malzeme tedarığı ve işlemleri konusunda yardımcı olan makine mühendisi arkadaşlarım Faruk PALA ve Koray KOÇAK'a ve son olarak sevgilerini, desteklerini her daim hissettiğim Yüksek Metalurji ve Malzeme Mühendisi Güzde KOÇAK ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.



## ÖZET

**Yüksek Lisans**

**AISI 304 Paslanmaz Çeliğinde Çok Adımlı Bilyalı Dövme Uygulamalarının  
Mikroyapı ve Malzeme Özellikleri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi**

**Onur MUTLU**

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Simge İRİZALP**

Bu çalışma kapsamında endüstride yaygınca kullanılan 304 östenik paslanmaz çelik plakalar kullanılmıştır. Çelik plaka numunelere 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm çaplarındaki çelik bilyalar ile farklı kombinasyonlarda tekli ve çoklu bilyalı dövme işlemleri yapılmıştır. Bilyalı dövme işleminin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelenebilmesi için bilyalı dövme işlemi sonrasında numunelere çekme ve mikrosertlik testleri yapılmıştır. Malzemelerin tane morfolojilerinde meydana gelen değişimler, deformasyon etkileri ve faz oluşumlarının gözlemlenmesi adına SEM ve XRD incelemeleri yapılmıştır. Alınan sonuçlar doğrultusunda farklı kombinasyonlarda uygulanan bilyalı dövme işlemlerinin malzemenin üzerinde oluşturduğu mikroyapısal, yüzey ve mekanik özelliklerindeki değişimler analiz edilmiştir.

**Anahtar kelimeler: Çoklu Bilyalı Dövme İşlemi, 304 Östenitik Paslanmaz Çelik, Mikroyapı, Mekanik Özellikler**

**2021, 96 sayfa**

## **ABSTRACT**

**Master Thesis**

### **Investigation of the Effects of Multi-Step Shot Peen Applications in AISI 304 Stainless Steel on Microstructure and Material Properties**

**Onur MUTLU**

**Manisa Celal Bayar University  
Graduate School of Applied and Natural Sciences  
Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor: Assist. Prof. Dr. Simge İRİZALP**

In this study, 304 austenitic stainless steel plates widely used in industry were used. Single and multiple shot peening processes were applied to steel plate samples in different combinations by means of steel balls with 0,8 mm, 0,6 mm and 0,3 mm diameter. In order to examine the effect of shot peening process on the mechanical properties of the material, tensile and microhardness tests were performed on the samples after shot peening process. SEM and XRD examinations were carried out to observe the changes in grain morphology, deformation effects and phase formation of the materials. As a result, changes in microstructural, surface and mechanical properties on single and multiple shot-peened materials were analyzed.

**Keywords: Multiple Shot Peening Process, 304 Stainless Steel, Microstructure, Mechanical Properties**

**2021, 96 pages**

## 1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiyle birlikte sektör içerisindeki rekabet ortamında varlık gösterebilmek adına üretim maliyetlerinin minimuma indirilmesi önem kazanmıştır. Sektörün karşılaştığı en büyük problemlerden biri olan korozyon sorununu gidermek adına tercih edilen paslanmaz çelikler maliyet kısmında üreticiye yük olmaktadır. Ulaşım ve gıda sektörleri içerisinde çok büyük bir kullanım hacmine sahip olan paslanmaz çeliklerin yapılan çalışmalar ile mekanik özelliklerini geliştirerek ve kullanım ömrünü arttırarak üretim maliyetleri bir miktar düşürülmektedir.

Son zamanlarda daha çok tercih edilen bilyalı dövme işlemi, sektör içerisinde kumlamaya oldukça benzetilmektedir. Ancak bilyalı dövme işleminde, yüzey modifikasyonlarındaki değişiklikleri kontrol altında tutabilmek adına birçok parametreye dikkat etmek gerekmektedir. Ulaşım ve diğer endüstri sektörleri içerisinde kritik parçalar üzerinde imalat sonrası oluşan modifikasyonu yok edebilmek için tercih edilen bu işlem bir yandan da yaylar ve krank milleri gibi yorulmanın önemli bir problem olduğu parçalara uygulanmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında 304 kalite östenitik paslanmaz çeliğe farklı parametrelerde bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır.

## 2. PASLANMAZ ÇELİKLER

Platin ve altın gibi saf metaller dışındaki tüm metaller doğada diğer elementler ile bir arada bulunma eğilimindedirler. Demir doğada demir cevheri halinde bulunduğu için kararsızdır ve doğası gereği paslanmaya eğilimlidir. Bu sebeple paslanma doğal bir olaydır. Paslanma olayı kısaca saf demirin oksijen ile reaksiyona girmesi olarak tanımlanabilir [1].

Temel olarak tüm paslanmaz çelikler, demir (Fe) ve minimum %10,5 krom (Cr) içermektedir. Paslanmaz çeliğin içeriğinde bulunan Cr elementi sayesinde moleküler düzeyde malzemenin tüm yüzeyini saran yapışkan, koruyucu ve uyumlu bir oksit tabakası meydana getirmek için atmosferdeki nem ve oksijen ile reaksiyona girerek bir krom-oksit filmi oluşturur. Meydana gelen bu oksit film hasar gördüğü zaman, çeliğin içeriğindeki Cr, atmosferdeki nem ve oksijen ile reaksiyona girerek oksit filmini yeniden oluşturup kendi kendini onarmaktadır. Pasif ya da sınır tabaka olarak bilinen bu oksit filmin kalınlığı yaklaşık olarak 130 Angstrom (1 Angstrom =  $10^{-6}$  cm)'dur. Çeliğin içeriğindeki krom miktarının %10,5'in üzerine çıkarılması ile malzemenin korozyon direnci daha da artmaktadır. Çeliğe nikel (Ni) ve molibden (Mo) de ilave edilerek korozyona karşı dayanım arttırılabilmektedir. Azot ile de mekanik mukavemet arttırılabilmektedir [1,2].

Paslanmaz çeliklerin sahip olduğu süneklik, yüksek deformasyon sertleşmesi ve mekanik özellikleri işlenebilirlikleri açısından son derece önemli kriterlerdir. Uzun ömürlü olmaları, işlenebilirlikleri, yüksek korozyon dirençleri, geniş çalışma sıcaklık aralığı, üstün mekanik özellikleri ve çeşitli üretim yöntemleri ile üretilebilmeleri sayesinde sektörde farklı alan ve uygulamalarda geniş kullanım hacmine sahiptir. [3,4]

Paslanmaz çeliklerin kullanımı inşaat sektörü [5], gıda endüstrisi [6], otomotiv sanayi [7], havacılık [8] vb. pek çok alanda tercih edilmektedir.

### 2.1. Paslanmaz Çeliklerin Tarihçesi

Paslanmaz çelikler, I. Dünya Savaşı'ndan sonra Avrupalı bir hurdacının paslı hurdalar arasında parlayan bir top namlusunu bulup, analiz ettirmesi sonucunda bulduğu çeliğin içeriğinde yüksek oranda krom bulunduğunu öğrenmesi ile keşfedilmiştir. Bu keşfin ardından Avrupa'da paslanmaz çelik üretimleri başlamıştır. İlk olarak 1911 yılında General Elektrik Firması'nda elektrik ampullerinde flaman olarak kullanılmak üzere C. Dantsizen tarafından, %14-16 Cr içeren bir Fe-Cr alaşımı



üretilmiştir. Aynı yıllar içerisinde Harry Brearley tarafından Fe-Cr alaşımlarının yüksek korozyon dayanımlarından faydalanarak kaşık, çatal, bıçak üretmek üzere %12,8 Cr içeren bir alaşım geliştirilmiş ve metalografik dağlama ayraçlarına karşı dayanımları sebebi ile bu alaşımlara Harry Brearley tarafından paslanmaz çelik ismi verilmiştir. Uzun süreli çalışmalar neticesinde geliştirilerek patenti alınan V2A çeliği (20 Cr, %7 Ni, %0,25 C) adı ile paslanmaz çelik üretimi endüstriyel çapta ilk kez gerçekleştirilmiştir [9].

Ferritik ve martenzitik paslanmaz çelikler 1904, östenitik paslanmaz çelikler ise 1906 yılında keşfedilmiştir. Bu gelişmelere karşın paslanmaz çelikler ancak 1913 yılında ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. Paslanmaz çelikler 1930 yılına kadar ferritik, martenzitik ve östenitik olmak üzere 3 grup halinde sınıflandırılmışlardır. Yapılan araştırmalar sonucunda 1930'dan sonra dubleks ve çökelti sertleştirmeli paslanmaz çelikler bu sınıflandırmaya dahil olmuşlardır [4].

## **2.2. Paslanmaz Çeliklerde Alaşım Elementlerinin Etkisi**

Paslanmaz çeliklerin yapısında, çeliğin mekanik ve metalürjik özelliklerini etkileyen farklı alaşım elementleri bulunmaktadır. Bu elementler aşağıda başlıklar halinde verilmiştir [9,10].

### **2.2.1. Karbon (C)**

- Çeliği mukavemetini ve sertliğini arttıran temel alaşım elementidir.
- Yüzde oranı arttıkça, çeliğin sünekliği ve kaynak kabiliyetini azaltır.
- Çelikteki karbon oranı artışı, iç yapıdaki perlit oranını arttırdığından malzemenin çekme ve akma mukavemetlerini artırır.

### **2.2.2. Krom (Cr)**

- Çeliğin, korozyon direnci, oksitlenme direnci ve aşınma direncinin yanında sertleşebilirliğini arttırmak amacı ile ilave edilir.
- Paslanmaz çeliklerin temel alaşım elementidir.
- Çeliği sertleştirici ve tokluğu düşürücü yönde etkiler.
- Krom, karbür oluşturu bir element olduğundan, malzemede molibden ile kullanıldığında, aşınma direncini ve sürünme direncini artırır.

### **2.2.3. Nikel (Ni)**

- Genel olarak oksitleyici olamayan sıvılarda malzemenin genel korozyon direncini arttırmak amacı ile kullanılır.
- Genel olarak malzemenin tokluğunu arttırmak için kullanılır.
- Ferritte katı çözeltili sertleşmesi sağlayarak çeliğin dayanımını artırır fakat bu artış silisyum ve manganın sağlamış olduğu etkiye oranla daha azdır.

### **2.2.4. Azot (N)**

- Yüksek kromlu ve az karbonlu çeliklerde yüksek sıcaklıklardaki tane büyümesini önlemek için ilave edilir.
- Sıfırın altındaki sıcaklıklarda kaynak metali tokluğunu ters yönde etkiler.
- Nitrürleri oluşturduğu için önemlidir. Nitrüleme ile yüzey sertleştirme işlemi bu nitrür oluşumundan yararlanılarak yapılır.

### **2.2.5. Alüminyum (Al)**

- En güçlü oksijen giderici alaşım elementidir.
- Çelik üretiminde tane küçültücü olarak kullanılır.
- Titanyum ile bazı yüksek mukavemetli alaşımlara katılarak malzemede yaşlanma sertleşmesini azaltmak amacı ile kullanılır.
- %12 Krom içeren kaynak metaline katılığı taktirde malzemeyi sertleşemez yani ferritik yapıya dönüştürür.

### **2.2.6. Molibden (Mo)**

- Çeliklerin sertleşebilirliklerini ve dayanımını artırır.
- Düşük alaşımli çeliklerin bileşiminde %0,15-%0,30 oranlarında bulunur ve genellikle en yüksek etkinliği krom ve nikel ile birlikte bulunduğu gösterir.
- Malzemede karbür oluşturan bir element olduğundan aşınma direncini arttırmak için takım çeliklerinde yüksek oranlarda (%5-6) kullanılır.
- En önemli özelliği karbon ile yapmış olduğu karbür yapısı, yüksek hız çeliklerinde ikincil sertleşme yaratarak sıcak sertliği sağlar.

### **2.2.7. Niyobyum (Nb)**

- Östenitik paslanmaz çelikleri krom karbür çökmesine karşı dengelemede kullanılır.
- Yüksek mukavemetli bazı alaşımlara, sertliği ve mukavemeti etkilemek için katılmaktadır.
- Bazı martenzitik paslanmaz türlerinde karbonu bağlayarak, çeliğin sertleşme eğilimini azaltmak amacı ile katılır.
- Taneler arası korozyonu önler.

### **2.2.8. Silisyum (Si)**

- Çelik üretiminde oksijen giderici olarak kullanılır.
- Çeliğin bileşiminde bulunan silisyum oranı çeliğin türünü belirler.
- Malzemenin soğuk şekillendirilme kabiliyetini düşürür
- Çeliklerin elektrik direncini artırır.
- İslah edilebilen su verme işlemi yapılmış çeliklerde, çekme mukavemetini artırır.

### **2.2.9. Kükürt, Fosfor ve Selenyum (S, P ve Se)**

- Kükürt, fosfor ve selenyum elementlerinden bir tanesi az bir miktarda molibden veya zirkonyum ile paslanmaz çeliğe ilave edilerek paslanmaz çeliğin talaşlı üretime yatkınlığı artırılır.
- Silisyum arttıkça çeliğin tane büyüklüğü artar. Bu durum kaynak metallерinde çatlamaya yol açabilir.

### **2.2.10. Kobalt (Co)**

- Çoğu paslanmaz çelik alaşımının yüksek sıcaklıklardaki sürünme ve mukavemet özelliklerini arttırmak amacı ile katılır

### **2.2.11. Bakır (Cu)**

- Malzemede oksitlenmeyi azaltarak korozyon direncini artırır.
- Sıcak şekillendirmede kırılma eğilimine sebebiyet verdiği için %0,5'i aşılmamaya dikkat edilir.

### 2.2.12. Tungsten (W)

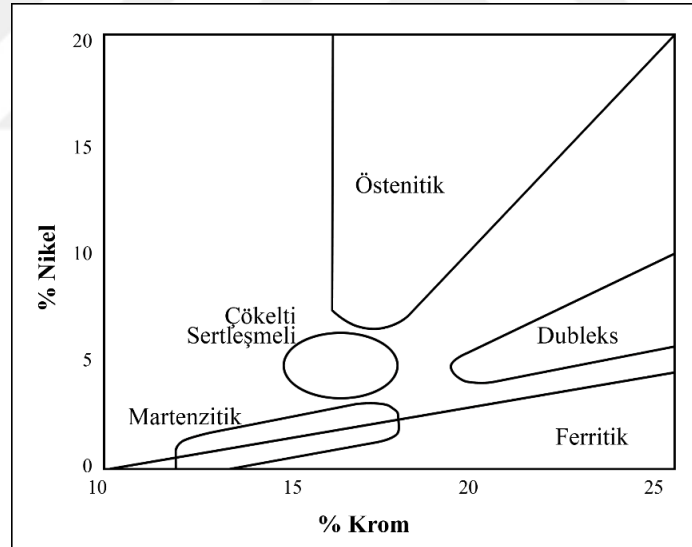
- En önemli özelliği karbon ile yaptığı karbür oluşumuyla yüksek hız çeliklerinde ikincil sertleştirme oluşturarak sıcak sertliği sağlamasıdır.

### 2.2.13. Titanyum (Ti)

- Östenitik paslanmaz çeliklerde, krom-karbür çökmesini önlemesi için dengeleyici element olarak ilave edilir.

## 2.3. Paslanmaz Çelik Türleri

Paslanmaz çelik ailesi, alaşım elementleri, metalürjik fazlar, uygulama alanları vb. yönlerden farklılık gösteren yapılarda çeşitli türleri (Ferritik, Martenzitik, Östenitik, Ferrit, Östenit karışımından meydana gelen dubleks çelikler ve Çökelti sertleşmeli paslanmaz çelikler) bulunmaktadır. Şekil 2.1.'de nikel ve krom oranına göre paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 2.1. Nikel ve krom oranına göre paslanmaz çelik türleri [4]

### 2.3.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler (örneğin 1.4512 ve 1.4016 kalite çelikler), krom (%12,5-17) ve demirden oluşmaktadır. Temel olarak nikel içermemelerinin yanı sıra çok az karbon içermektedir. Ferritik paslanmaz çelikler hacim merkezli kübik yapıya sahiptir. Bu çelikler ısı işleme görmez fakat martenzitik paslanmaz çeliklere kıyasla

daha iyi korozyon dayanımı sergilemektedir. Fakat çukur ve çatlak korozyonuna karşı hassastırlar. Oksidasyona karşı dayanımları yüksektir, nitrik asit gibi güçlü oksitleyici ortamlar için kullanılabilir. Ferromanyetik özellik göstermektedirler. Düşük sıcaklık değerlerinde darbe dayanımı önemli oranda azalır ve bu değerlerde kırılma hale (darbe geçişi) gelmelerine rağmen yeterli derecede şekillendirilebilirliğe sahiptir. Isıl özellikleri ile geleneksel çeliklere benzer yapıdadırlar. İnce kesitler halinde kaynaklanmaları kolay olmasına karşın daha kalın kesitlere kaynak işlemi uygulandığı zaman özellik kaybının yanı sıra tane büyümesine maruz kalmaktadırlar [2,6,12].

### **2.3.2. Martenzitik Paslanmaz Çelikler**

Martenzitik paslanmaz çelikler (örneğin 1.4006, 1.4028 ve 1.4112 kalite çelikler) karbon (%0,2-1,0), krom (%10,5-18) ve demirden oluşmaktadır. Mekanik özelliklerini geliştirebilmek için geleneksel çeliklerde olduğu gibi ısıl işlem uygulanabilmektedir, ancak daha yüksek sertleşebilirlik göstermektedirler. Farklı ısıl işlem sıcaklıklarına sahiptirler. Korozyona karşı dayanımları aynı krom ve alaşım içeriğine sahip diğer paslanmaz çelikler ile kıyaslandığı zaman daha düşüktür. Ortamın agresif olmadığı ancak aşınmaya karşı dayanımın önemli olduğu yerlerde bu paslanmaz çeliklerin kullanımı idealdir. Örneğin, AISI 440C kalite martenzitik paslanmaz çeliklerin, %1 oranında karbon içermeleri ve son derece sert yapıda olmaları dolayısı ile pompaların aşınan kısımlarında kullanılır. AISI 420 kalite martenzitik paslanmaz çelikler minimum %0,15 oranında karbon içeriği ile bıçak ağızları için idealdir. Ferromanyetik özelliğe sahiptirler. Düşük sıcaklık değerlerinde darbe geçişine maruz kalarak kırılma yapıya bürünürler ve şekillendirilebilirlikleri düşüktür. Isıl özellikleri ile geleneksel çeliklere benzer yapıdadırlar. Kaynak işlemi uygulanabilmektedir, ancak dolgu metalleri kullanıldığı zaman çatlama eğiliminde olabilmektedirler [2,6].

Martenzitik paslanmaz çelikler, düşük sıcaklıklarda yüksek mukavemet ya da yüksek sıcaklıklarda sürünme direnci ile beraber korozyon direnci gereken uygulamalarda kullanılır. Temel olarak üç tip martenzitik paslanmaz çelik vardır. Birinci tip, karbon içeren ve düşük sıcaklık değerlerinde temperlendiği zaman demir karbür çökmesi ile ya da daha yüksek sıcaklık değerlerinde tavlama üzerine alaşım karbür çökmesi ile (ikincil sertleştirme) güçlendirilen martenzitik paslanmaz çelikleri içerir. İkinci tip, düşük oranda karbon içeren ancak tavlama işlemi sırasında bakır veya intermetalik partiküllerin çökmesi ile güçlendirilmiş martenzitik

paslanmaz çelikleri içerir. Üçüncü tip ise hem alaşımlı karbürlerin hem de ara metallerin çökmesi ile güçlendirilen martenzitik paslanmaz çeliklerdir. Bu üç tür martenzitik paslanmaz çeliklerin ortak özelliği, yüksek bir krom içeriğine ve bazı yüksek sıcaklıklarda östenitleşmeye izin veren alaşım kombinasyonlarına sahip olmasıdır. Az miktarda kalıntı östenit ile neredeyse tamamen martenzitik bir yapı elde etmek için östenitleşme sıcaklığından su vermeye izin veren martenzit başlangıç ve bitiş sıcaklıklarına sahiptir [13].

### **2.3.3. Dupleks Paslanmaz Çelikler**

Dupleks paslanmaz çelikler, krom (%18-26) nikel (%4-7), molibden (%0-4), bakır ve demirden oluşmaktadır. Östenitik paslanmaz çeliklerin korozyon direncinin daha yüksek bir kombinasyonunu sağlayan östenit ve ferriten meydana gelen bir mikroyapıya sahiptir. Bu çelikler, östenit ve ferrit dengesi korumaya özen gösterildiği takdirde kaynaklanabilmektedir. Ferromanyetik özelliğe sahiptirler ve düşük sıcaklıklarda darbe geçişine maruz kalmaktadırlar. Isıl genleşme özelliği açısından östenitik ve ferritik paslanmaz çelikler arasında yer alırken, diğer ısıl özellikleri açısından ise düz karbonlu çeliklere benzemektedir. Şekillendirilebilirlikleri yeterlidir ancak östenitik paslanmaz çeliklerin şekillendirilmesinde kullanılanlardan daha yüksek kuvvete ihtiyaç duymaktadırlar [2].

### **2.3.4. Çökelti Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler**

Çökelti sertleşmeli paslanmaz çelikler yaklaşık olarak %10-30 oranlarında krom ile, çeşitli oranlarda molibden ve nikel de içermektedirler. Çökelti fazları, alaşıma Al, Cu, Nb ve Ti ilavesi ile oluşturulabilmektedir. Bu alaşımlar, önemli ölçüde korozyon direnci kaybı meydana gelmeksizin, yüksek mukavemet değerlerine ulaşabilmektedirler. Çökelti sertleşmeli alaşımların birçoğu, yüksek sıcaklık değerlerinde de yüksek mukavemet sağlayabilmektedirler [4].

### **2.3.5. Östenitik Paslanmaz Çelikler**

Östenitik paslanmaz çelikler (örneğin 1.4301 ve 1.4833 kalite çelikler), krom (%16-26), nikel (%6-12) ve demirden oluşan üçlü alaşım sistemleridir. Yapısında bulunan östenit fazı her sıcaklıkta kararlı halde bulunduğu için bu şekilde isimlendirilmiştir [2,4].

Östenitik paslanmaz çeliklerin ana alaşım elementleri olan Cr ve Ni sırası ile korozyon direnci ve östenit kararlılığı sağlamaktadırlar. Alaşım içerisindeki krom korozif bir atmosferde ince bir oksit tabakası oluşturarak malzemenin yüzeyini korozyondan korumaktadır. C ve N, martenzit oluşumunu engellemek, malzeme dayanımını arttırmak ve deformasyon ikizlerinin oluşmasını desteklemektedir [14-17].

Manyetik özelliklerinin olmaması, kaynaklanabilmeleri, yüksek şekillendirilebilme kabiliyetleri ve çok düşük sıcaklıklardan çok yüksek sıcaklıklara kadar kullanılabilmesi gibi özellikleri sayesinde paslanmaz çelikler arasında en yaygın kullanılan sınıf östenitik paslanmaz çeliklerdir [4].

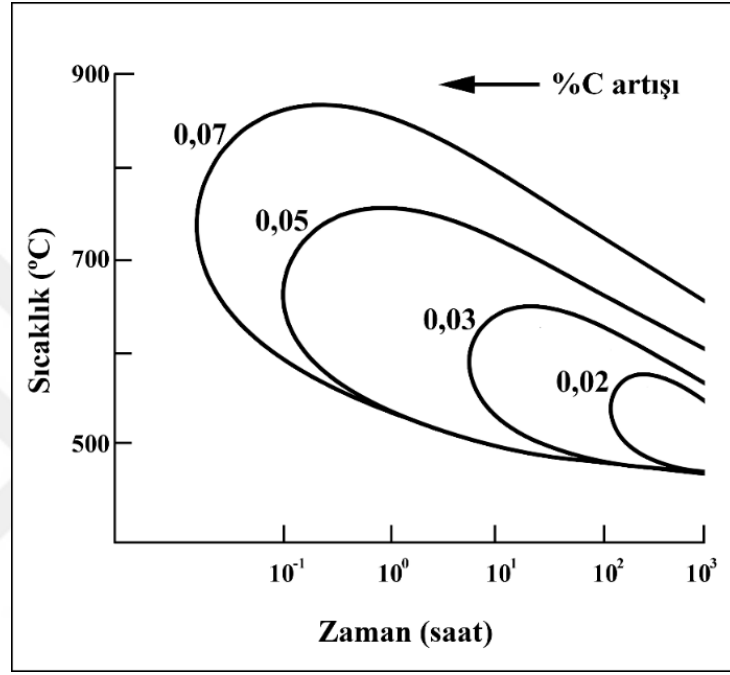
Bu çelikler metalurjik açıdan pek çok avantaja sahiptir. Yaklaşık olarak 200 MPa akma dayanımı göstermektedir. Bu yüzden karbon çeliği ile üretilmiş kalıplarla kolayca şekillenebilecek kadar sünektir. Aynı zamanda akma dayanımı soğuk şekillendirme uygulamaları ile 2000 MPa'a ulaşabilmektedir. Ferritik paslanmaz çeliklere kıyasla pekleşme daha fazla meydana gelmektedir. Şekil değiştirme martenziti oluşabilmektedir ve çelik manyetiklik kazanabilmektedir. Yüzey merkezli kübik yapısından (YMK) dolayı tokluğu iyidir ve mutlak sıfırda dahi kırılma göstermez. Ferritik (HMK) demir esaslı alaşımlar kadar yüksek sıcaklıklarda da dayanım kaybı meydana gelmemektedir [15,18,19].

Östenitik paslanmaz çeliklerin alaşımına molibden elementi ilave edilerek organik maddelere ve çeşitli mineral asitlere karşı dayanımları arttırabilmektedir. Yüksek sıcaklık ve asidik ortamlara karşı oldukça dirençli olmasına rağmen sıcak yırtılma eğilimi gösterebilmektedir. Sahip olduğu süneklik ve tokluk özelliklerinin yanı sıra ısı etkisi ile sertleşemedikleri için kaynaklı bağlantılar için tercih edilebilmektedir [15].

### **2.3.5.1. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri**

Östenitik paslanmaz çelikler yüksek korozyon dayanımına sahip olmalarına rağmen sertliklerinin düşük olması sebebi ile pek çok alanda kullanımı sınırlanmakta ve bu da östenitik paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi yolunda çalışmaları teşvik etmektedir. Östenitik paslanmaz çeliklerin korozyon ve mekanik özelliklerini, mikroyapısında meydana gelen çökeltiler doğrudan etkilemektedir. 700-1000 °C sıcaklık değerleri arasında birçok nitrür, karbür ve intermetalik bileşik tane sınırlarında çökdikleri gibi östenit tanelerin içerisinde de oluşabilmektedir. AISI 304

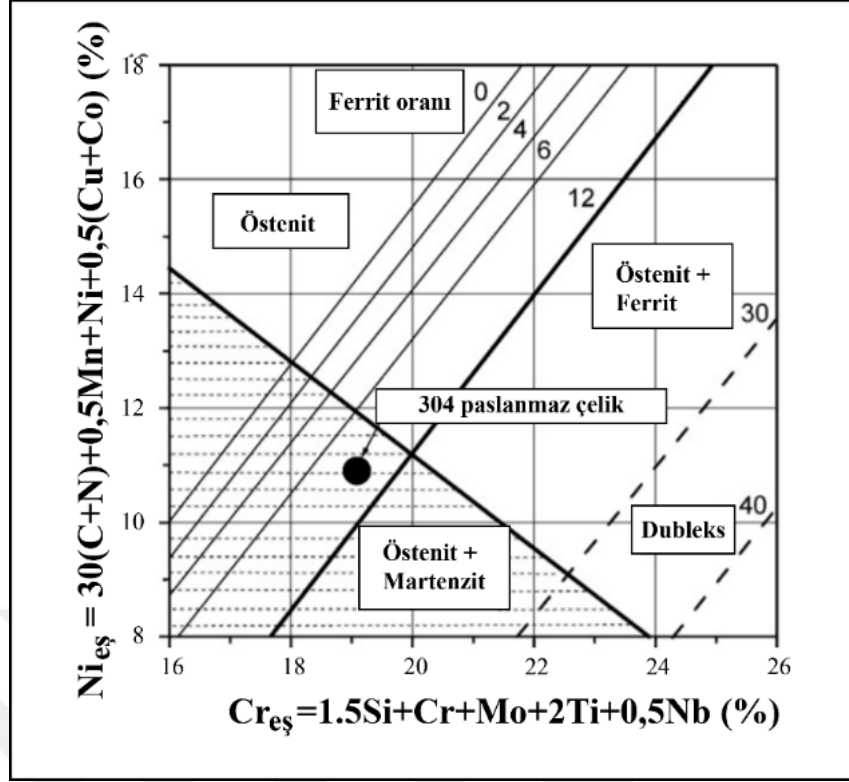
kalite östenitik paslanmaz çeliklerde meydana gelen ana çökeltiler,  $M_{23}C_6$  tipi karbür (M harfi Fe, Cr ve Mo olabilmektedir) ve intermetalik sigma ( $\sigma$ ) fazı olarak bilinmektedir. AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çeliklerde C içeriğine bağlı olarak  $M_{23}C_6$  tipi karbürlerin oluşumunu gösteren zaman-sıcaklık-dönüşüm (TTT) eğrisi Şekil 2.2.'de verilmiştir [4].



**Şekil 2.2.** AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelikte C içeriğine bağlı olarak  $M_{23}C_6$  karbür oluşumu [4]

Bu çökelti fazlarının oluşumu, termo-mekanik işlemlerden, alaşımdaki küçük değişikliklerden ve yaşlandırma şartlarından etkilenmesi dolayısı ile bu fazların yalnızca şekillerine göre tanımlanmaları kolay değildir. Şekil 2.3.'de AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çeliğe ait Schaffler diyagramındaki yeri gösterilmektedir [4].





**Şekil 2.3.** AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çeliğe ait Schaffler diyagramındaki yeri [4]

Östenitik paslanmaz çeliklerde  $M_{23}C_6$  tipi karbürler en çok meydana gelen çökeltidir ve tane sınırlarında çökeldiği zaman çeliğin tokluğunu düşürmektedir. Malzemenin yapısında bu karbür oluştuğu zaman hasar mekanizması olarak taneler arası kırılma görülmekte ve  $M_{23}C_6$  fazı taneler arası korozyona da sebep olmaktadır.  $M_{23}C_6$  çökeltileri 850 °C’de genellikle tane sınırlarında oluşmaya başlamaktadır. Bu karbürlerin, izotermal çökeltme deneyleri ile kritik soğuma hızının 3,5 °C/s olduğu belirlenmiştir. Böylece, hava ya da su ortamında soğutulmuş numunelerde, bu çökeltilerin ana matris içerisinde çözüldüğü ve yüksek soğuma hızı sebebiyle çökelmelerinin önlenmesi anlamına gelmektedir [4,14].

Literatürde östenitik paslanmaz çeliklerde oluşan  $M_{23}C_6$  çökeltilerinin sünekliliği ve akma dayanımını düşürürken maksimum çekme dayanımını arttırdığı yönünde bir çalışma da bulunmaktadır [14].

Mekanik alaşımlama ile üretilen, östenitik paslanmaz çeliklerde, sertlik değerleri mekanik alaşımlama işlem süresinin artması ile artmakta ve mikroyapı tane boyutu küçülmektedir. 5 saat süre ile mekanik alaşımlama işlemi ile üretilen ODS-304

östenitik paslanmaz çelik tozları  $\gamma$ -östenitten,  $\alpha'$ -martenzite dönüşmektedir. Ancak alaşımdaki Ni oranının %8'den %20'ye çıkarıldığı zaman, 50 saat süre ile mekanik alaşımlama işlemi sonrasında bile yapı  $\gamma$ -östenitten meydana gelmektedir. Buna Ni'in östenit kararlaştırıcı bir element olması sebep olmaktadır [4].

$10^4$ - $10^5$  s<sup>-1</sup> hızlarında deforme edilen AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çeliklerde,  $\gamma$ -östenit→ikizlenme,  $\gamma$ -östenit→ $\alpha'$ -martenzit ve  $\gamma$ -östenit→ $\epsilon$ -martenzit dönüşümleri meydana gelmektedir. Bu deformasyon hızlarında, deformasyon ikizlenme mekanizması daha etkili olmaktadır. Daha düşük deformasyon hızlarında etkili olan mekanizma ise ( $10$ - $10^3$  s<sup>-1</sup>)  $\gamma$ -östenit→ $\alpha'$ -martenzit dönüşümüdür. Yapılan birtakım hesaplamalar neticesinde, AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelikler için  $10^4$  s<sup>-1</sup> deformasyon hızında kritik ikizlenme gerilimi 584 MPa,  $10^2$ - $10^3$  s<sup>-1</sup> deformasyon hızlarında  $\alpha'$ -martenzit dönüşümü (yaklaşık olarak 400-500 MPa) meydana gelmektedir. 400 MPa'dan daha düşük gerilme değerlerinde ise dislokasyon hareketleri etkili olmaktadır [4].

Toz metalurjisi ile üretilmiş östenitik paslanmaz çeliklerde sinterleme ortamı, malzemenin mukavemet ve sertlik değerlerini etkilemektedir. Kim ve ark., östenitik paslanmaz çelik malzemeye azot ortamında ve argon ortamında sinterleme işlemleri uygulamış ve ortamları kıyaslamışlardır. Azot ortamında yapılan sinterlemenin malzemede daha yüksek mukavemet ve sertlik gösterdiğini belirtmişlerdir [14].

Östenitik paslanmaz çeliklerde bor takviyesi de alaşımın sertliğinde artışa sebep olmaktadır. Peruzzo ve ark. bor ilavesi ile sinterlenmiş 316L çeliğin mikroyapısında taneler arası sert borür çökeltilerinin meydana geldiğini ve bu borür çökeltilerinin dislokasyon hareketlerini engelleyerek alaşımın sertliğinde artışa sebep olduğunu belirtmişlerdir [18].

Wang ve ark. yapıda dağılmış halde bulunan oksit ve ince taneli yapıların 304 kalite östenitik paslanmaz çeliklerin çekme mukavemetinde artışa sebep olduğunu belirtmişlerdir [20].

Kan ve ark. 304 kalite östenitik paslanmaz çeliklere TiC ve NbC ilavesi ile oluşturdukları kompozitlerde, takviye edilen karbürlerin tane küçülmesi ile sertliğinin ve aşınma direncinin artmasına sebep olduğunu belirtmişlerdir [21].

Östenitik paslanmaz çeliklerin aşınma dayanımını geliştirmek amacı ile farklı birçok yöntemler bulunmaktadır. Yüzey sertleştirme için yapılan nitrürleme işlemi bu yöntemler arasındadır. Rajendran ve Devaraju, 316LN östenitik paslanmaz çelik

malzemeye 42 saat süre ile nitrürleme işlemi yapmış ve malzeme yüzeyinde 40 µm derinliğinde nitrürlenmiş katman oluşturulmuştur. Böylece numunenin yüzey sertlik değeri 210 HV'den 1230 HV'ye yükselmiştir ve sertlik ile malzemenin aşınma direnci de artmıştır [22].

### **2.3.5.2. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kullanım Alanları**

Östenitik paslanmaz çeliklerin, ferritik ve martenzitik paslanmaz çeliklere kıyasla korozyon dayanımları daha güçlüdür. Bu çeliklerin iç yapısının östenit olması sebebi ile ferritik paslanmaz çeliklerde önemli bir problem olan sünek-gevrek geçiş sıcaklığı altındaki gevrekleşme görülmemektedir. Çok düşük ve çok yüksek sıcaklık değerlerinde dahi, korozyon dayanımları ve mekanik özelliklerindeki üstünlükler sayesinde bu çelik sınıfı diğer çeliklere kıyasla tercih sebebidir.

301 kalite östenitik paslanmaz çelikler, yüksek dayanım, yüksek pekleşme hızı ve yüksek sünekliğin istendiği uygulamalarda tercih edilmektedir. Genellikle uçak parçaları, tren yolu araçları, otomobil jant ve süsleme ekipmanlarında kullanılmaktadır.

302 kalite paslanmaz çelikler genel olarak süsleme malzemelerinde, gıda taşıyıcı ekipmanlarda, uçak kaportalarında, uydu ve televizyon antenlerinde, yaylarda, gıda pişirici donanımlarda, inşaatların dış cephelerinde, mücevherlerde, petrol rafine ekipmanlarında ve isim plakaları yapımında kullanılır.

304 kalite paslanmaz çelikler, kimyasal ve yiyecek işleme ekipmanları, çelik mutfak tezgahları, mayalama ekipmanları, soğuk kaplar, oluklar, yağmur olukları, sac kaplama yapımında kullanılır.

304L kalite paslanmaz çelikler, kaynak yapılacak bölgelerde 304 kalite paslanmaz çeliğe kıyasla daha az karbürlenme görüldüğünden, kaynak yapılan bölümlerin korozyon dayanımı 304 kaliteye göre daha fazladır. Özellikle kaynak yapılacak yerler için tavsiye edilmesine rağmen daha korozif ortamlarda tercih edilmez [23].

309 kalite paslanmaz çelikler, yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek oksitleme direncine sahip olması sebebiyle, uçak ısıtıcılarında, ısıl işlem ekipmanlarında, tavlama kapaklarında, fırın parçalarında, pompa parçalarında kullanılır.

310 kalite paslanmaz çelikler, 309 kalite paslanmaz çelikten daha da yüksek oksitleme direnci ve yüksek sıcaklık dayanımına sahiptir. Isı değiştiricilerde, fırın parçalarında, yanma çemberlerinde, kaynak dolgu metalllerinde, gaz türbin bıçaklarında, yakma makinası ısı toplayıcıları yapımından da 309 kalite paslanmaz çeliğe göre daha çok tercih edilir.

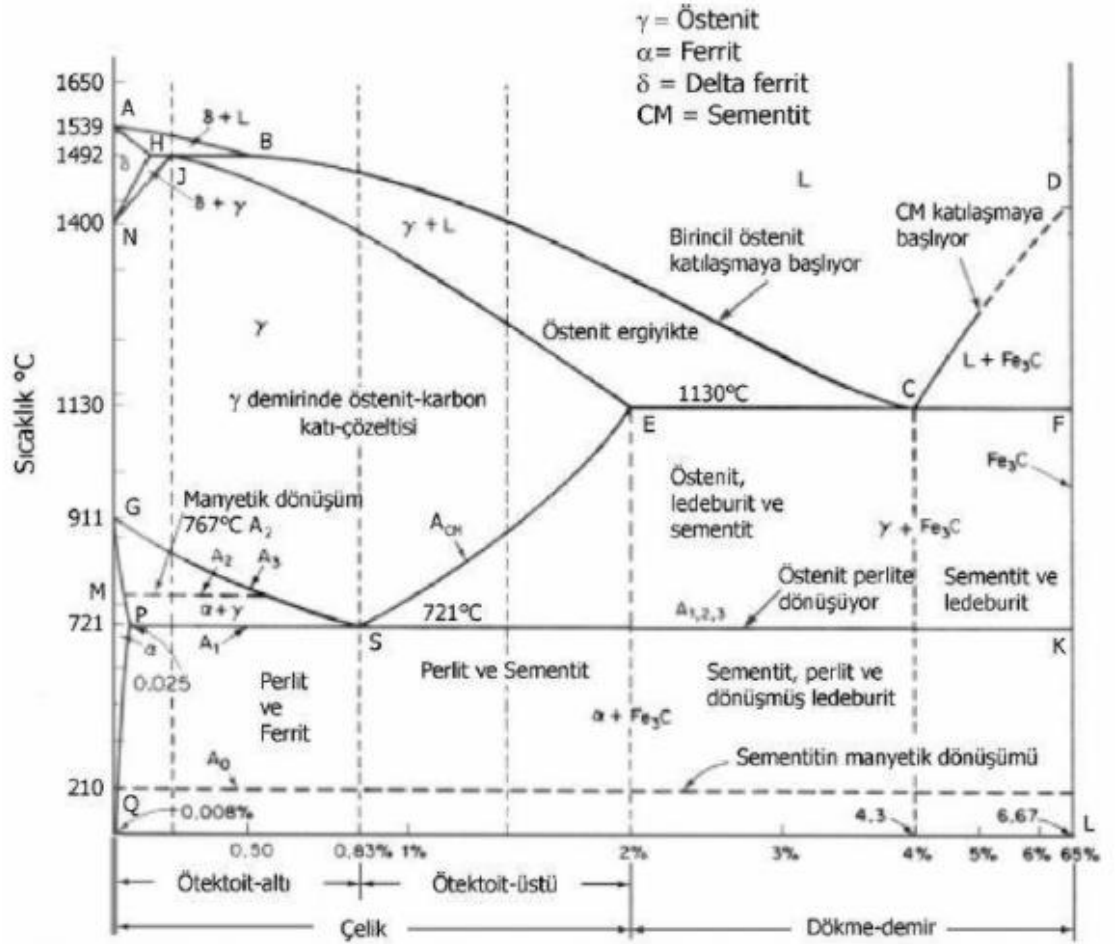
316 kalite paslanmaz çelikler, 304 kalite paslanmaz çelikten daha yüksek korozyon direnci ve yüksek sürünme dayanımına sahiptir. Doęa fotoğraf ekipmanlarında, kaynak fiçılarında, salça ve sos pişirme tencerelerinde, maya tüplerinin imalatında tercih edilir.

316L kalite paslanmaz çelikler, 316 kalite paslanmaz çeliklerden daha fazla karbon modifikasyonu taneler arası karbür çökmesinin önlenmesine ihtiyaç duyulan kaynaklı yapılarda tercih edilir. Yoğun kaynak işlemi gerektiren yerlerde kullanılır [9,11].

#### **2.4. Paslanmaz Çeliklerde Bulunan Fazlar**

Çelik içerisindeki karbon, soğuma şartlarına ve alaşım içerisindeki mangan ve silisyum oranlarına bağlı olarak farklı fazlarda bulunur. Bu fazlar; grafit, sementit, ferrit, östenit, perlit, martenzit, ledeburit, ve bunların yanında östenit fazının perlit dönüşümüne izin veremediği hızlarda, fakat martenzit elde edemeyecek hızlarda soğutulması sonucu sorbit, beyrit ve tronsit fazları oluşur [24].

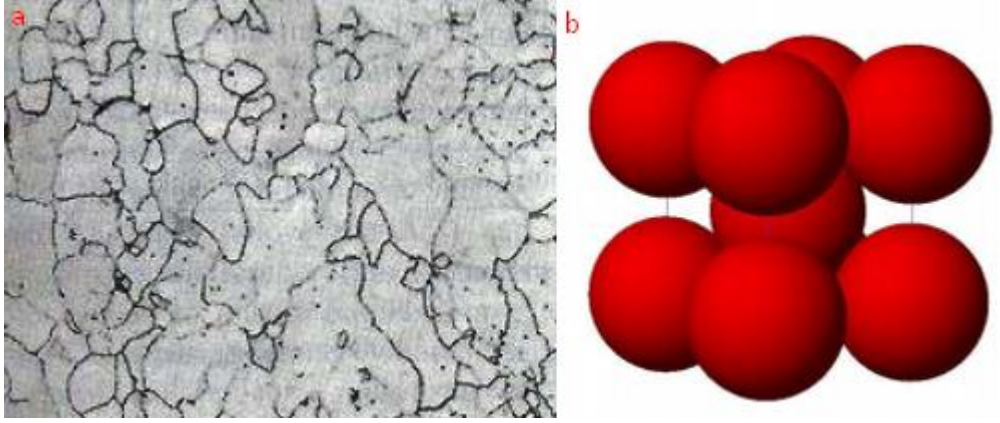
Bu fazlar şekil 2.4'de Demir-karbon denge diyagramı üzerinden incelenebilir.



Şekil 2.4. Demir(Fe) – karbon(C) denge diyagramı [25]

### 2.4.1. Ferrit ( $\alpha$ -demir)

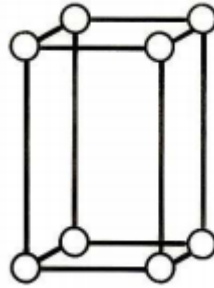
HMK kristal kafes yapısına sahip ferrit fazı demir-karbon denge diyagramının en yumuşak yapısıdır. Karbon (C) ve Demir (Fe) atomları arasında az miktarda yeralan atomlar olarak bulunur. Tokluğu düşük olan yapının uzama miktarı %40'a kadar ulaşır. Sertliği 0 HRC değerinin altında olan fazın ortalama çekme mukavemet değeri 275 MPa'dır [24,26].



**Şekil 2.5.** a) Ferrit fazı mikroyapı görüntüsü b) Ferrit fazı HMK atom dizilimi

### 2.4.2. Sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )

Yapısında maksimum %6,67 karbon (C) içeren demir karbür alaşımıdır. Demir karbid olarak da adlandırılır. Yapı içerisinde iğneli ve ağ şeklinde bulunan sementit fazı çok sert ve kırılığandır. Şekil 1.6.'da gösterilen ortorombik kristal kafes yapısına sahiptir. Çekme mukavemetinin düşük olmasına karşı basma mukavemeti oldukça yüksektir. Çeliği sert olmasını sağlar [24,26].

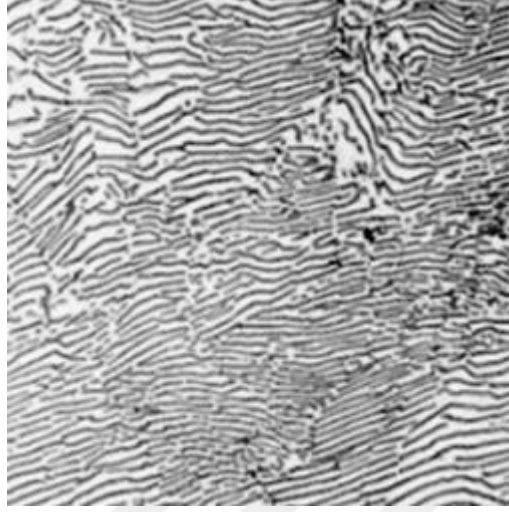


**Şekil 2.6.** Ortorombik Yapı

### 2.4.3. Perlit

Yapısında %0,83 bazı kaynaklara göre ise %0,80 karbon (C) içeren ötektoid yapıdır. Ferrit ve Sementit fazlarının karışımı ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ) olan bu faz  $723^\circ\text{C}$  sıcaklıkta oluşur. Taneli yapısı  $723^\circ\text{C}$ 'de tavlama işlemi ile çok yavaş soğutulmuş elde edilir. Lamelli türü ise hava ortamında soğutulmuş elde edilir. Sertliği ortalama 20 HRC değerinde olanda bu fazın ortalama çekme mukavemeti değeri  $827 \text{ MPa}$ 'dır. 2 inç kalınlıkta ise %20'lik uzama değerlerine ulaşmaktadır. Şekil 2.7.'de bulunan perlit

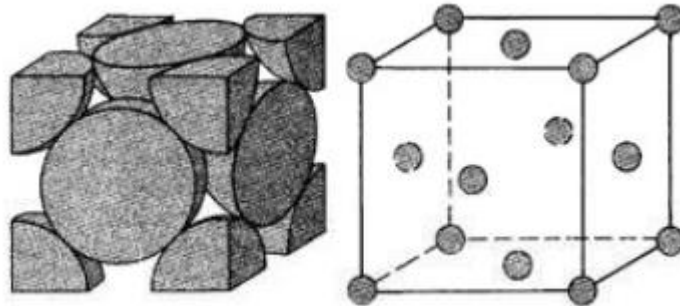
yapıda siyah çizgiler sementit( $Fe_3C$ ), beyaz bölgeler ferrit( $\alpha-Fe$ ) fazını göstermektedir [24,26].



**Şekil 2.7.** Pearlit fazının örnek mikroyapı görüntüsü

#### 2.4.4. Östenit ( $\gamma$ -demir)

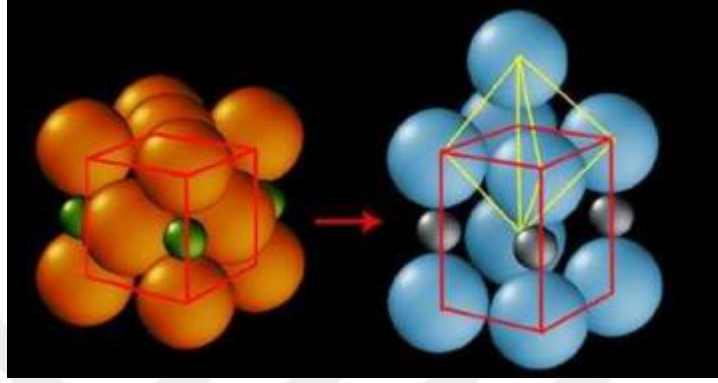
YMK (Yüzey merkezli kübik yapı) şeklinde bulunan faz demir-karbon denge diyagramında “ $\gamma$ ” sembolüyle gösterilen bölgede oluşur. İçeriğinde yaklaşık %2’ye kadar karbon çözülebilir. Tüm çeliklerde  $723^{\circ}C$ ’nin üzerinde oluşmaktadır.  $A_3$  ve  $A_{CM}$  sıcaklıklarının üzerinde ise çözünme tam olarak gerçekleşir. Yumuşak yapıda ve antimanyetik özellik gösterir. Maksimum 40 HRC sertlikte bulunan faz, ortalama 1034 MPa çekme mukavemetine sahiptir. 2 inç’lik kalınlıklarda %10’luk uzama gösterebilmektedir. Karbonun yapı içerisinde katı arayer atomu olarak çok miktarda bulunmaktadır [24,26].



**Şekil 2.8.** YMK yapı

#### 2.4.5. Martenzit

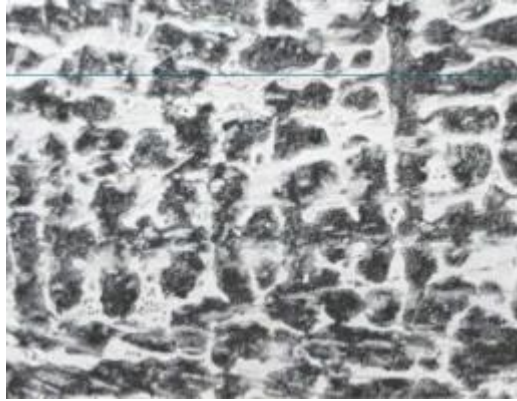
Çelik içerisinde östenit ve karbonun yarı kararlı halidir. Hızla soğutularak iğneli ve sert bir yapıya dönüşür. Bu geçiş 200-250°C sıcaklıklarında gerçekleşir. Kristal kafes yapısı, demir-karbon denge diyagramının “ $\gamma$ ” bölgesinde Şekil 2.9.’da görülen gibi YMK yapıdan, tetragonal yapıya dönüşmüştür [24,26].



Şekil 2.9. YMK yapıdan tetragonal yapıya dönüşüm

#### 2.4.6. Ledeburit

Ledeburit yapı, ötektik noktada oluşan iç yapının adıdır. Östenit( $\gamma$ ) +Sementit ( $Fe_3C$ ) fazlarının mekanik karışımıdır. Oda sıcaklığında görülmeyen bu yapı çelik ve dökme demir arasındaki sınır bölgede oluşur. Sert ve gevrek bir yapıya sahiptir [24,26].



Şekil 2.10. Ledeburit fazının örnek mikroyapı görüntüsü



#### **2.4.7. Grafit**

Sementit ( $Fe_3C$ ) her zaman kararlı bir faz değildir ve bazı özel durumlarda ayrışabilmektedir. Grafit, yavaş soğutulmuş dökme demirlerin çoğunda oda sıcaklıklarının mevcut bir yapı elemanı olarak bulunmaktadır. Çeliklerde ise östenit sıcaklığın altında çok uzatılmış tavlama ile birlikte ortaya çıkar. Silisyum ilavesi grafit oluşumun özendirir [24,26].

#### **2.4.8. Sorbit**

Martenzitin  $400^{\circ}C$  üzerinde tavlama ile oluşmaktadır. Ferrit ve sementit yapının taneleşmiş ve çok ince haldeki yapısıdır. Literatürde mikroskop altında ince perlit olarak da adlandırılmaktadır. Tel çekme işlemlerinde görülmesi beklenen yapının sertliği 250 HB civarlarındadır [24,26].

#### **2.4.9. Beynit**

Özmenevişleme işlemiyle elde edilen bu yapının sertliği martenzit ve perlit yapıların arasında yaklaşık 40-60 HRC değerlerindedir. Endüstri sektöründe tokluğu sebebiyle beynitik çelikler özellikle yaylar, tarım araçları, segman, çanak ve çayır bıçağı gibi aletlerin üretiminde tercih edilir [24,26].

#### **2.4.10. Trostit**

Martenzitin  $250^{\circ}C$ 'de tavlama sonucu elde edilir. Ferrit ve sementit yapının taneleşmiş ince karışımıdır. Bu yapının sertliği yaklaşık 400 HB'dir [24,26].

### 3. 304 KALİTE PASLANMAZ ÇELİK

Çelik gibi metallerdeki katı hal faz dönüşümü fiziksel metalurjide önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek mukavemetli çeliklerden biri olan 304 kalite paslanmaz çelik, yarı kararlı bir östenit alaşımıdır ve düşük sıcaklık değerlerinde plastik deformasyon altında atom düzlemlerinin yer değiştirmesi ile martenit dönüşümüne karşı duyarlıdır. Bu da dönüşümün sebep olduğu plastisite etkisi olarak bilinen sünekliğin ve yüksek mukavemetin olağanüstü kombinasyonunu sağlamaktadır [27].

304 kalite paslanmaz çelikler iyi şekillendirilebilirlik ve yüksek mukavemete ek olarak, iyi kaynaklanabilirlik ve iyi korozyon direnci gibi üstün özellikleri sayesinde medikal, kimya, havacılık, taşımacılık, gıda, ev aletleri, petrokimya, savunma sanayi gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır [28].

**Tablo 3.1.** AISI 304'ün mekanik genel özellikleri [9]

<b>Mekanik Özellikler</b>	<b>Değerler</b>
Çekme mukavemeti	500-700 MPa
Akma mukavemeti (% 0,2)	$\geq 190$ MPa
Sertlik, Brinell (HB)	$\leq 215$

## 4. PLASTİK DEFORMASYONUN TEMEL İLKELERİ

### 4.1. Deformasyonun Mekanizması

Metallerin deformasyon mekanizmaları;

- Kayma
- İkizlenme
- Tane sınırlarının kayması
- Yayınma sürünmesidir.

Metallerin plastik deformasyonu temel olarak belirli düzlem ve doğrultularda atomların kayması ile gerçekleşmektedir. Kaymanın kolaylıkla meydana gelmediği durumlarda ikizlenme ile meydana gelmektedir. Çok kristalli metalik malzemelerin deformasyonu, yüksek sıcaklıklarda ve düşük deformasyon hızlarında, tane sınırlarının kayması ya da atomların yayınma sürünmesi (yayınma ile yerdeğiştirme) mekanizmaları ile gerçekleşmektedir.

Metalik malzemelerin atomları arasındaki bağ kuvvetlerinden dolayı elastik ve plastik deformasyona direnç meydana gelmektedir. Plastik deformasyon, yapı içerisindeki noktasal, çizgisel ve yüzeysel hatalar ile ilgilidir [9].

#### 4.1.1. Kayma

Malzemenin kristal yapısındaki en önemli deformasyon mekanizmasıdır ve atom düzlemlerinden birisinin komşu atom düzlemi üzerinde kaymasıyla meydana gelmektedir. Düşük sıcaklık değerlerinde malzemelerin deformasyonu genellikle kayma ile gerçekleşmektedir. Kayma belirli kristalografik doğrultularda ve düzlemlerde dislokasyon hareketleri ile meydana gelmektedir. Başka bir ifade ile kayma, dislokasyon hareketleri ile, atom yoğunluğunun en fazla olduğu kayma düzlemlerinde ve kayma düzleminin üzerinde atomların en sık buldukları doğrultularda meydana gelmektedir [9,29].

##### 4.1.1.1. Kritik Kayma Gerilmesi

Bir atom düzleminde kayma için gerekli olan kayma gerilmesi kritik kayma gerilmesi olarak adlandırılmaktadır. Kritik kayma gerilmesi; kimyasal bileşim, dislokasyon yoğunluğu, deformasyon hızı ve sıcaklık faktörlerine bağlıdır.

Kristaldeki yapı kusurlarının yoğunluğu azaldıkça kritik kayma gerilmesi azalmaktadır, ancak yapı kusuru olmadığı zaman ise kritik kayma gerilmesi aniden yükselmektedir. Fe, W gibi hmk yapıya sahip metallerin tüm sıcaklık değerlerindeki kritik kayma gerilmesi, Al gibi ymk yapıya sahip metallerin kritik kayma gerilmesi çok daha yüksektir. Deformasyon hızının artması ile kritik kayma gerilmesi de artmaktadır [9,29].

#### **4.1.2. İkizlenme**

İkizlenme düşük sıcaklıklarda meydana gelen ve özellikle hsp kristal yapıya sahip metallerde önemli bir mekanizmadır. Kaymaya oranla toplam deformasyona katkısı çok düşüktür [29].

İkizlenmenin meydana geldiği kristal yapı başlangıçtaki yapının ikiz düzlemine göre simetriği durumundadır. İkizlenmede atomlar, atomlar arasındaki mesafenin kesri kadar hareket etmektedir ve her kristal sistemde belirli düzlem ve doğrultularda gerçekleşmektedir [9].

#### **4.1.3. Tane Sınırlarının Kayması**

Çok kristalli metalik malzemelerin deformasyonu, yüksek sıcaklıklarda ve düşük deformasyon hızlarında, tane sınırlarının kayması ya da atomların yayınma sürünmesi ile gerçekleşmektedir. Tane sınırlarının kaymasıyla taneler yer değiştirebilmektedir. Tanelerin yer değiştirmesi sırasında tane sınırlarının birbirlerine uyum sağlayabildiği deformasyon koşullarında (yüksek sıcaklık ve düşük deformasyon hızı) meydana gelmektedir [9].

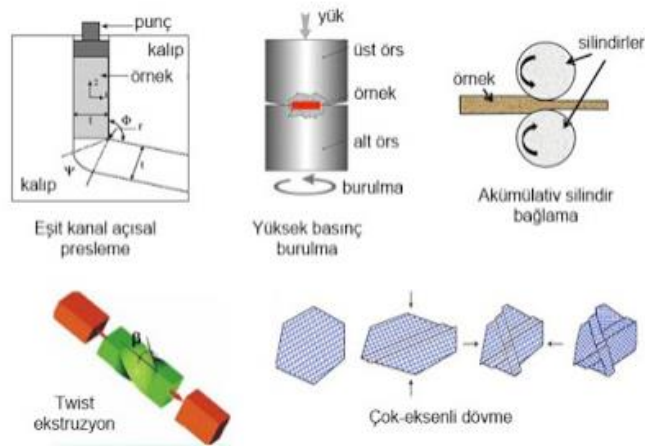
#### **4.1.4. Yayınma Sürünmesi**

Çok kristalli malzemeler, deformasyon sıcaklığı ile ergime sıcaklığının yakın olduğu yüksek sıcaklık ve düşük deformasyon hızlarında, atomların uygulanan gerilme yönünde yer değiştirmesi ile (yayınma sürünmesi) yer değiştirebilmektedirler. Atomlar uygulanan gerilme yönünde yayındığında veya atom boşluklarının uygulanan gerilmeye dik yönde yayındığında taneler uzayabilmektedir [9].

#### 4.1.5. Aşırı Plastik Deformasyon

Aşırı plastik deformasyon, tane boyutları yaklaşık olarak 100 nm olan gözenekli metallere ve alaşımlarının bir üretim yöntemidir. Yöntem sonucu oluşan yapı yeniden kristallenmiş amorf halini koruduğu görülmektedir.

Aşırı plastik deformasyon yöntemi genel olarak plastik deformasyona yatkın malzemelere uygulanmaktadır. Buradaki büyük gerilme değerlerine, kuasi-hidrostatik basınç altında burulma, eşit kanal açısız presleme ve çok eksenli dövme proseslerinde ulaşılmaktadır. Yöntem, test edilen malzemeye tekrarlı plastik kayma deformasyon işleminin uygulanmasına dayanmaktadır. Aşırı plastik deformasyon, ortalama tane boyutunun düşürülmesiyle, gözeneksiz nanotozların sıkıştırılmasıyla elde edilemeyen masif yapıdaki numunelerin elde edilmesini sağlamaktadır. Şekil 4.1.'de aşırı plastik deformasyona örnek gösterebileceğimiz yöntemler bulunmaktadır [10].



Şekil 4.1. Tipik aşırı plastik deformasyon yöntemleri [10]

## 5. ÜRETİM SÜRECİNDE KALINTI GERİLMELER

Kalıntı gerilmesi bir malzemede dış kuvvetlerden bağımsız olarak meydana gelen gerilmeler sistemi olarak tanımlanabilmektedir. Dengeli sıcaklıklarda ve bir dış kuvvetin veya momentin etkisi altında olmayan bir sistem ya da bileşendeki gerilmedir. Bir makine elemanı hiç kalıntı gerilmeye sahip olmadan üretilse dahi, değişken bir yüklemeye maruz kaldığı servis şartlarında kalıntı gerilmeleri meydana gelebilmektedir. Bu nedenle bu tür gerilmelere tasarım sırasında dikkat edilmelidir [30,31].

Kalıntı gerilmesi bir elastik gerilmedir ve ulaşabildiği en yüksek değer malzemenin akma gerilmesidir. Gerilme bu değeri geçtiği zaman, negatif yönlü bir kuvvet yoksa, akma gerilmesi değerine inene değin malzeme kendisini deforme etmektedir. Yani malzemede plastik deformasyon meydana gelerek kalıntı gerilmesi değeri düşmektedir [30].

Kalıntı gerilmesi bir malzemenin şeklini veya özelliklerini değiştiren malzeme deformasyonu, talaşlı imalat, ısıl işlem gibi çoğu üretim işlemleri sırasında gelişmektedir. Birçok kaynaktan oluşabilmekte ve işlenmemiş hammadde de bulunabilmektedirler. İmalat sırasında oluşabilir ve kullanım sırasında da meydana gelebilmektedirler. Bir bileşendeki kalıntı gerilmelerin kaynağı aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [33].

- Diferansiyel plastik akış
- Diferansiyel soğutma oranları
- Hacim değişiklikleri ile faz dönüşümleri vb.

Şekillendirme yolu ile üretilen her bileşende, üretimden kaynaklanan bir kalıntı gerilme durumu görülebilmektedir. Malzeme üzerindeki dış kuvvetler gerilmeyi arttırmaktadır. Serleştirme işlemlerinin ardından malzemenin yüzeyinde hacim değişimleri meydana gelir. Metalik bir malzeme ısıtılıp hemen ardından soğutulduğu zaman farklı genleşmeler meydana gelir ve bu termal kaynaklı kalıntı gerilmesinin ana nedenidir. Yüzey sertleştirme işlemlerinde de malzemenin çeşitli bölgelerinde farklı sıcaklıklar nedeniyle iç gerilmeler meydana gelmektedir. Bu işlem sırasında malzemenin dış yüzeyindeki soğuma hızı iç bölgelere kıyasla daha yüksektir. Bunlara ek olarak faz dönüşümü de kalıntı gerilmelere neden olmaktadır [30-32].

Kalıntı gerilmeler, makro ve mikro gerilmeler olarak sınıflandırılabilir. Makro ve mikro gerilmelerin her ikisi de herhangi bir anda bir bileşende bulunabilmektedir. Kalıntı gerilmeler 3 tip olarak sınıflandırılabilir.

1. Tip: Malzemenin tane boyutundan daha büyük bir ölçekte bir bileşenin gövdesinde oluşan makro kalıntı gerilmelerdir.
2. Tip: Tek bir tane ölçüğüne göre değişen mikro kalıntı gerilmelerdir.
3. Tip: Temelde dislokasyonların ve diğer kristalin kusurların varlığının bir sonucu olarak bir tane içinde var olan mikro kalıcı gerilmelerdir [33].

### **5.1. Kalıntı Gerilmesinin Malzemenin Mekanik Özelliklerine Etkisi Bakımından Önemi**

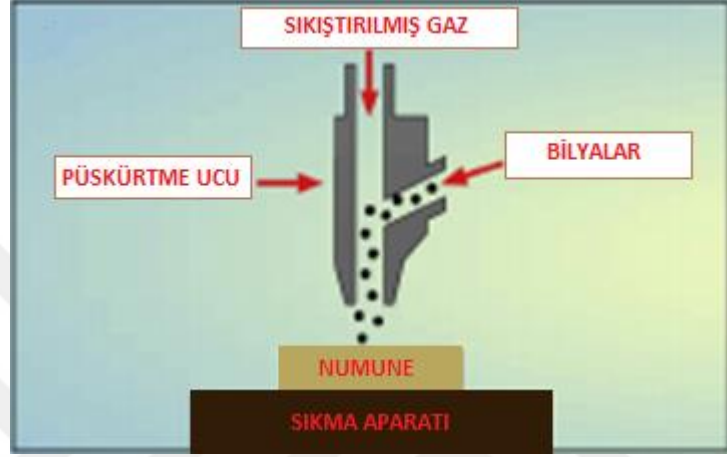
Kalıntı gerilmesi, malzemelerin mühendislik özelliklerini, özellikle de yorulma ömrünü, bozulmayı, korozyon direncini, boyutsal kararlılığı ve gevrek kırılmayı önemli derecede etkileyebilmektedir. Bu etkiler genel olarak parçaların, ekipmanların ve yapıların, onarım ve restorasyonunda fazla maliyetli olmaktadır. Bu yüzden parçaların ve yapısal elemanların kalıntı gerilme analizi, tasarımda ve gerçek hizmet koşullarında güvenilirliklerinin tahmininde zorunlu bir aşamadır [33].

Uygulanan gerilmeler ve kalıntı gerilmeler, malzemenin nihai performansını veya dayanımını belirlemede birlikte değerlendirilmektedir. Kalıntı gerilmeler ne kadar büyük olursa, malzemenin yüksek gerilmelere karşı dayanımı o derece düşük olacaktır. Malzemenin maruz kaldığı toplam gerilme miktarı, kalıntı gerilme ve uygulanan gerilme değerlerinin toplamı kadardır. Bu sebeple malzemenin kalıntı gerilme durumunun bilinmesi, malzemeye uygulanacak olan dış yükleri belirlemek için çok önemlidir. Genel olarak yapı yüzeyinde bulunan basma artık gerilmesi yapının mukavemetine olumlu katkıda bulunmaktadır. Yorulma mukavemeti ile yorulma ömrünü arttırıp, çatlak yayılma hızını azaltmaktadır ve çevresel etkilerin sebep olduğu gerilme korozyonu çatlama ve hidrojen kaynaklı çatlama gibi hasarlara karşı malzemenin direncini arttırmaktadır. Yapı yüzeyinde bulunan çekme gerilmesi, malzemenin yorulma mukavemetini ve yorulma ömrünü azaltmaktadır, çatlak yayılım hızını arttırmakta ve çevresel etkilerinde desteklediği çatlaklara karşı malzemenin direncini düşürmektedir. Bu sebeple yüzeyde bulunan çekme gerilmesi genel olarak istenmemektedir [31,32].

## 6. BİLYALI DÖVME

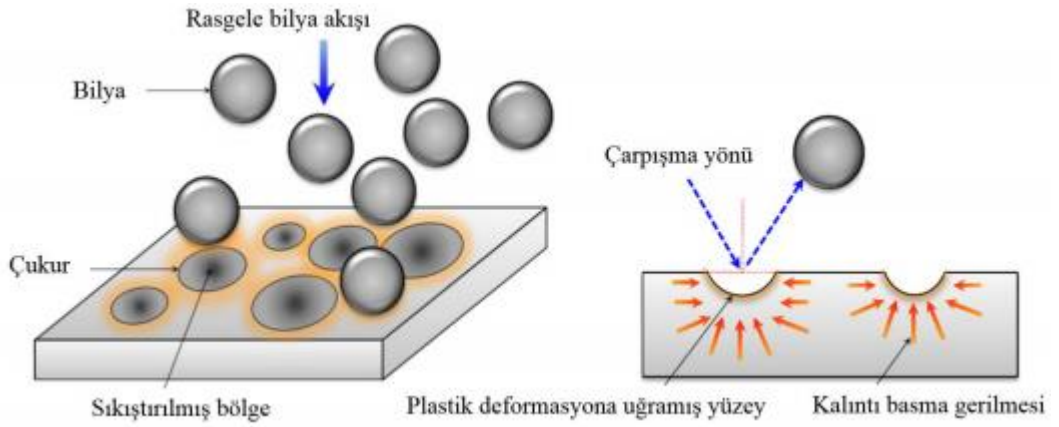
### 6.1. Bilyalı Dövme İşlemi

Bilyalı dövme işlemi, çeşitli bilyalı dövme cihazlarında belirli sertliğe sahip küresel dövme ortamında hızlandırılmış ve yüzeyde plastik deformasyona sebep olabilecek bir enerji miktarı ile bilyalı dövülmüş numune yüzeyine çarptığı mekanik bir soğuk yüzey işlemidir. Şekil 6.1.'de bilyalı dövme uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Bilyalı Dövme Prosesi [34]

Yüzey pürüzlülüğünü arttırmak, aşınmayı önlemek, yorulma özelliklerini iyileştirmek, gerilme ve aşınma korozyon çatlamasını önlemek amacı ile kullanılmaktadır. İşlemin ana amacı Şekil 6.2'de gösterildiği gibi yüzeye yakın basma kalıntı gerilmeleri oluşturmak ve aynı malzeme katmanının işlenerek sertleştirmektir. Bu sayede, malzemenin bozulması tamamen önlenilmekte ya da geciktirilebilmektedir [35,36].



Şekil 6.2. Bilyalı dövme işlemi sonrası oluşan deformasyon ve gerilmeler [37]



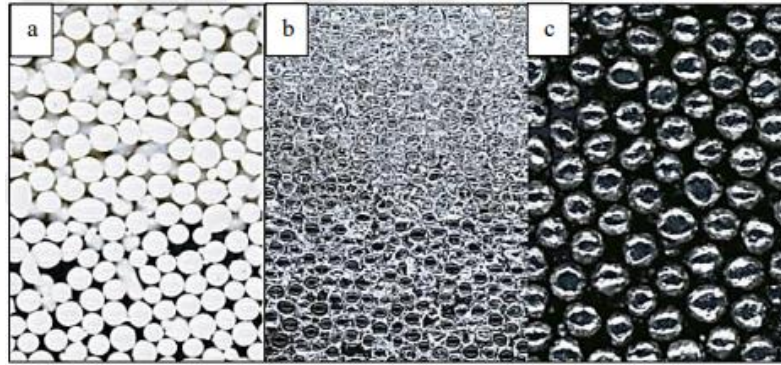
Bilyalı dövme işleminde, bilyanın çapı, dövme yoğunluğu, bilyanın malzemesi, püskürtme debisi ve malzemeye olan püskürtme uzaklığı gibi parametrelerde değişiklikler yapılarak uygulamalarda çeşitlilik oluşturulabilmektedir. Daha önce yapılan araştırma ve çalışmalarda, malzemeye uygulanan ısı işlem sertleştirilmesi ile parçanın servis ömründeki değişimin bilyalı dövme uygulamasıyla da kazandırılabilceği sonucuna ulaşılmıştır [38].

## 6.2. Bilyalı Dövme İşlemi Parametreleri

Bilyalı dövme işlemine ait malzemenin karakteristik özelliklerini belirleyen birçok parametre mevcuttur. Bunlar temel olarak bilyanın cinsi ve boyutu, püskürtme basıncı, püskürtme debisi, püskürtme mesafesi ve püskürtme açısı olarak söylenebilir. Bilyalı dövme parametreleri doğru seçilmezse (büyük atış, yüksek hız, aşırı dövme vb.), üst üste binme, mikro çatlaklar ve yüzey pürüzlülük hataları gibi yüzeysel kusurlara sebep olarak, bilyalı dövülmüş yüzeyin bütünlüğünü bozabilmekte veya değiştirebilmektedir. Bu da işlem görmüş malzemenin yüksek devir yorulma mukavemetinde önemli oranda düşüşe sebep olmaktadır [39].

### 6.2.1. Bilya Seçimi

Bilyalı dövme uygulamaların istenilen sonuca ulaşmada bilya seçimi önemli bir kriterdir. Bu uygulamalarda farklı boyut ve cinsten çelik, paslanmaz çelik, cam, seramik ve zirkonyum oksit bilyalar kullanılır. Boyut ve cins seçimine göre farklı sonuçlar elde edilmektedir. Bu sebeple yapılacak çalışmaların sonuçları için sınırsız varyasyon olanağı sağlamaktadır [40,41].



**Şekil 6.3.** Bilyalı dövme işleminde kullanılan bilya cinsleri, a) Seramik bilya, b) Cam bilya, c) Çelik bilya [42]

Bilyalı dövme işleminde oluşan yüksek kalıntı gerilmeler, sertliği yüksek bilyalar kullanılarak elde edilmektedir. Nano kristal tabakanın kalınlığı ile işlemde kullanılan bilyanın sertliği ile ilişkilidir. Sawada, bilyaların elastik modülünün yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilme ve sertliğe etkisini incelemek için aynı sertlik değerlerinde (ısıtım işlemi uygulayarak), aynı boyutlarda ve aynı yoğunlukta bilyalar kullanarak bilyalı dövme işlemi uygulamıştır. Yüksek elastik modüle sahip bilyalar kullanan Sawada daha pürüzsüz, daha sert ve yüksek kalıntı gerilmeli malzeme yüzeyi elde etmiştir [43].

**Tablo 6.1.** Farklı tip bilyalar ve fiziksel özellikleri [44]

	Çelik	Yüksek Hız Çeliği	FeCrB	ZrO <sub>2</sub> (Zirkonya)	WC-CO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Alümina)
<b>Sertlik (HV)</b>	200-800	800	1200	1300	1400	1900
<b>Elastik modül (GPa)</b>	200	220	290	200	300	360
<b>Yoğunluk (mg/m<sup>3</sup>)</b>	7,8	8,1	7,4	6,0	14,0	3,8
<b>Bilya şekli</b>	Küresel	Küresel	Küresel	Küresel	Küresel	Küresel

### 6.2.2. Püskürtme Basıncı

Bilyaların yüzeyi dövme enerjisini belirleyen temel unsur bilyaların nozul çıkış basıncıdır.

Bilyalı dövme işleminde önerilen bilya cinsi, bilyalanacak malzemenin fiziksel özelliklerine ve bilyanın çapına göre standartlar doğrultusunda püskürtme basıncının belirlenmesi gerekmektedir [42].

### 6.2.3. Püskürtme Debisi

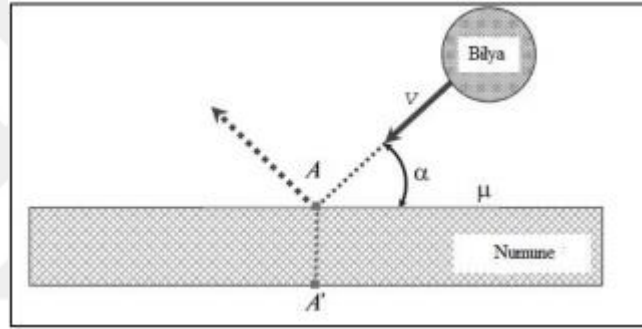
Uygulama yüzeyinde oluşacak fiziksel değişimlerin homojen olarak dağılabilmesi için bilyaların sabit püskürtme debisine sahip olması gerekir. Bu değişken en iyi örtme oranını elde edebilmek için önemli bir parametredir [42].

#### 6.2.4. Püskürtme Mesafesi

Belirli bir hız ile püskürtülen bilyaların en yüksek enerji ile yüzeye çarparak tekrar kullanımı için toplama havuzuna düşmesi gerekir. Bu nedenle bilyaların debisi ve çapıyla orantılı olacak şekilde uygulanacak yüzeye en uygun uzaklığın seçilmesi gerekmektedir [42].

#### 6.2.5. Püskürtme Açısı

Yüzeyin normali ile parça yüzeyi arasındaki alanda püskürtme ucunun yapmış olduğu açiya “püskürtme açısı” denir. Bilyalama işleminde maksimum enerjinin aktarılması için dik açıyla püskürtülmesi gerekir fakat bilyaların birbiri ile temas etmemesi veya farklı çalışma ortamları oluşturmak adına farklı açılarda püskürtme açısı seçilebilmektedir. [42]



Şekil 6.4. Bilyanın yüzeye çarpma açısı [44]

### 6.3. Bilyalı Dövme Uygulama Alanları

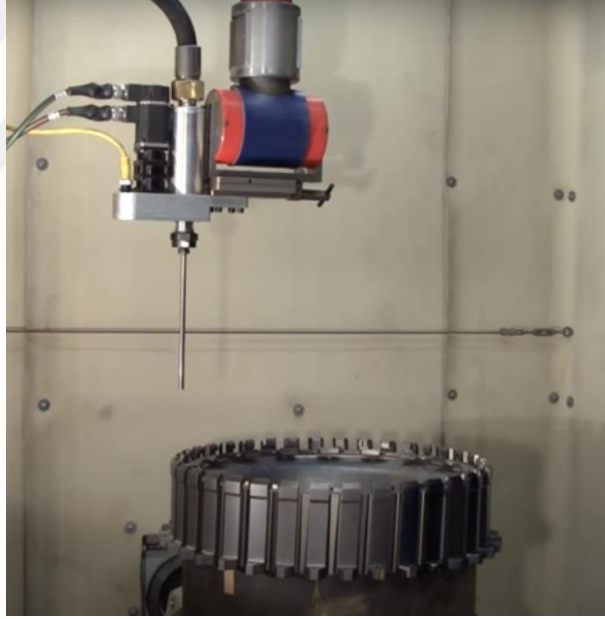
Bilyalı dövme prosesleri endüstride birçok alanda uygulanmaktadır. İşlemin sektörde kullanım amacı yorulma dayanımının artırılması ve kalıntı gerilmelerinin giderilmesiyle tam olarak açıklanabilmektedir. Herhangi bir imalat yöntemiyle üretilen parçalarda kesinlikle kalıntı gerilmeler bulunur. Bu kalıntı gerilmelerden kurtulmak için malzemelere gerilim giderme tavlama da uygulanmaktadır. Meydana gelen bu kalıntı gerilmeler hem zararlı hem de faydalı türde oluşabilmektedir. Yüzey tabakasında oluşan çekme kalıntı gerilmeleri zararlı ama yüzeyde ve yüzeyin hemen altında meydana gelen basma gerilmeleri ise üretim açısından faydalıdır. [42]

İyi bir yüzey iyileştirme yöntemi olan bilyalı dövme işlemi, otomotiv, havacılık ve enerji üretim endüstrilerinde genellikle yapısal parçalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Türbin ve kompresör diskleri (Şekil 6.6.), kanatlar, rotor milleri,

yaylar, iniş takım bileşenleri (Şekil 6.5.), dişliler, bağlantı çubukları vb. bileşenler, genellikle bilyalı dövme işlemi ile yüzey işlemi uygulanan tipik bileşenlerdir. [36,45]



**Şekil 6.5.** Uçak iniş takımı [41]

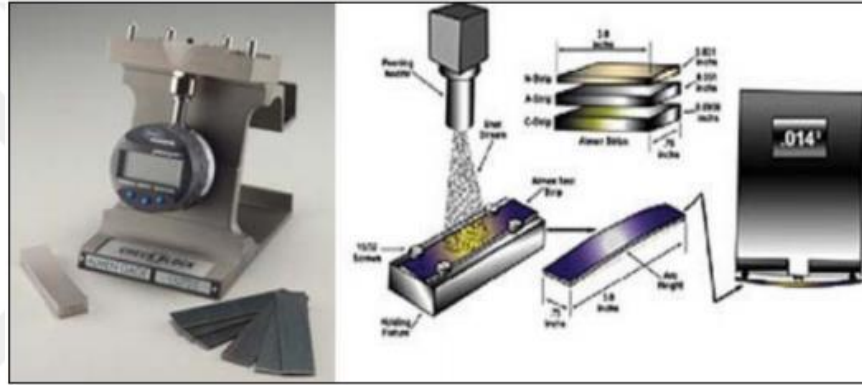


**Şekil 6.6.** Uçak motorunun fan diski

## 6.4. Bilyalı Dövme Proses Kontrol Metodları

### 6.4.1. Almen Şiddeti

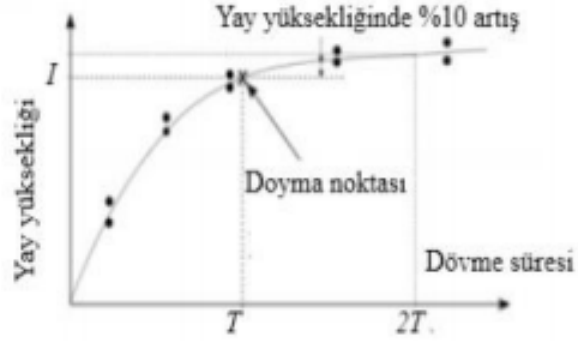
1943 senesinde John Almen tarafında geliştirilmiş olan Almen Testi endüstri sektöründe yoğun olarak kullanılan bilya püskürtme öncesi kullanılan bir muayene kontrol metodudur. Bu testin yapımında kendisine özgü sabit ölçülerde bir test malzemesi (SAE 1070 yay çeliği) ve ölçüm cihazı kullanılır. Çalışmalarda kullanılacak olan proses parametreleri bu test malzemesine uygulanarak elde edilecek olan nicel ve grafiksel sonuçlara göre bilya püskürtmesinin deney parametrelerine uyumluluğu tespit edilmektedir. Şekil 6.7.'de Almen Testi cihazı ve örnek numuneler gösterilmiştir. [46]



Şekil 6.7. Almen Test Cihazı ve Numuneler

Almen şiddeti çalışmalardaki tüm parametrelerin birleşik etkisini aynı anda ve diğer metodlara göre düşük bir maliyette yapılması sebebiyle dövme uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Kullanılan almen şeridi öncesinde belli olan parametreler doğrultusunda tutucu içinde dövülür ve çıkarılan şerit Almen ölçü aleti ile ölçümü yapılır.

Seçilen parametreler altında uygulanan bilyalı dövme işlemlerinde farklı sürelerde uygulama yapılarak Almen şiddeti bulunur. Buna bağlı bir doyum noktası elde edilir. Şekil 6.8.'de gösterilen Almen testinin şematik gösterimi ve doyma noktası eğrisi gösterilmektedir. Grafikte doyum noktası (T), bilyalı dövme işleminde sürenin iki katına ulaştığında yay yüksekliğinde oluşan artışın %10'dan az olduğu ilk nokta olarak gösterilmektedir.

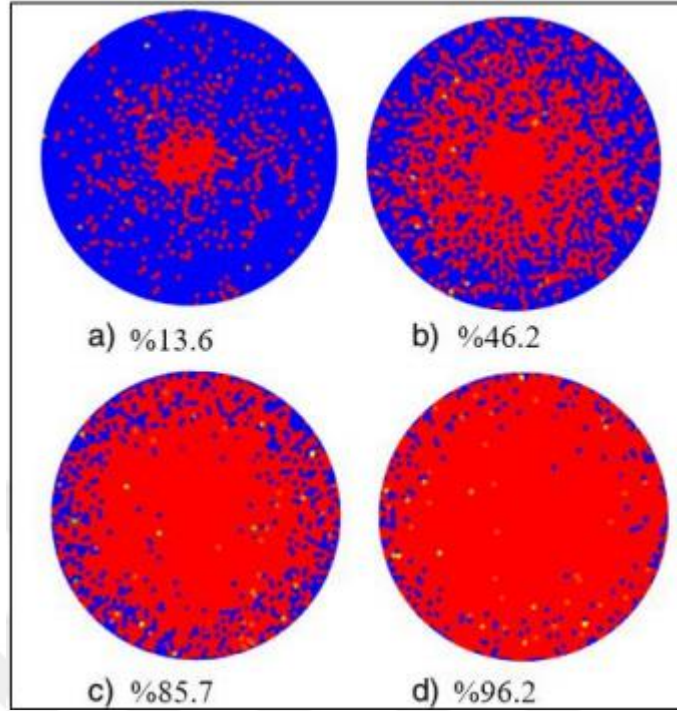


Şekil 6.8. Almen Testi doyum noktası grafiği [47]

#### 6.4.2. Yüzey Örtme Oranı

Yüzey örtme oranı yöntemi bilyalı dövme işlemi sonrası oluşan girinti ve çukurların oluştuğu alanın toplam işlenmiş yüzey alanına oranı olarak tanımlanmaktadır. Yüzey örtme oranı, işlenmiş yüzey emniyeti ve homojenliğinin yanında kalıntı gerilme tabakası kalınlığı ve işlenmiş yüzey emniyeti üzerinde kritik bir öneme sahiptir. Yüzey örtme oranı, bilyanın boyutuna, hızına, çarpma açısına ve dövme süresine bağlıdır. Bilyalı dövmede çoklu çarpma ve örtüşen girintiler ile birlikte oluşmaktadır. Pratik olarak bu yöntemi belirtmenin üç farklı yolu bulunur. Bunlar görsel muayene, mavi mürekkep ve kopyalama yöntemidir. Pratik işlem açısından yüzey örtme oranı %98 ve üzeri değerler tam (%100) olarak kabul edilmektedir. Tam oranın üzerindeki %200 yüzey örtme oranında, %98'e ulaşmak için gerekli sürenin 2 katı süreye ulaşana kadar bilyalı dövme işlemi yapılarak elde edilir.

Van Bo Nguyen ve ark. yaptıkları çalışmada kullandıkları Ghost View görüntü işleme programını kullanarak yüzey örtme oranını nicel olarak ölçmüşlerdir. Şekil 6.9.'da örnek yüzey örtme oranı görselleri verilmiştir. Fotoğraftaki mavi renk dövülmemiş, kırmızı renkler ise dövülmüş bölgeleri belirtmektedir. [48]

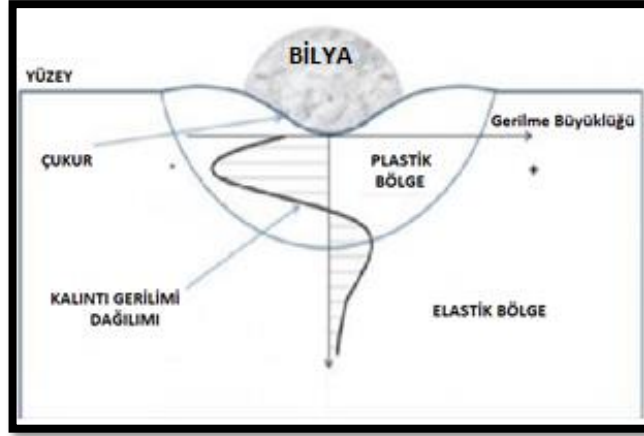


**Şekil 6.9.** Ghost View yüzey örtme oranı görselleri [48]

### **6.5. Bilyalı Dövme Yönteminin Kalıntı Gerilmesine Etkisi**

Bilyalı dövme ya da indüksiyon ile sertleştirme gibi yöntemler basınç kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olmaktadır ve çatlamaı önleyerek alternatif yükler altında malzemenin yorulma ömrünü arttırmaktadır.

Bilyalı dövmede kalıntı gerilmesinin büyüklüğü bileşenin yüzey derinliğine bağlı olarak değişmektedir. Kalıntı gerilmesinin maksimum değeri Şekil 6.10'da gösterildiği gibi gerilme-yüzey derinliği grafiği ile belirlenmektedir. Kalıntı gerilmenin büyüklüğü, bilyalı dövme prosesi sırasında malzemenin akma dayanımının yarısına kadar ölçülebilmektedir.



**Şekil 6.10.** Bilyalı dövme sırasında yüzey derinliği-gerilme büyüklüğü grafiği

Malzemenin dış yüzey derinliği, bilyalı dövme parametrelerine bağlıdır. Bu parametrelerin etkisi malzeme özelliğine göre değişmektedir ve her alışımda atış yoğunluğunun etkisi, yüzey derinliği açısından farklılık göstermektedir. [49]

#### **6.6. Bilyalı Dövme Üzerine Yapılmış Benzer Çalışmalar**

Literatürde, çeşitli malzemelere bilyalı dövme işlemi uygulanmış pek çok çalışma bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak;

P. Zhang ve ark. cam bilyalar kullanarak bilyalı dövme işlemi uyguladıkları yüksek mukavemetli AZ80 magnezyum alaşımının yorulma mukavemetinde %60 iyileşme gözlemlemişlerdir. Diğer soğuk dövme yöntemlerine kıyasla bilyalı dövme işleminin yüksek üretkenlik ve düşük maliyet açısından cezbedici olduğunu belirtmişlerdir. [50]

B. Nasiłowska ve ark. 904L kalite östenitik paslanmaz çelik ile yapmış olduğu çalışmada nitrürleme işlemi öncesi yapmış olduğu bilyalı dövme işleminde yüzeldaki mikro sertlik değerlerinin 2 katına çıktığını gözlemlemiştir. Yapılan analizler, östenitik paslanmaz çeliğin bilyalı dövme sonrası gerilme dağılımı performansında (sertlik, yorulma dayanımı, akma dayanımı, darbe dayanımı ve uzama azalmasının yanı sıra tribolojik aşınmaya karşı dirençte artış) önemli gelişmeler göstermiştir. [51]

S. Bagherifard ve ark. biyomedikal implantlarda kullanılan 316L kalite paslanmaz çeliğe şiddetli bilyalı dövme işlemi sonrası yüzey modifikasyonlarındaki değişimi inceledikleri çalışmada tane incelmesi, martenzitik faz dönüşümü ve basma



kalıntı gerilmelerine neden olduğu gözlemlemişlerdir. Ayrıca sertlik açısından malzemenin üstün özellik gösterdiği sonucuna varmışlardır. Bu çalışmalar doğrultusunda çeliğin yüzey özelliklerini optimize etmek ve mekanik işlevselliğini en üst düzeye çıkarabilmek için bilyalı dövme işleminin yüksek bir potansiyele sahip olduğunu belirtmişlerdir.[52]

Sawada, bilyaların elastik modülünün yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilme ve sertliğe etkisini incelemek için aynı sertlik değerlerinde (ısıtım işlemi uygulayarak), aynı boyutlarda ve aynı yoğunlukta bilyalar kullanarak bilyalı dövme işlemi uygulamıştır. Yüksek elastik modüle sahip bilyalar kullanan Sawada daha pürüzsüz, daha sert ve yüksek kalıntı gerilmeli malzeme yüzeyi elde etmiştir. [43]



## 7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 7.1. Malzeme Seçimi

#### 7.1.1. Çekme Testi Numunesi Malzemesi ve Ölçüleri

Batı Paslanmaz Çelik San. ve Tic. A.Ş. firmasından temin edilen 500x500x2 mm kalınlığında olan 2 adet 304 kalite östenitik paslanmaz çelik plakaların sertifikasyon bilgileri Tablo 7.1. ve Tablo 7.2.'de belirtildi.

**Tablo 7.1.** Kullanılan malzemenin kimyasal analiz tablosu

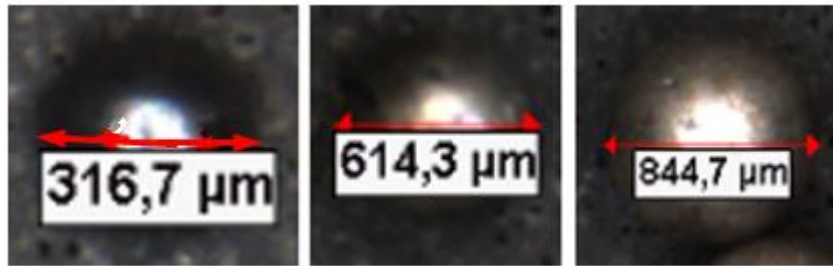
	C	Cr	Mn	Ni	P	S	Si
İçerik	-	17,5	-	8	-	-	-
	0,03	20	2	12	0,045	0,03	1
W7BE	0,018	17,685	1,618	8,055	0,033	0,001	0,357

**Tablo 7.2.** Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri

	Rm N/mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 N/mm <sup>2</sup>	A50 %	HV10
03W7BE	654,46	359,76	50,71	180

#### 7.1.2. Kullanılan Bilyaların Malzemesi ve Ölçüleri

Bilyalama cihazımızda Sigma Shot Peening Sist. Yüz. İşl. Tekn. San. Ve Tic. firmasından Şekil 7.1.'de gösterilen, ortalama 0,3 mm, 0,6 mm ve 0,8 mm olarak 3 farklı boyuttaki çelik bilyalar kullanılmıştır.

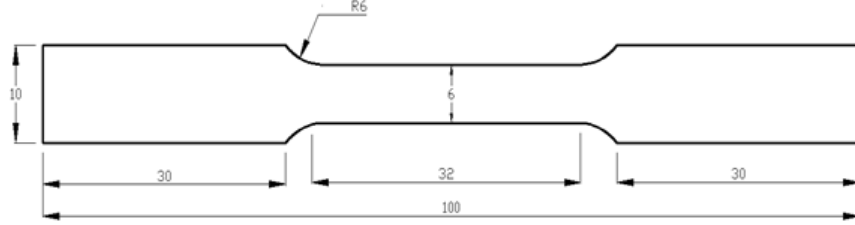


**Şekil 7.1.** Kullanılan bilyaların boyutları

## 7.2.Bilyalı Dövme Öncesi Deneysel Çalışmalar

### 7.2.1. Çekme Numunesinin Hazırlanması

Et kalınlığı 2mm olan plakalarımız resim de belirtilen ölçülerde Öztaş Demir Çelik Saç İşleme Ltd. Şti firmasına lazer kesim yöntemiyle kesilmiştir.

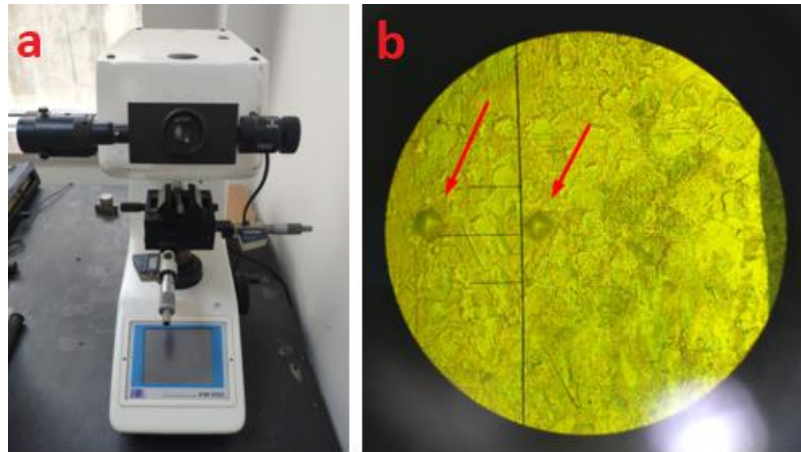


Şekil 7.2. Çekme Testi Numunesi Ölçüleri

### 7.2.2. İşlem Uygulanmamış Numunelerde Mikro Sertlik Ölçümü

Genel olarak literatürde ince ve özel işlem görmüş malzemelerin ölçümlerinde Vickers sertlik ölçüm yöntemi tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında 2 mm kalınlığa sahip 304 kalite paslanmaz çelik plakada bu yöntemle mikro sertlik değişimleri tespit edilmiştir.

Bu kapsamda Manisa Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü bünyesinde bulunan Future-Tech FM-700 marka mikro sertlik ölçüm cihazı kullanılarak 50 gf yük 10 s süreyle uygulanmıştır. İki iz arasında kalan mesafe 40  $\mu\text{m}$  ( $\pm 10$ ) olacak şekilde Vickers indenter ile sertlik ölçümü yapılmıştır (Şekil 7.3.).



Şekil 7.3. a) Future-Tech FM-700 sertlik cihazı, b) Ölçümler arası mesafenin görseli

### 7.2.3. İşlenmemiş Çekme Numunesinin Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

Manisa Celal Bayar Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümüne ait Mitutoyo SJ-310 marka (Şekil 7.4.) yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile bilyalama işlemi yapılmamış çekme numunesinin yüzeyine Tablo 7.3.'daki standartlarda yapılan ölçüm sonuçları kaydedildi.



Şekil 7.4. Mitutoyo SJ-310 yüzey pürüzlülük cihazı

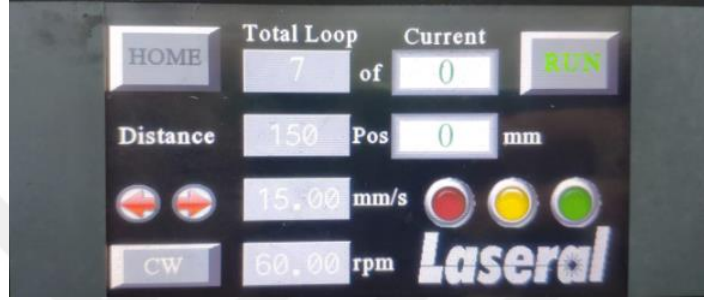
Tablo 7.3. Yüzeyde uygulanan pürüzlülük ölçümü standartları

İş İsmi:	Numune	Operatör:	Mitutoyo
Ölçüm Araçları:	SurfTest	Yorum:	Ver2.00
Standart:	ISO 1997	N:	5
Profil:	R	Ölçüm Mesafesi:	0,8 mm
λs:	2,5 μm	Filtre:	GAUSS

### 7.3. Bilyalı Dövme İşlemi

#### 7.3.1. Bilyalı Dövme İşlemi Parametreleri

Manisa Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü bünyesinde kullanılan bilyalama cihazında (Şekil 7.6.) işlem için belirlenen parametreler cihaz üzerinden alınmış bir görüntü ile Şekil 7.5.'de verilmiştir. 1 döngü yaklaşık olarak 2dk 20s sürmektedir. İşlem numunelerin arka ve ön yüzeylerine yapılmıştır.

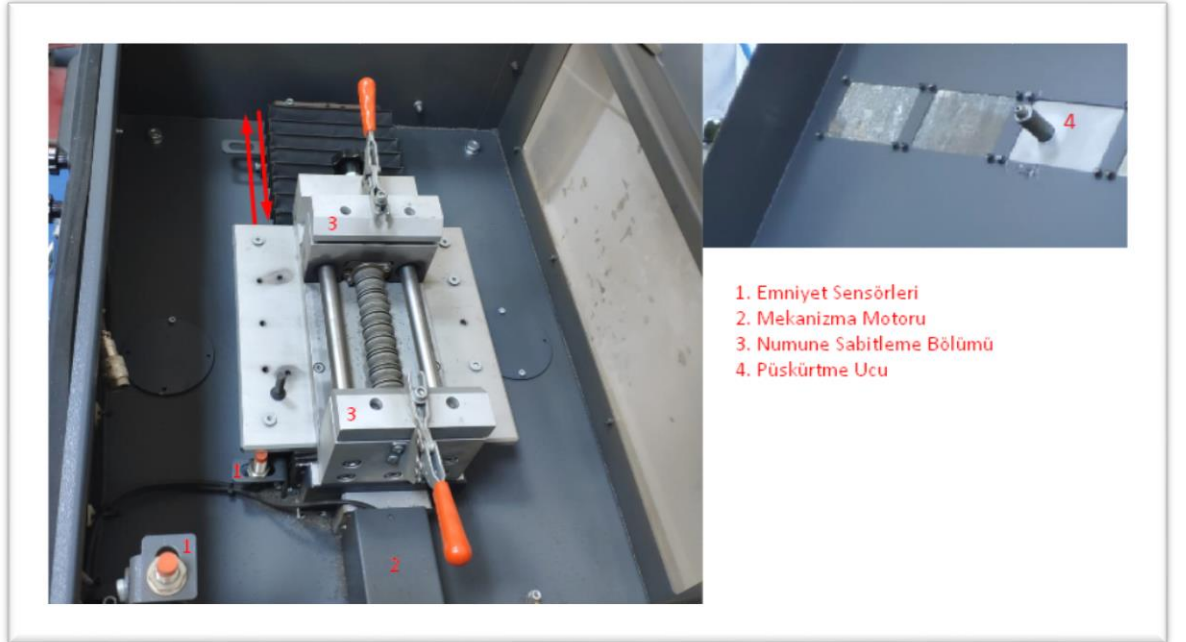


Şekil 7.5. Bilyalı Dövme İşlemi Parametreleri

### 7.3.2. Bilyalı Dövme İşlemi Uygulaması

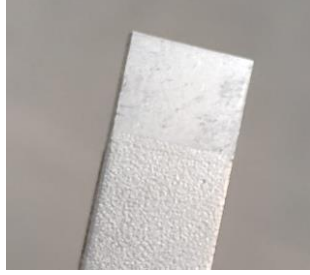


Şekil 7.6. Bilyalama Cihazı Dış Bölüm



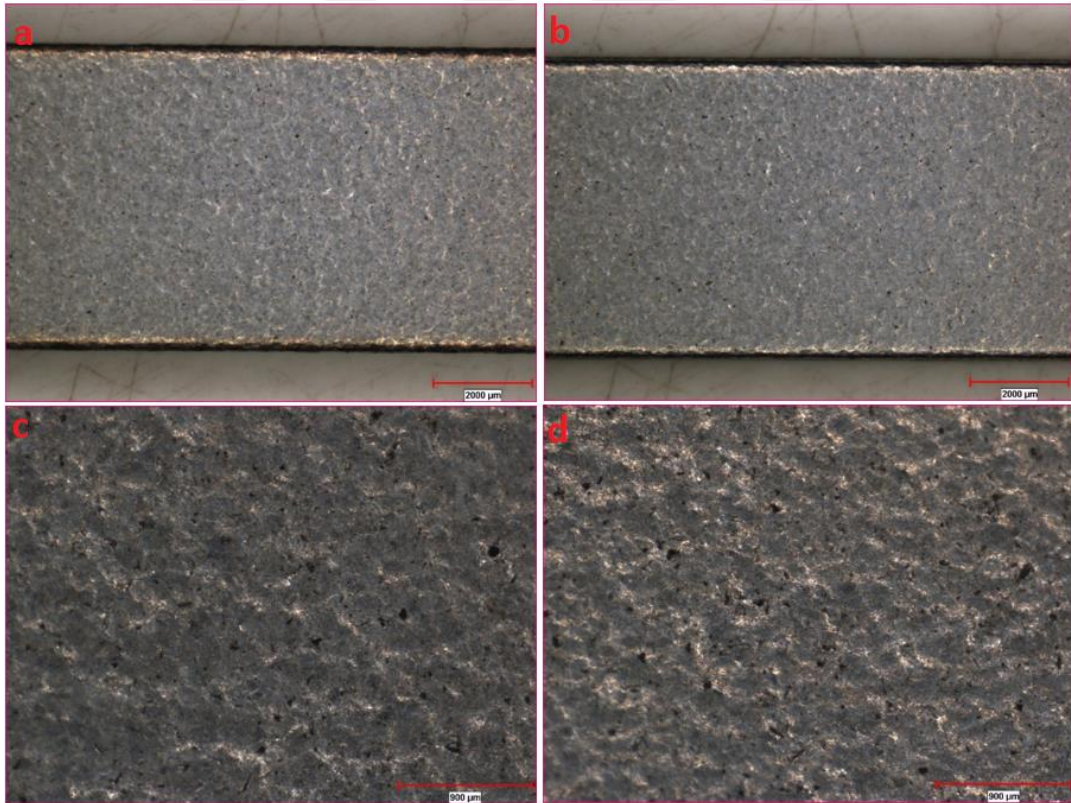
Şekil 7.7. Bilyalama Cihazı İç Bölüm

Bilyalı dövme işleminde ilk olarak sabitleme bölümünde bilyalanacak numunenin uç kısımlarından 10 mm'lik bölümü içerde kalacak şekilde mengenede sıkıştırılarak sabitlenir. Numunenin kayma yapıp yapmadığı el ile kontrol edilir. Mengene içerisinde kalan kısım bilya darbelerine maruz kalmayacağı için Şekil 7.8.'deki görüldüğü gibi bilyalı dövülmemiş olarak kalacaktır.



**Şekil 7.8.** Mengene altında kalan bilyalı dövme uygulanmayan bölge

Bilyalanmış numunenin 10x ve 30x büyütmelerdeki ön ve arka yüzeylerinden alınmış stereo mikroskop görüntüleri Şekil 7.9.'de gösterilmiştir. Böylece her iki yüzeyin homojen olarak işlendiği tespit edilmiştir.



**Şekil 7.9.** a) ön yüzey, b) arka yüzey, c) büyük büyütmede ön yüzey d) büyük büyütmede arka yüzey

Numune sabitledikten sonra Şekil 7.6.'da gösterilen 2. bölümdeki hazneye 0,3 mm, 0,6 mm ya da 0,8 mm olan bilyalardan kullanılacak herhangi biri doldurulur. Burada dikkat edilmesi gereken husus farklı boyuttaki bir bilyaya geçiş yapmadan önce bilya maliyetinin yüksek olmasından dolayı cihaz içinde kalan bilyaların fırça yardımıyla dikkatlice temizlenmesidir. Böylece yeniden kullanılmak üzere muhafaza edilebilir. Aynı bilyalar bu şekilde toplanarak tekrar tekrar kullanılabilir.

Püskürtme işlemi, Şekil 7.6.'da 5. bölümde gösterilen kompresörden gelen hava ile bölüm 2'deki haznedeki Şekil 7.7.'deki 4. bölümde gösterilen püskürtme ucuna gelmekte ve buradan sabit bir doğrultuda püskürtülmektedir. Püskürtme ucu sabit olduğundan numune yüzeyine bilyalama işleminin homojen olarak yapılabilmesi için sabitleme bölümü hareketli bir mekanizma üzerine kurulmuştur. Bu mekanizma Şekil 7.9.'da gösterilen yönde hareket etmektedir ve Tablo 7.3. deki parametrelere göre bilyalama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında 16 adet çekme numunesi için seçilen 4 farklı parametre Tablo 7.4.'de gösterilmiştir. Bilyalama işleminde uygulama sırası bilya boyutuna göre büyükten küçüğe doğru uygulanmıştır.

**Tablo 7.4.** Bilyalama Parametreleri

	Numune	Bilya Çapı (mm)	Bilyalama Süresi	Bilyalama Açısı	Bilya Malzemesi
1.Grup:	4 adet	0,8	Sabit	Sabit	Çelik
2.Grup:	4 adet	0,8+0,6	Sabit	Sabit	Çelik
3.Grup:	4 adet	0,8+0,3	Sabit	Sabit	Çelik
4.Grup:	4 adet	0,8+0,6+0,3	Sabit	Sabit	Çelik

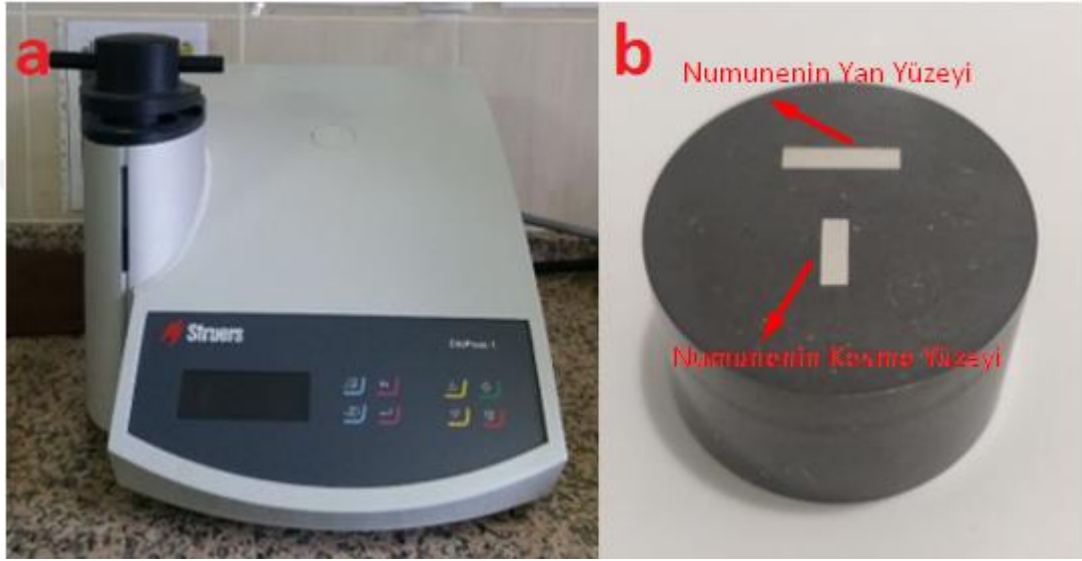


## 7.4. Bilyalı Dövme Sonrası Deneysel Çalışmalar

### 7.4.1. Mikroyapı İncelemesi

#### 7.4.1.1. Bakalite Alma ve Yüzey Parlatma İşlemi

Mikroskobik inceleme yapılabilmesi için numune yüzeyine zımpara ve parlatma işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Bunun için numuneler öncelikle bakalite alınmalıdır. Bakalite alma işlemi Struers Citopress -1 bakalit cihazı ile yapılmıştır (Şekil 7.10.a.).



Şekil 7.10. a) Struers Citopress -1 bakalit cihazı, b) Bakalite alınmış bir numuneye ait görüntü

Zımpara ve parlatma işlemleri Metkon Forcipol 1V marka parlatma cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 7.11.). Bakalite alınan numuneye ilk olarak 320 grid zımpara kağıdı ile 3 dakika zımpara işlemi yapıldı. Sırası ile 400 ve 600 grid zımpara kağıtları kullanılarak her geçişte numuneyi 90 derece döndürüp, önceki işlemdeki zımpara izleri kaybolana kadar 100 devirde işlem gerçekleştirildi. Daha sonra aynı işlemler 800, 1000 ve 1200 gridlik zımpara kağıtları kullanılarak 150 devirde zımpara işlemi yapıldı. Son olarak ise keçe yardımıyla 3  $\mu\text{m}$  ve 1  $\mu\text{m}$ 'luk elmas partiküller kullanılarak parlatma işlemi yapıldı.



**Şekil 7.11.** Metkon Forcipol IV parlatma cihazı

Parlatma işleminin ardından tane sınırların görülmesi ve mikroyapı fotoğraflarının çekilmesi için son işlem olarak dağlama işlemi yapılmıştır. Bu işlem için hazırlanan çözeltinin içeriğinde 15 cc HCl, 10 cc HNO<sub>3</sub>, 10 cc CH<sub>3</sub>COOH ve son olarak miktarını belirlerken çözeltide tutma süresinin de belirlendiği 5-6 damla gliserin(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>) kullanıldı (Şekil 7.12.). Numune dağlama işleminde 15 s tutulup yüzeyi mikroskop ile kontrol edilerek yetersiz kaldığı durumlarda beşer saniye kontrollü tekrar daldırma işlemi yapılmıştır.



**Şekil 7.12.** Dağlayıcı Çözelti

#### 7.4.1.2. Mikroyapı Görüntüleme İşlemi

Mikroyapı incelemeleri Nikon Eclipse LV150N marka mikroskop ile yapılmıştır (Şekil 7.13.)



Şekil 7.13. Nikon Eclipse LV150N mikroskop

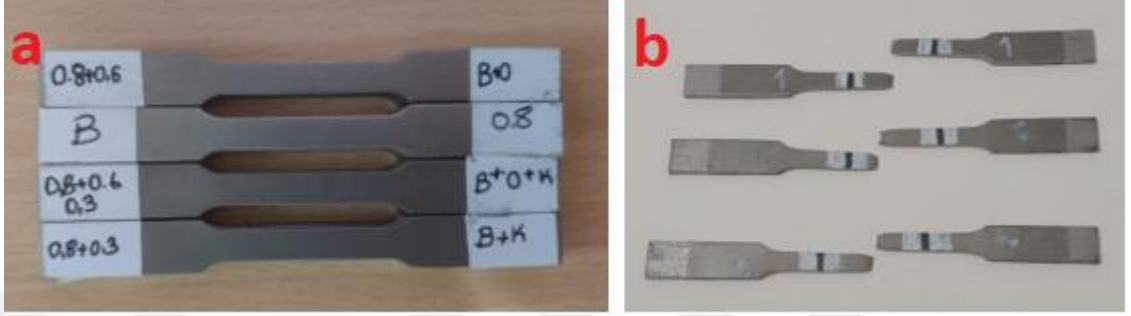
#### 7.4.2. Bilyalı Dövme İşlemi Sonrası Çekme Testi

Çekme testleri Shimadzu Autograph AG-IS 100 kN marka çekme cihazı ile yapılmıştır (Şekil 7.16.).



Şekil 7.14. Shimadzu Autograph AG-IS 100 kN

Öncelikle numune yüzeyinde 2 referans nokta belirlenip, 2mm/dk çekme hızı ile yapılmıştır. Ektansometre ölçümü ile akma, çekme dayanımları ve yüzde uzama değerleri kaydedilmiştir. Şekil 7.15.'de çekme işleminin öncesi ve sonrasındaki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.15. Çekme işlemi a) öncesi ve b) sonrası örnek görüntüleri

#### 7.4.3. Xrd (X-Işını Kırınım Yöntemi) Testi

XRD yönteminde kristal yapı bozukluklarını, kristal yönelmeleri, fazlar, kristalit boyutları, latis parametreleri ve benzeri birçok özellik hakkında bilgi edinmekteyiz. Bunların yanı sıra, malzeme içerisindeki bileşenlerin sahip olduğu piklerin şiddetleri bileşenin malzeme içerisindeki oranına bağlı olduğu için nicel analiz de yapılabilmektedir. XRD ile bilinmeyen bir malzeme zarar görmeden ve küçük bir parçası yeterli olacak şekilde; kırınım spektrum ve JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) kartları kullanılarak analiz edilebilmektedir [53].

Bu çalışma kapsamında DEFAM bünyesinde bulunan ve cihaz sorumlusu tarafından Şekil 7.16.'de gösterilen cihaz ile bilyalı dövülmüş ve dövülmemiş numunelere XRD analizi yapılmıştır



Şekil 7.16. DEFAM bünyesindeki XRD Cihazı

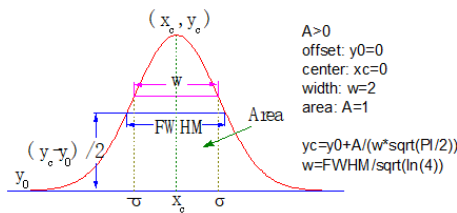
Bu çalışma kapsamında belirlenen parametreler yardımıyla üretilen numunelerin X-ışını kırınım desenlerinden numuneye ait yarı pik genişlikleri (FWHM) elde edilerek kristalit boyutları ve latis mikro-gerinimleri aşağıda verilen denklemler yardımıyla belirlenmiştir (denklem 1 ve 2). Burada FWHM ( $\beta$ ), pikin maksimum yarı yüksekliğinde radyan cinsinden kırınım piki genişliğidir. Kristalit boyutu ( $L$ ), latis mikro-gerinimi ( $\epsilon$ ), x-ışını dalga boyu ( $\lambda$ ), denklem sabiti ( $C$ ) ve Scherrer sabiti ( $K$ ) değerleridir.  $C$  sabitinin değeri  $\epsilon$ 'nun homojen deformasyon olmadığı yerde genel olarak 4 ve  $K$  sabitinin değeri 0,89 olarak kullanılmıştır [54-56].

$$\beta = \frac{K \cdot \lambda}{L \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

$$\beta = C \epsilon \cdot \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \quad (2)$$

Bir malzemenin latis mikro-şekil değişimini ve kristalit boyutunu belirlemek için X-ışını kırınımı yönteminden yararlanılır. Kristalin bir malzemeye X-ışınları gönderildiğinde, bu ışınların bazıları malzemenin kristal düzlemleri tarafından yansıtılır. Yansımanın şiddeti difraktometre dedektörü ile ölçülerek bir difraksiyon piki elde edilir. Herhangi bir genişliğin olmadığı (bir çizgi) durum ideal pik şeklindedir. Difraksiyon pikinin genişlemesi durumu bir malzemedeki kristalit boyutunu ve latis mikro-şekil değişimini belirlemenin kaynağıdır. Pik genişlemesi; kristalit boyutu, latis mikro-şekil değişimi ve enstrümantal etkiler olmak üzere üç farklı faktöre bağlıdır. Bir pik genişliği genellikle, maksimum şiddetin yarısında ölçülür ya da yarı yükseklikteki tam genişlik değeridir (full width at half maximum-FWHM) [57].

FWHM ( $\beta$ ) değeri, yoğunluk- $2\theta$  grafik değerleri ile OriginPRO programı üzerinden hesaplanarak elde edilmiştir. Program seçilen piklerin FWHM değerlerini Şekil 7.17.'da gösterildiği gibi hesaplamaktadır.



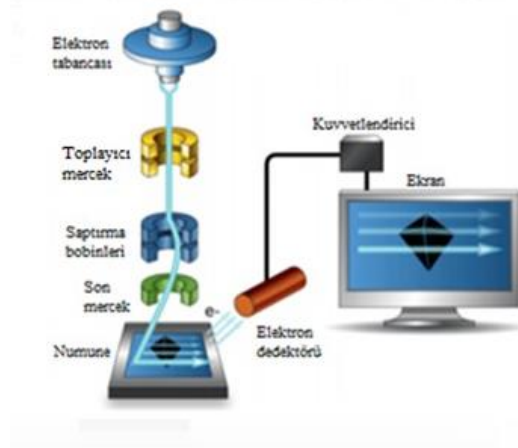
**Şekil 7.17.** OriginPro ile FWHM değerinin belirlenmesi

#### 7.4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemesi

Taramalı elektron mikroskobu numunenin yüzeyini yüksek büyütmelerde analiz etme imkânı sunan bir yöntemdir. Bu yöntem ile sıvı olmayan ve sıvı özellik taşımayan tüm malzeme çeşitleri incelenebilmektedir.

SEM-EDX analizi, numune yüzeyinin iki boyutlu görüntülerinin alınması ve yüzeydeki kimyasal kompozisyonun yarı-kantitatif olarak saptanmasında kullanılmaktadır.

Mercekler ile donatılmış olan cihazın son merceğinden toplanan elektronlar numune ile etkileşime girerek  $1\mu\text{m}$  derinliğe nüfuz etmekte ve bu olay sonucu görüntü elde etmek için kullanılan sinyaller meydana gelmektedir. Taraması yapılan numuneden yayılan sinyaller (elektronlar) elektron dedektörü vasıtası ile tespit edilmektedir. SEM'in görüntü üretiminde ikincil (SE) ve geri saçılan elektronların (BSE) ikisi de kullanılmaktadır ve toplayıcı ekrana pozitif voltaj uygulandığı zaman ikisi birlikte toplanmaktadır. Ancak uygulanan voltajın negatif olması halinde yalnızca geri saçılan elektronlar toplanmaktadır. Sinyaller görüntüleme ekranına geldiği zaman görüntünün yoğunluğu ve parlaklığı uygun görüntü elde edilene kadar kontrol edilmektedir. Şekil 7.18.'de SEM cihazının bileşenleri verilmiştir [53,58].



Şekil 7.18. SEM cihazının tüm bileşenleri [58]

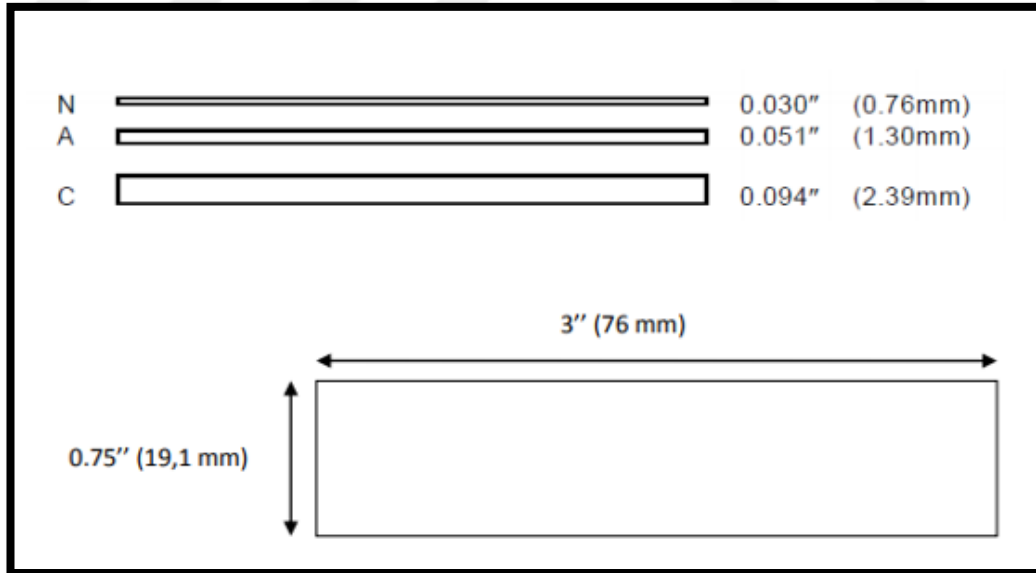
Bu çalışmamızda DEFAM bünyesinde bulunan Şekil 7.19.'de gösterilen cihaz ile bilyalı dövülmüş ve dövülmemiş numuneler yüzeyden Taramalı Elektron Mikroskobu ile analiz edilmiştir.



Şekil 7.19. DEFAM SEM Cihazı

#### 7.4.5. Almen Şiddetinin Belirlenmesi

Bu tez kapsamında almen şiddeti ölçümünde kullanılmış şeritlerin ölçüleri Şekil 7.20'de verilmiştir. Çalışma kapsamında 0,76 mm et kalınlığına sahip N tipi almen şeriti kullanılmıştır.

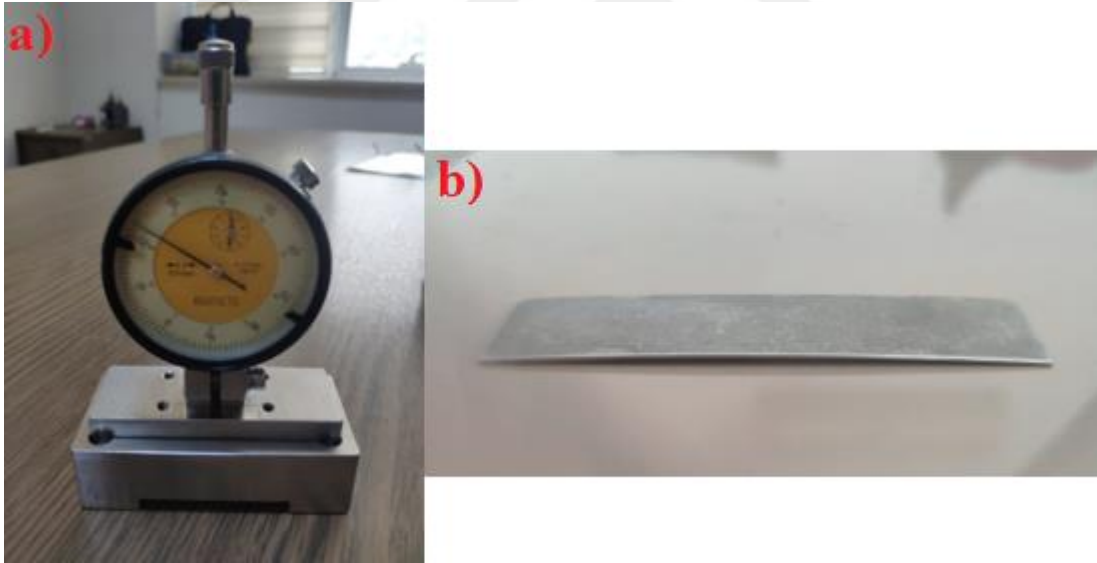


Şekil 7.20. N, A ve C tipi Almen testi için kullanılan şerit ölçüleri [72]

Şekil 7.21.a'da gösterilen aparata bağlanan N tipi şerit numuneye çalışmada kullanılan aynı standartlarda bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır.



Şekil 7.21. a) Almen şeriti dövme aparatı, b) Almen şiddeti ölçüm aparatı



Şekil 7.22. a) Almen şiddeti ölçümü, b) Bilyalı dövme uygulanmış şerit

Aynı standartlarda almen şeriti üzerine uygulanan bilyalı dövme işlemi sonucu numunedeki eğri yüksekliği Şekil 7.22'de görüldüğü gibi ölçülmüştür ve 0,22 mm olarak ölçülen eğri yükseklik değeri Tablo 7.5.'de verilen eğri yüksekliği-almen şiddeti dönüşüm tablosundan 8,8N bilyalı dövme yoğunluğuna karşılık gelmektedir.



Sonuç olarak bu çalışmada numuneler 0,22 mmN Almen şiddeti kullanılarak farklı çaptaki çelik bilyalar ile (0,3mm, 0,6mm ve 0,8mm) dövülmüştür.

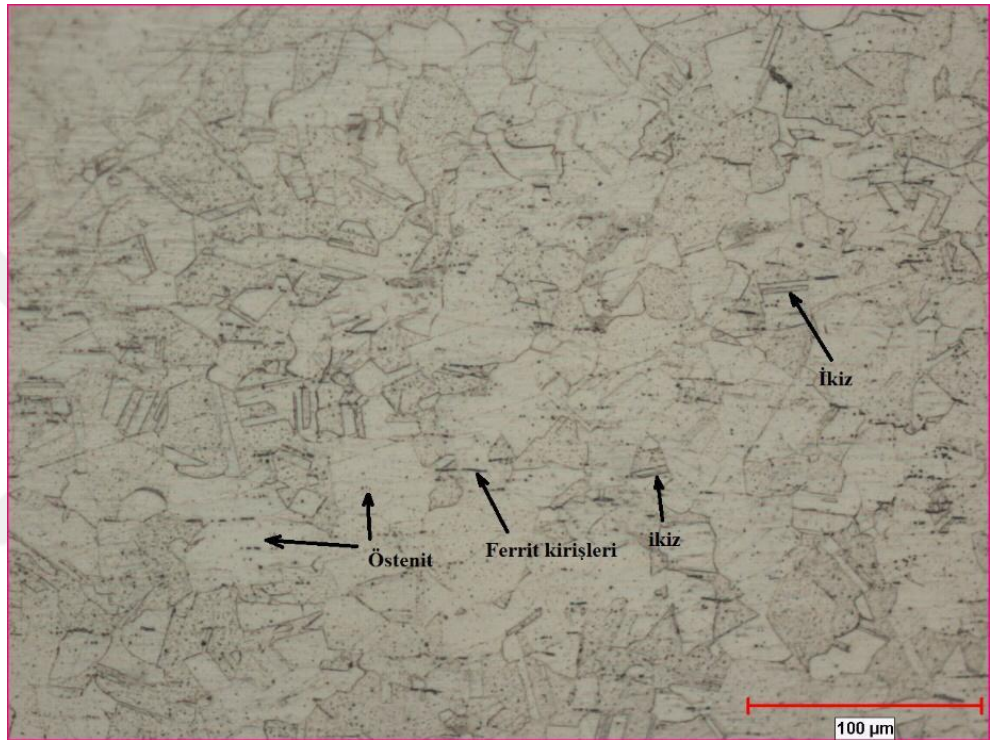
**Tablo 7.5.** Eğri yüksekliği-Almen yoğunluğu dönüşüm tablosu [73]

<b>Bilyalı Dövme Almen Yoğunluğu</b>	<b>Test Numunesi Tipi</b>	<b>Eğri Yüksekliği (mm)</b>
4N	N	0,1
6N		0,15
8N		0,2
16N		0,4
18N		0,45
6A	A	0,15
8A		0,2
10A		0,25
12A		0,3
14A		0,35
16A		0,4
7C	C	0,18
9C		0,23
11C		0,28
21C		0,53
23C		0,58

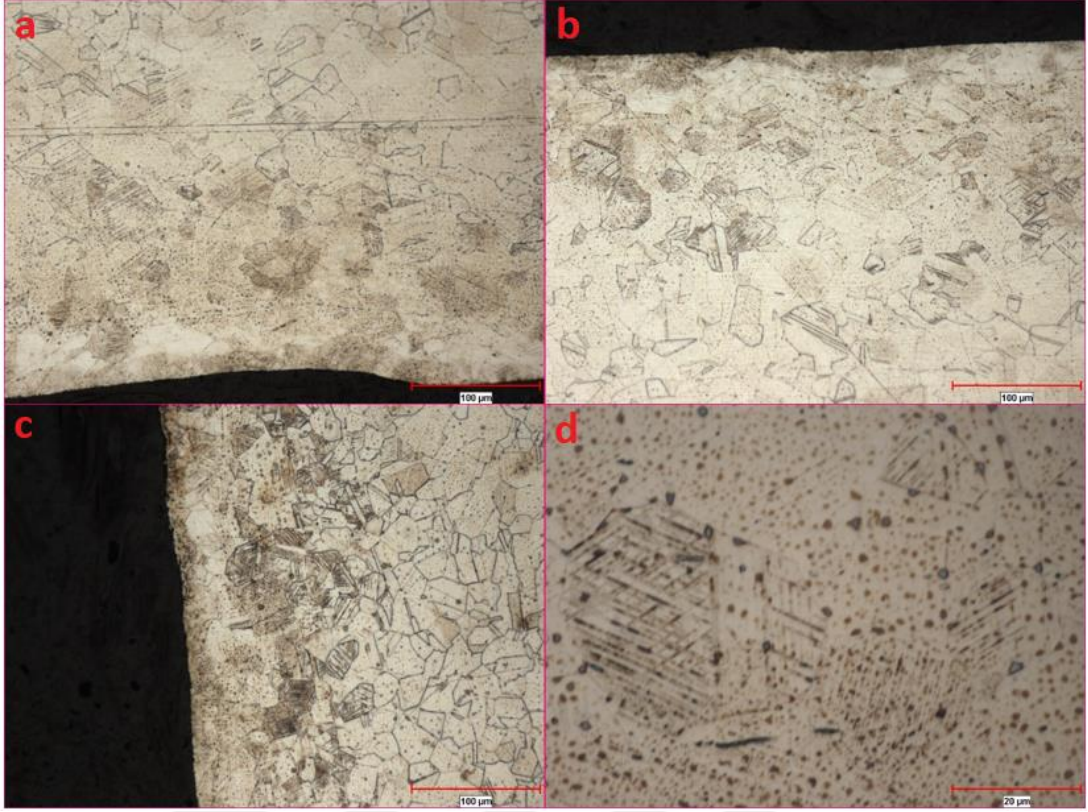
## 8. SONUÇLAR

### 8.1. Mikroyapı Görüntüleri

0,3 mm, 0,6 mm ve 0,8 mm çaplarına sahip bilyalar kullanılarak gerçekleştirilmiş olan tekli ve çoklu bilyalı dövme işlemleri sonrasında 304 kalite paslanmaz çelik numunelerine ait mikroyapı görüntüleri aşağıda gösterilmiştir. Numunelerde bilyalı dövme işlemi sırasında meydana gelen deformasyon etkileri ile numunelerin yüzey ve yüzeyaltı bölgelerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

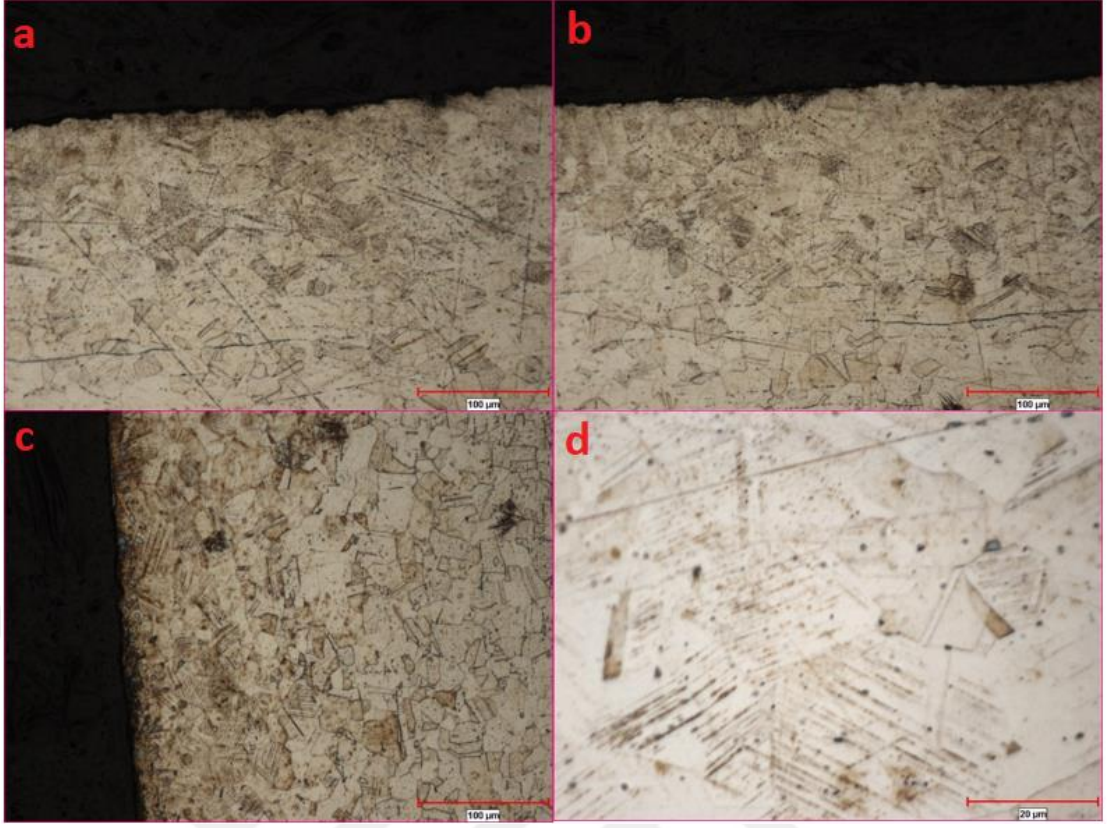


Şekil 8.1. Bilyalama işlemi uygulanmamış numunenin mikroyapı görüntüsü



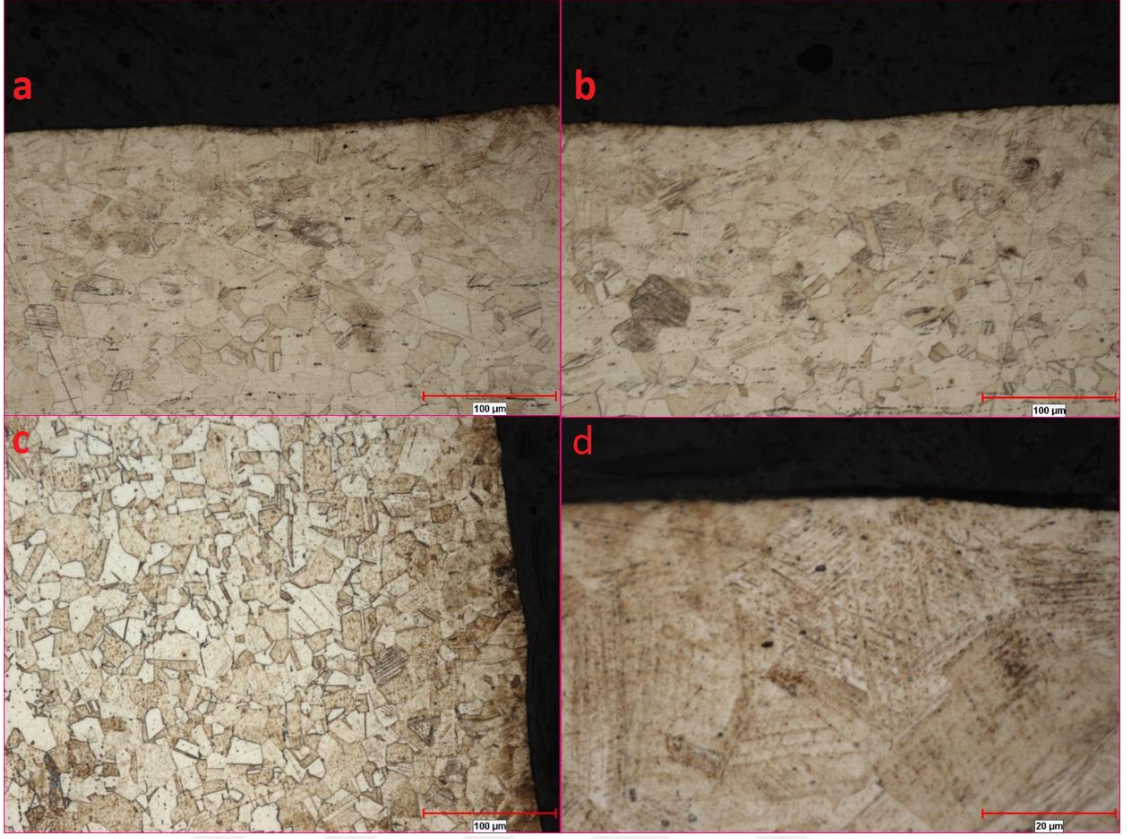
**Şekil 8.2.** 0,8 mm çapındaki bilya ile dövülmüş numuneye ait farklı bölgelerden elde edilen mikroyapılar (a, b, c) ve yüzeyaltı bölgeden büyük büyütmedeki mikroyapı görüntüsü(d)

Şekil 8.2.'de gösterilen 0,8 mm çapına sahip bilya ile dövülmüş numuneye ait mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, yüksek basınç ile malzeme yüzeyine fırlatılan bilyaların, yüzeyde plastik deformasyona sebep olduğu, dolayısıyla yüzey pürüzlülüğüne yol açtığı görülmektedir. Yüzey ve yüzeye yakın olan bölgeler, iç bölgeler ile kıyaslandığında, tane boyutunda küçülmeler olduğu açıkça seçilmektedir. Ayrıca, bilyalı dövme işlemi sırasında malzemenin mekanik bir çarpma etkisine maruz kalması ve yüzeye yakın bölgelerde, plastik deformasyonun kristal yapıda mekanik ikizleri meydana getirdiği görülmektedir.



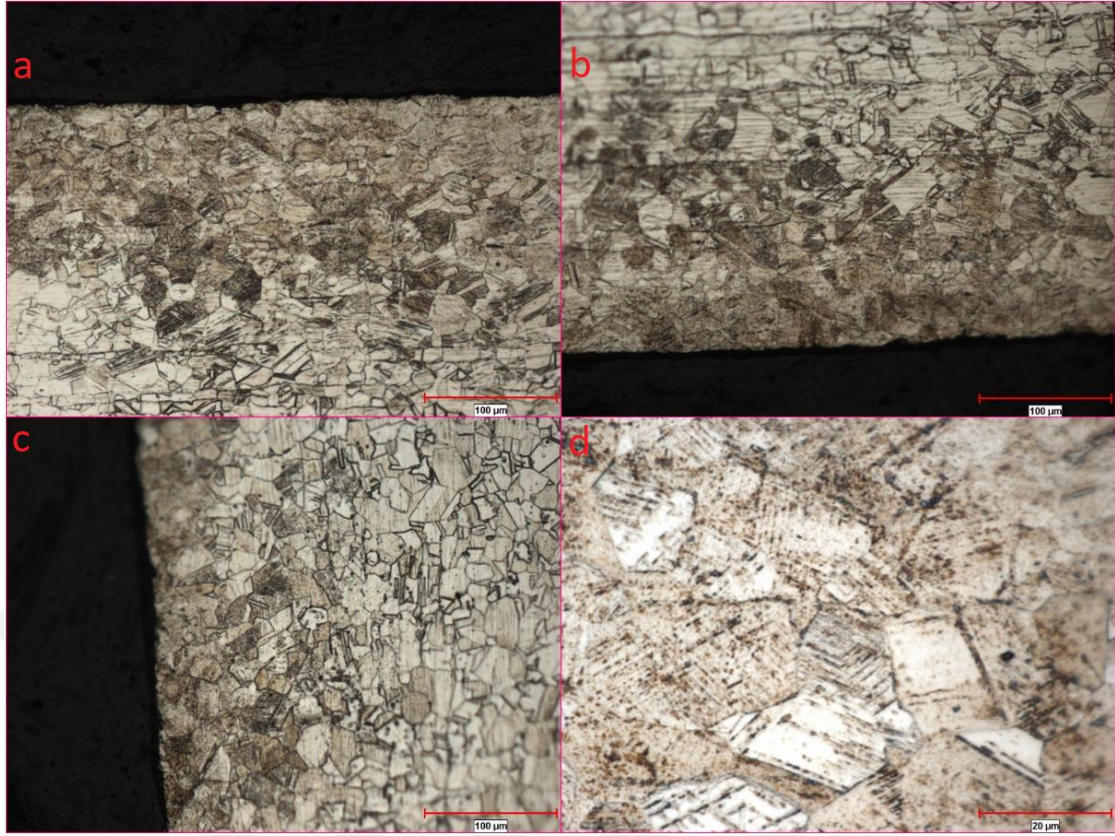
**Şekil 8.3.** 0,8 mm üzerine 0,3 mm çapındaki bilya ile dövülmüş numuneye ait farklı bölgelerden elde edilen mikroyapılar (a, b, c) ve yüzeyaltı bölgeden büyük büyütmedeki mikroyapı görüntüsü(d)

Şekil 8.3.'de 0,8 mm çapına sahip bilya ve ardından 0,3 mm çapına sahip bilyalar ile çoklu dövülmüş numuneye ait mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, malzeme yüzeyine fırlatılan bilyaların yüzeyde plastik deformasyona sebep olduğu görülmektedir.



**Şekil 8.4.** 0,8mm üzerine 0,6 mm çapındaki bilya ile dövülmüş numuneye ait farklı bölgelerinden 200x (a, b, c) ve 1000x (d) ölçek ile büyütülmüş mikroyapı görüntüsü

Şekil 8.4.'de 0,8 mm çapına sahip bilya ve ardından 0,6 mm çapına sahip bilya ile çoklu dövülmüş numuneye ait mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, malzeme yüzeyine fırlatılan bilyaların yüzeyde plastik deformasyona sebep olduğu görülmüştür. Yüzey ve yüzeye yakın olan bölgelerde, iç bölgelere kıyasla tane boyutunda küçülmeler olduğu görülmektedir. Ayrıca, burada da mekanik ikiz oluşumları söz konusu olmuştur. İkizlenmelerin numunenin yüzeye yakın bölgelerde başladığı ve yüzeyde yoğunlaştığı görülmektedir. Özellikle yüzeyin hemen altındaki bölgede, farklı yönlerde oluşmuş ikizlerin kesiştiği dikkati çekmiştir (Şekil 8.4d). Faz analizi sonuçları XRD bölümünde verilmiştir. Öte yandan ikiz lamel kalınlığında nispeten bir inceleme gözlemlenmiştir [59,60].



**Şekil 8.5.** Sırasıyla 0,8mm, üzerine 0,6 mm ve üzerine 0,3mm çapındaki bilya ile dövülmüş numuneye ait farklı bölgelerinden 200x (a, b, c) ve 1000x (d) ölçek ile büyütülmüş mikroyapı görüntüsü

Şekil 8.5.'de verilen sırasıyla 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm çaplara sahip bilyalar ile dövülmüş numuneye ait mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, malzeme yüzeyine fırlatılan bilyaların yüzeyde plastik deformasyona sebep olmuştur. Yüzey ve yüzeye yakın olan bölgelerde tane boyutunda küçülmeler olduğu ve bu küçülmelerin diğer parametrelere kıyasla çok daha yoğun ve belirgin olduğu açıkça seçilmektedir. İkizlenmelerin numunenin yüzeye yakın bölgelerde başladığı ve yüzeyde özellikle yoğunlaştığı görülmektedir. Deformasyon ikizlenmesi, tane inceltme işlemi sırasında küçük bir rol oynadığı bilinmektedir [61]. Ancak bu parametrede yüzeyde ciddi bir plastik deformasyon etkisi ile deformasyon ikizlerinin yanında tane inceltme mekanizması da etkin olarak karşımıza çıkmıştır. Öte yandan yoğun deformasyon ikizleri mikroyapıda gözlemlenmiştir (Şekil 8.5d). Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde yüzeyden merkeze doğru 150 µm uzaklığa kadar tane inceltmeleri ve ikizlenme oluşumları gözlemlenmektedir. 304 paslanmaz çelik numunenin tamamında üretilen gerinim tekdüze olmadığından yani bir gradyan dağılımı

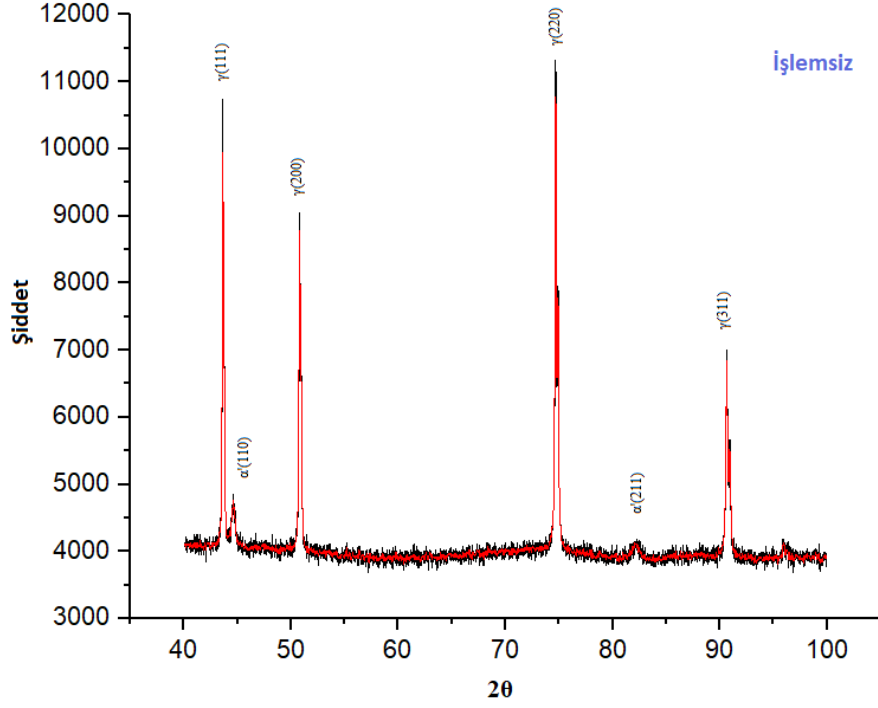
sunduğundan, yüzeyin altındaki çeşitli derinliklerdeki mikroyapısal incelemeler deformasyon mekanizmasını yansıtmak açısından faydalıdır.

Numunenin orta bölümünde, hafif deforme olmuş daha küçük boyutlu taneler söz konusudur. Dislokasyon aktiviteleri, YMK yapıları malzemeler için düşük gerilmelerde birincil deformasyon süreci olmaktadır [61]. Düşük açılı tane sınırları genellikle, en üst yüzey katmanından yayılan daha düşük bir gerilme oranına atfedilen dislokasyonlar ve alt tane sınırları gibi kusurlardan oluşur. Alt tanelerin oluşumu XRD-FWHM değerlendirmesi bölümünde detaylı olarak araştırılmıştır (Bölüm 8.2.). En şiddetli plastik deformasyonun olduğu bu parametrede, en üst yüzeyaltı bölgede yoğun meydana gelen ikiz oluşumlarının yanında, bu katmandan aşağı doğru yayılan daha düşük bir gerilme oranına atfedilen dislokasyonlar ve alt tane sınırları gibi kusurların oluşumu söz konusudur. Şekil 8.5(d)' de ikiz kesişimleri dislokasyon hareketini daha da karmaşık ve daha zor hale getirecektir [62].

Mikroyapısal incelemeler değerlendirildiğinde, deformasyona bağlı mikroyapısal inceleme özelliklerinin kendini mekanik ikizlenme olarak gösterdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca temel olarak plastik olarak deforme olmuş bölgede çok yönlü mekanik ikizlerin de varlığına rastlanmıştır. Mekanik ikizlerin farklı yönlerde oluşması ve kesişme noktalarının görülmesi numunenin yüzeyin hemen altındaki tabakasında ciddi bir plastik deformasyon meydana geldiğini gösterir.

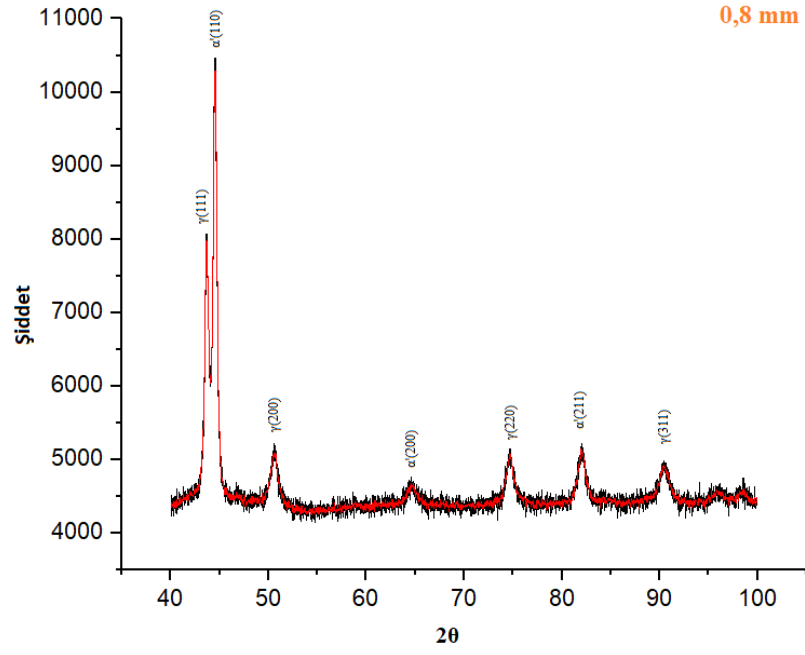
## 8.2. XRD Görüntü Sonuçları

Bu çalışmada, Şekil 8.6., 8.7., 8.8., 8.9. ve 8.9.'de gösterilen  $\gamma(111)$ ,  $\alpha'(110)$ ,  $\gamma(200)$ ,  $\alpha'(200)$ ,  $\gamma(220)$ ,  $\alpha'(211)$  ve  $\gamma(311)$  X-ışını difraksiyon pikleri incelenmiştir.

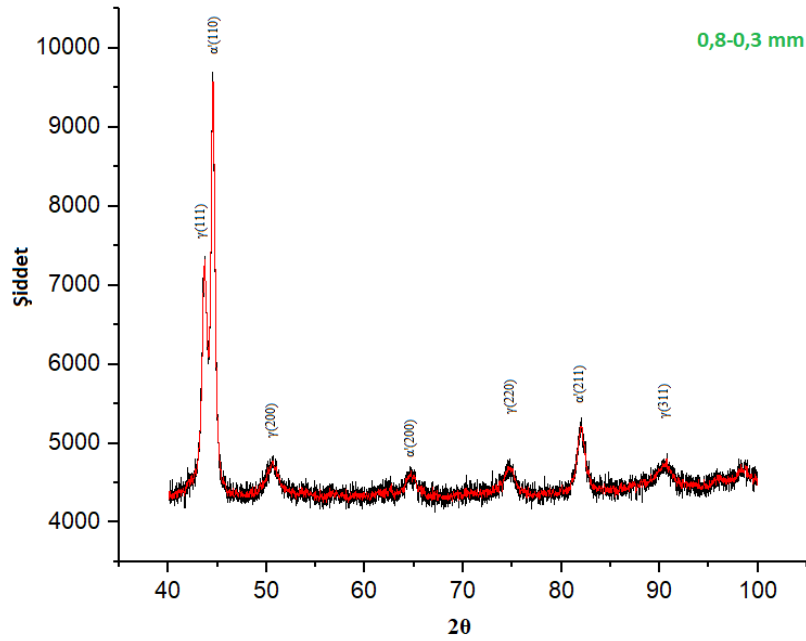


Şekil 8.6. Bilyalı dövülmemiş numunenin XRD paterni

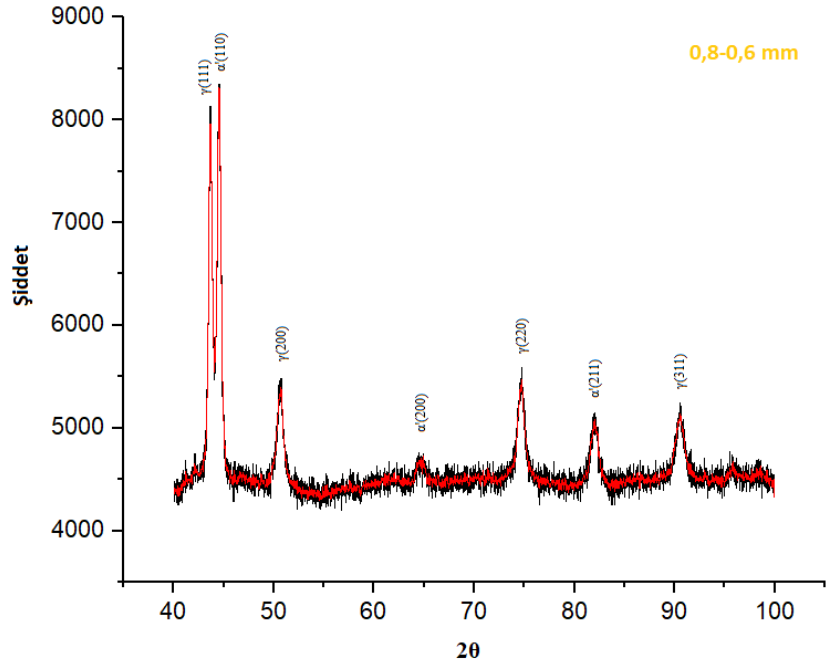




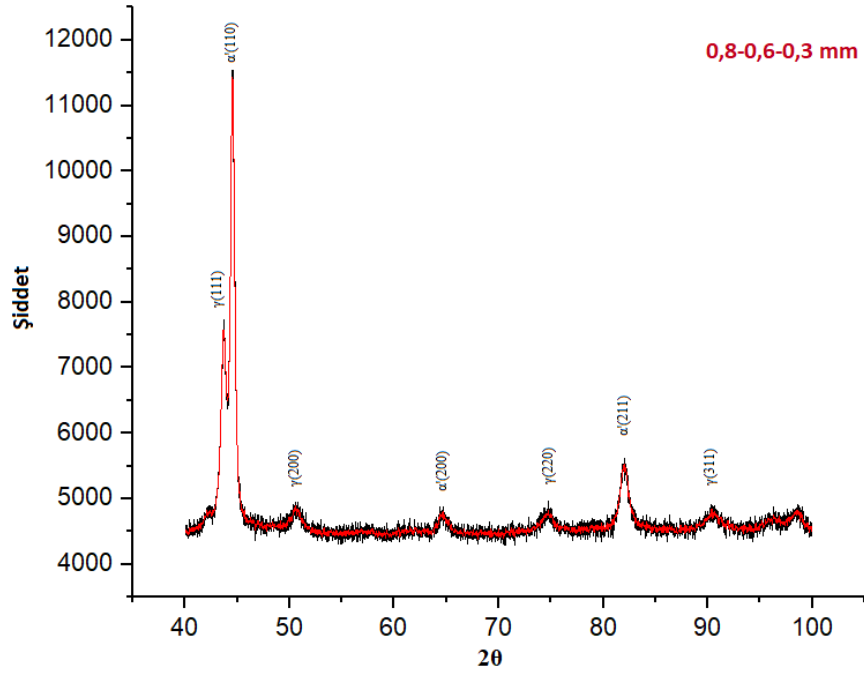
Şekil 8.7. 0,8 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numunenin XRD paterni



Şekil 8.8. 0,8 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numunenin XRD paterni



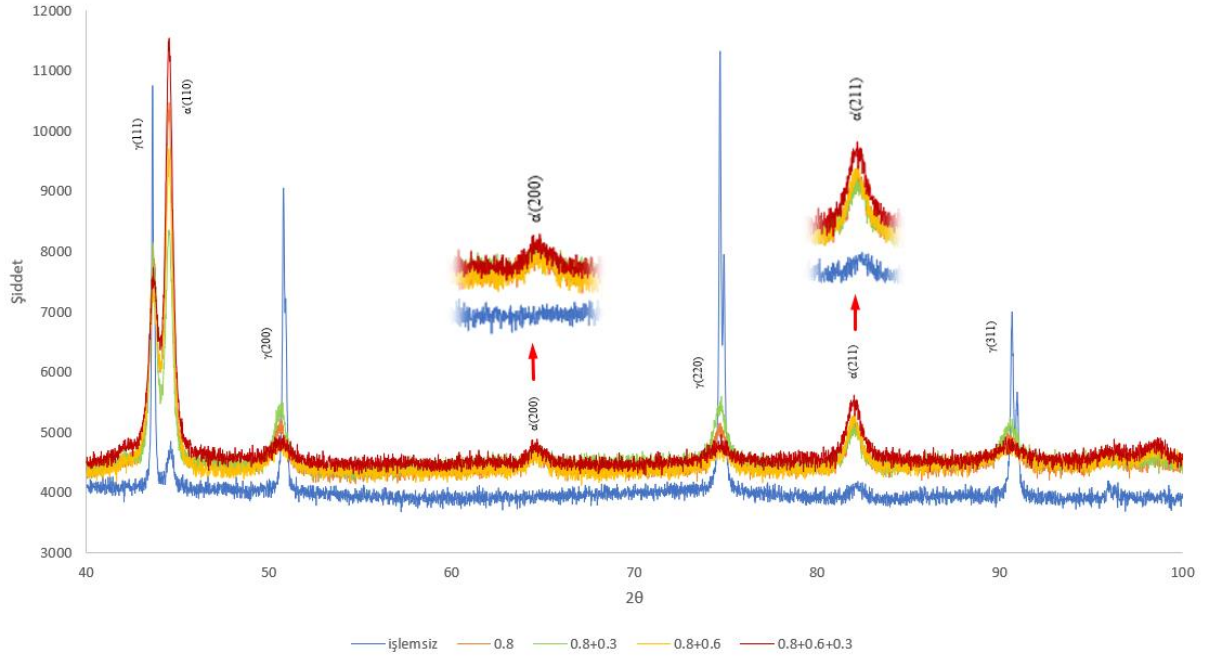
Şekil 8.9. 0,8 mm ve 0,6 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numunenin XRD paterni



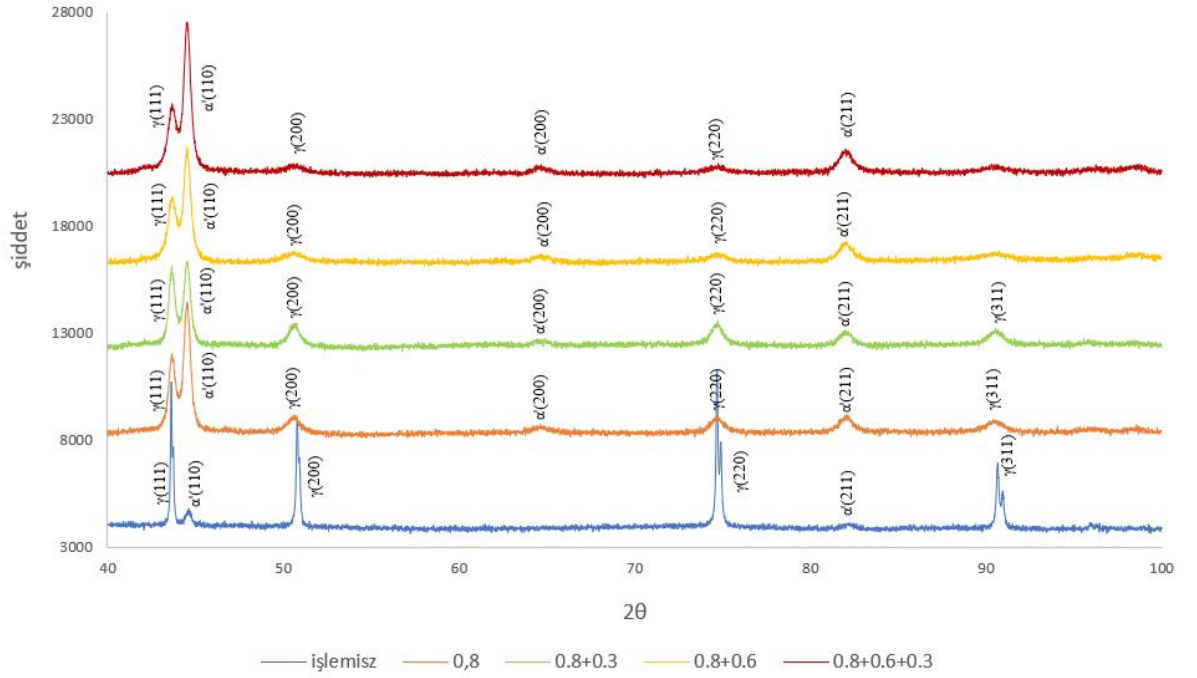
Şekil 8.10. 0,8 mm, 0,3 mm ve 0,6 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numunenin XRD paterni

Şekil 8.11. ve 8.12.'de ise tüm XRD grafikleri karşılaştırmalı olarak tek bir grafik ekseninde sunulmuştur. Bir arada verilen grafikleri incelediğimizde bilyalı dövme işlemi uygulanmamış numunede daha önce var olan  $\alpha'(110)$  ve  $\alpha'(211)$  piklerinde ani artış ve XRD paterninde bulunmayan  $\alpha'(200)$  piki incelendiğinde bilyalı dövme sonucunda deformasyon etkisi ile gelişen gerinim-kaynaklı martenzit oluşumu görülmüştür. Yani bilyalı dövme sonrası malzeme hem  $\gamma$ -östenit hem de  $\alpha'$ -martenzit piklerine sahiptir ve yüzey tabakasında açıkça bir martenzit dönüşüm meydana gelmiştir. Gerinim-kaynaklı martenzit, 304 paslanmaz çelikte yüzeye yakın plastik deformasyonun bir sonucu olarak ortaya çıkar.  $\alpha'$ -martenzit oluşumu yüksek deformasyon oranları ile artmıştır [63]. Staudhammer ve ark. [59] martenzit oluşumu için kesme bantlarının kesişiminin tercih edilen yerler olduğunu açıklamıştır. Böylece, daha yüksek kesme bandı kesişimi, gerinim kaynaklı martenzit oluşum olasılığını arttırmıştır. Düşük istif hatası enerjisine sahip paslanmaz çeliklerde, yüksek gerinim hızı deformasyonu daha fazla kesme bandı kesişmesine yol açar ve bu da daha fazla gerinim kaynaklı martenzite neden olur [60]. Bu sonuçlar çok yönlü deformasyon bantları içeren mikroyapılar ile uyumludur. Bilyalı dövme sırasında, kayma düzlemindeki kayma yönü boyunca kesme gerilimi kritik bir değere (yani en yüksek Schmidt faktörüne) ulaştığında bir kayma meydana gelir. Bu kesme, kristalin birçok yerinde yüksek dislokasyon yoğunluğu, istif hatası ve yüksek plastik gerinim konsantrasyonu olan sahalar oluşturur. Yüksek dislokasyon yoğunluğuna, yüksek istif hatalarına ve yüksek ikiz lamellerine sahip şiddetli plastik gerinim alanları, gerinim kaynaklı martenzit çekirdeklenmesi ve büyümesi için oldukça uygundur [64].

Şekil 8.12.'i incelediğimizde deformasyonun etkisiyle  $\gamma(111)$ ,  $\gamma(200)$ ,  $\gamma(220)$ , ve  $\gamma(311)$  piklerinde artış olduğu görülmüştür.

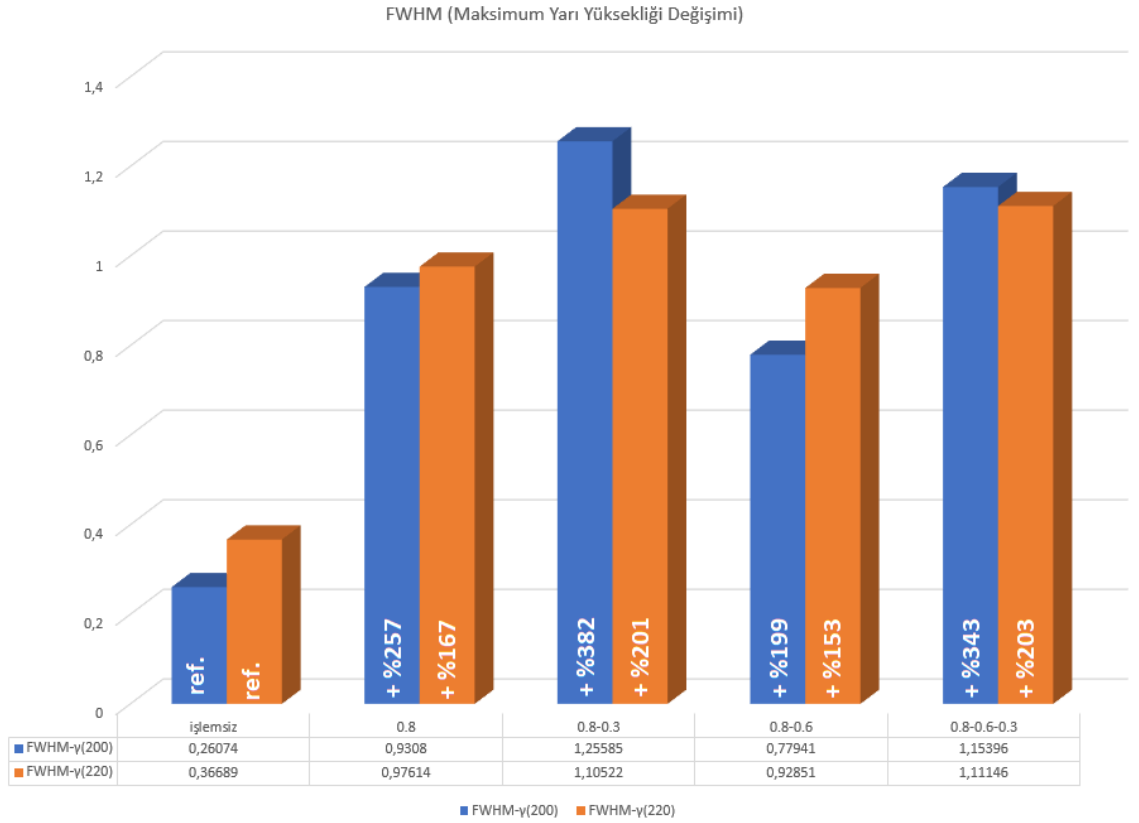


Şekil 8.11. XRD paternleri



Şekil 8.12. XRD paternlerinin kıyaslaması

304 kalite paslanmaz çelik plakaya uygulanan bilyalı dövme işlemiyle numuneler deformasyona maruz kaldığı için kristallerin boyutları ve gerinim oranları değişmektedir. Gelişen ultra ince tanelerin değerlendirmeleri pikler üzerinden FWHM analizi ile yapılmıştır. Öte yandan bilyalı dövme işleminin malzemelerde basma kalıntı gerilmeleri de indüklendiği bilinmektedir [65]. Malzemede gelişen basma kalıntı gerilmeler de bu pikler üzerinde etkilidir. Piklere bakıldığında bir genişleme olduğu göze çarpmaktadır ve bunun sonucunda tüm numunelerin FWHM değerleri artmıştır. Bu çalışmamızda  $\gamma(200)$  ve  $\gamma(220)$  pikleri üzerindeki FWHM değişimlerini incelediğimiz 4 farklı gruptan oluşmuş bilyalanmış numunelerin değerleri ve % değişimleri Şekil 8.13.'de verilmiştir. Daha yüksek pik genişlemesi, basma tipi yüzey kalıntı gerilmelerinin gelişmesine karşılık geldiği bilinir ancak bu tez kapsamında kalıntı gerilme araştırması yapılmamıştır.



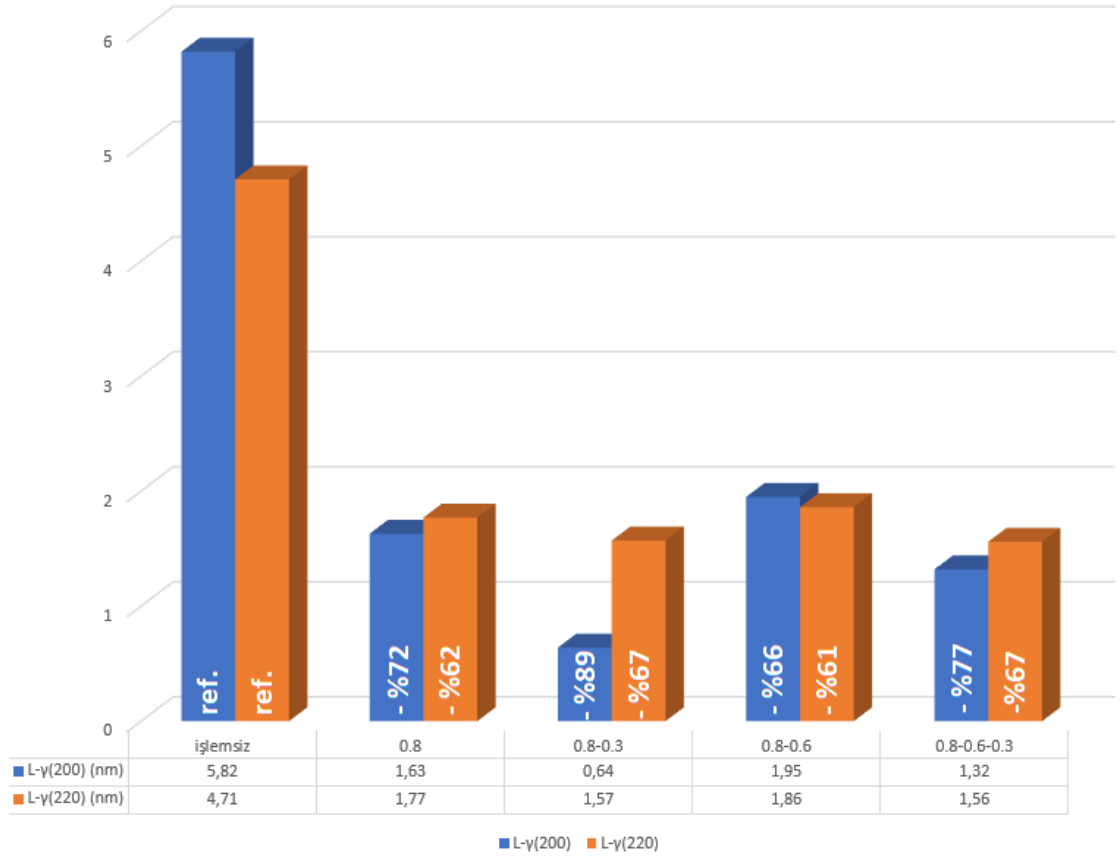
**Şekil 8.13.** FWHM (maksimum yarı yüksekliği) değişim değerleri

- $\gamma(200)$  piki üzerinde gerçekleşen en yüksek %382 ve %343 artış oranları ile sırasıyla 0,8-0,3 mm ve 0,8-0,6-0,3 çaplı bilyalar ile bilyalanmış numunelerde gerçekleşmiştir.

- $\gamma(200)$  piki üzerinde gerçekleşen en düşük artış ise %199 ile 0,8-0,6 mm çaplı bilyalar ile bilyalanmış numunelerde gerçekleşmiştir.
- $\gamma(220)$  piki üzerinde gerçekleşen en yüksek birbirine yakın değerlerde çıkan %203 ve %201'lik artışlarla sırası ile 0,8-0,6-0,3 mm ve 0,8-0,3 mm çaplı bilyalar ile bilyalanmış numunelerde gerçekleşmiştir.
- $\gamma(220)$  piki üzerinde gerçekleşen en düşük artış ise %199 ile 0,8-0,6 mm çaplı bilyalar ile bilyalanmış numunelerde gerçekleşmiştir.

Bilyalı dövme işlemi sonucunda 304 kalite paslanmaz çelik plaka üzerinde gerçekleşen kristalit boyutu değişimi Şekil 8.14. üzerinde gösterilmiştir. XRD grafikleri üzerinden  $\gamma(200)$  ve  $\gamma(220)$  pik genişlikleri hesaplanarak elde ettiğimiz kristalit boyutu değerlerine baktığımızda tüm numunelerde azalma meydana gelmiştir.

Kristalit Boyutu (L) Değişim Grafiği

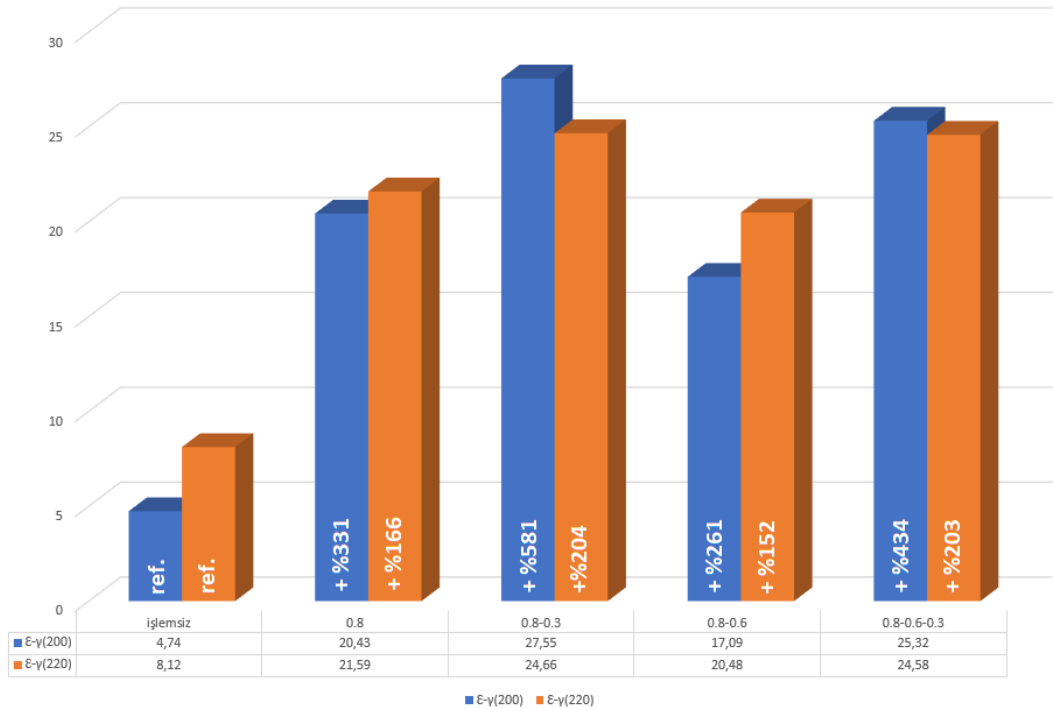


Şekil 8.14. Kristalit boyutu değişim değerleri

- $\gamma(200)$  piki üzerinde kristalit boyutunda gerçekleşen en yüksek %89'luk azalış ile 0,8-0,3 mm çaplı bilyalar ile bilyalanmış numunelerde gerçekleşmiştir. Numunenin kristalit boyutu 5,82 nm'den 0,64 nm'ye düşmüştür.
- $\gamma(200)$  piki üzerinde kristalit boyutunda gerçekleşen en düşük %66'luk azalış ile 0,8-0,6 mm çaplı bilyalar ile bilyalanmış numunelerde gerçekleşmiştir. Numunenin kristalit boyutu 5,82 nm'den 1,95 nm'ye düşmüştür.
- $\gamma(220)$  piki üzerinde kristalit boyutundaki değişimleri %61-67 arasındaki azalışlarla birbirlerine yakın değerlerde olmuştur. En düşük kristalit boyutu 1,56 nm iŝe 0,8-0,6-0,3 çaplı bilya ile bilyalanan numunede ölçülmüştür.

Bilyalı dövme işleminin sonucunda 304 kalite paslanmaz çelik plaka üzerinde gerçekleşen latis mikro gerinim değerlerindeki değişimi Şekil 8.15. üzerinde verilmiştir. Xrd grafikleri üzerinden  $\gamma(200)$  ve  $\gamma(220)$  pik genişlikleri hesaplanarak elde ettiğimiz latis mikro gerinimlerine baktığımızda tüm numunelerde artış meydana gelmiştir.

Latis Mikro Gerinim Değişim Grafiği



Şekil 8.15. Latis mikro gerinim değişim değerleri

- $\gamma(200)$  piki üzerinde görülen en yüksek artış %581 ile 0,8-0,3 mm çaplı bilyalar ile bilyalanmış numune üzerinde görülmüştür.
- $\gamma(200)$  piki üzerinde görülen en düşük artış %261 ile 0,8-0,6 mm çaplı bilyalar ile bilyalanmış numune üzerinde görülmüştür.
- $\gamma(220)$  piki üzerinde görülen en yüksek artış sırası ile %204 ve %203'lük artışlar ile 0,8-0,3 mm ve 0,8-0,6-0,3 mm çaplı bilyalar ile bilyalanmış numune üzerinde görülmüştür.
- $\gamma(220)$  piki üzerinde görülen en düşük artış %152 ile 0,8-0,6 mm çaplı bilyalar ile bilyalanmış numune üzerinde görülmüştür.

Bu çalışmada çoklu bilyalı dövme işlemi sonrası kristalit boyutunun önemli ölçüde azalma olduğu ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda bilyalı dövme sonrasında XRD piklerindeki asimetri kendini daha çok genişleme şeklinde göstermiştir. Bu da gerinim sertleşmesi yoluyla yüksek deformasyon yoğunluğuna ve yüzeye yakın bölgelerde etkili tane incelmeye bağlanmaktadır [66,67]. Literatüre göre XRD piklerinin maksimum yarı yüksekliği (FWHM) değerlerinin artışı ile malzemenin sertlik değerlerinde artış arasında ilişki görülmüştür [69]. Elde edilen sonuçlar literatürle uyumludur.

### 8.3. Yüzey Pürüzlülük Sonuçları

304 kalite östenitik paslanmaz çelik numune yüzeyine 0,8 mm, 0,6 mm, ve 0,3 mm çaplarındaki bilyaların farklı kombinasyonlar ile bilyalı dövme işlemi uygulanması sonucu oluşan pürüzlülük değerleri Tablo 8.1., Tablo 8.2., Tablo 8.3., Tablo 8.4. ve Tablo 8.5.'de verilmiştir.

**Tablo 8.1.** Bilyalı dövülmemiş numune yüzeyindeki pürüzlülük değerleri

	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	ORT
<b>Ra</b>	0.408 $\mu\text{m}$	0.474 $\mu\text{m}$	0.450 $\mu\text{m}$	0.435 $\mu\text{m}$	0.356 $\mu\text{m}$	0.425 $\mu\text{m}$
<b>Rq</b>	0.522 $\mu\text{m}$	0.602 $\mu\text{m}$	0.577 $\mu\text{m}$	0.553 $\mu\text{m}$	0.445 $\mu\text{m}$	0.54 $\mu\text{m}$
<b>Rz</b>	3.078 $\mu\text{m}$	3.839 $\mu\text{m}$	3.700 $\mu\text{m}$	3.437 $\mu\text{m}$	2.757 $\mu\text{m}$	3.363 $\mu\text{m}$

**Tablo 8.2.** 0,8 mm çapında bilyalar ile dövülmüş numune yüzeydeki pürüzlülük değerleri

	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	ORT
<b>Ra</b>	1.855 $\mu\text{m}$	1.812 $\mu\text{m}$	1.999 $\mu\text{m}$	1.801 $\mu\text{m}$	1.735 $\mu\text{m}$	1.84 $\mu\text{m}$
<b>Rq</b>	2.366 $\mu\text{m}$	2.203 $\mu\text{m}$	2.356 $\mu\text{m}$	2.266 $\mu\text{m}$	2.067 $\mu\text{m}$	2.252 $\mu\text{m}$
<b>Rz</b>	10.817 $\mu\text{m}$	10.029 $\mu\text{m}$	9.802 $\mu\text{m}$	10.014 $\mu\text{m}$	8.959 $\mu\text{m}$	9.925 $\mu\text{m}$



**Tablo 8.3.** 0,8 mm ve 0,3 mm çapında bilyalar ile dövülmüş numune yüzeyindeki pürüzlülük değerleri

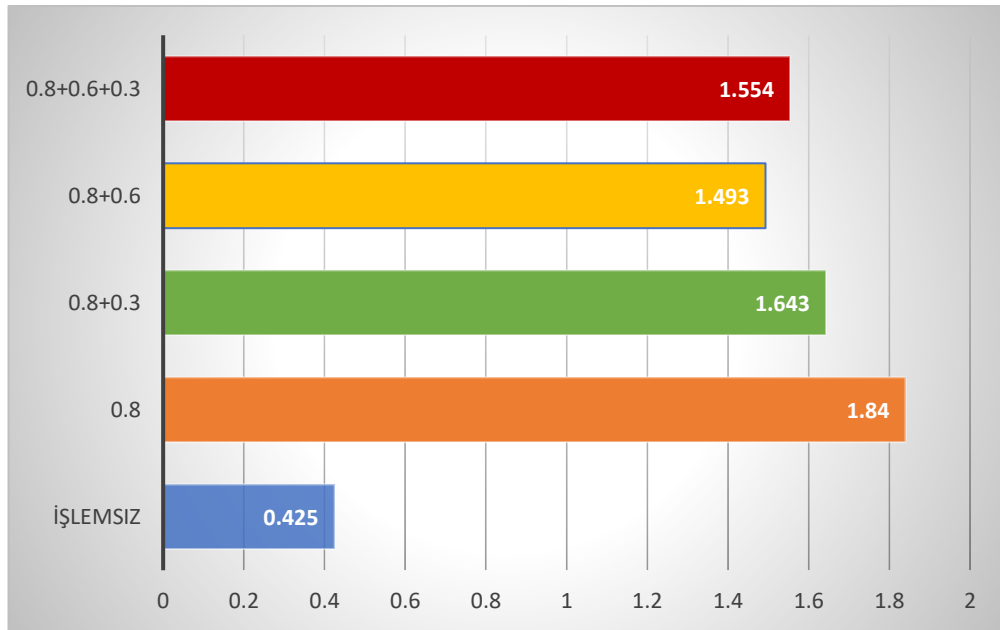
	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	ORT
Ra	1.495 µm	1.548 µm	1.966 µm	1.325 µm	1.877 µm	1.643 µm
Rq	1.870 µm	1.969 µm	2.443 µm	1.642 µm	2.302 µm	2.046 µm
Rz	10.303 µm	9.811 µm	12.399 µm	8.727 µm	11.621 µm	10.573 µm

**Tablo 8.4.** 0,8 mm ve 0,6 mm çapında bilyalar ile dövülmüş numune yüzeyindeki pürüzlülük değerleri

	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	ORT
Ra	1.504 µm	1.457 µm	1.436 µm	1.574 µm	1.492 µm	1.493 µm
Rq	1.859 µm	1.802 µm	1.689 µm	1.903 µm	1.801 µm	1.811 µm
Rz	9.163 µm	8.740 µm	7.348 µm	8.776 µm	8.215 µm	8.449 µm

**Tablo 8.5.** 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm çapında bilyalar ile dövülmüş numune yüzeydeki pürüzlülük değerleri

	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	ORT
Ra	1.596 µm	1.607 µm	1.494 µm	1.613 µm	1.459 µm	1.554 µm
Rq	1.999 µm	1.950 µm	1.845 µm	1.990 µm	1.777 µm	1.913 µm
Rz	11.154 µm	9.244 µm	9.848 µm	10.701 µm	9.276 µm	10.045 µm



**Şekil 8.16.** Ortalama pürüzlülük grafiği

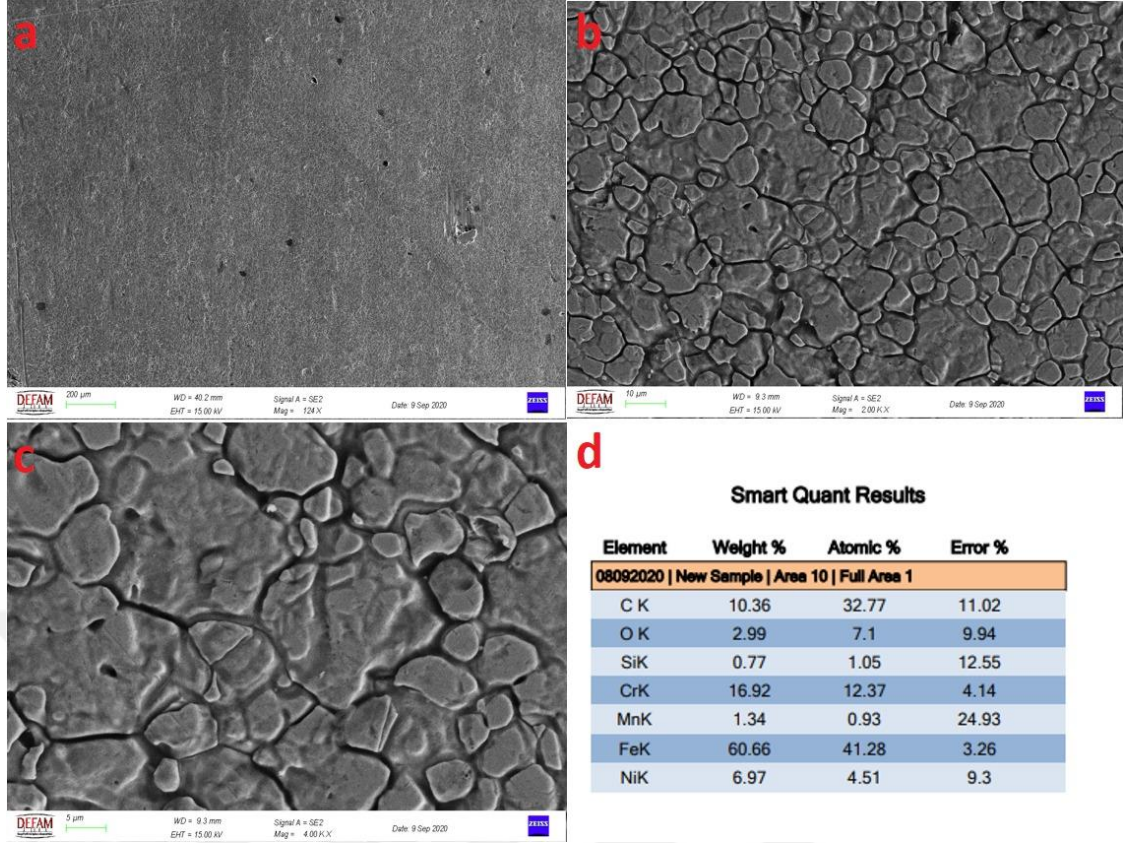
Bilyalı dövülmüş numuneler ve bilyalı dövülmemiş numuneye ait pürüzlülük değerleri Şekil 8.16.'de gösterilmiştir. Elde edilen bu veriler incelendiğinde ilk göze çarpan bilyalama işleminin yüzeyde homojen bir etki oluşturmasıdır. Yapılan ölçümlerde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bilyalama işlemi uygulanmamış numunenin Ra pürüzlülük değeri ortalama 0,425  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada en yüksek Ra pürüzlülük değeri 0,8 mm çapında bilya ile dövülen numunelerde ortalama 1,84  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Bilyalı dövülmüş numunelerde en düşük Ra değeri, 0,8 mm üzerine 0,6 mm çapında bilya ile çoklu dövülen numunelerde ortalama 1,493  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm çaplarındaki bilyalar ile sırasıyla 3 kez çoklu bilyalanan yüzeyin Ra pürüzlülük değeri 1,554  $\mu\text{m}$ 'dir. 0,8 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar kullanılarak çoklu dövülmüş yüzeyin Ra pürüzlülük değeri ise 1,643  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Alınan sonuçlara göre:

- Yüzey pürüzlülüğü mekanik yüzey işleminden etkilenmiştir. Bilyalı dövme yüzey pürüzlülüğünün artışında kritik bir rol oynamaktadır.
- Malzemeye yapılan ikinci bilyalama işlemleri sonrası Ra pürüzlülük değerlerinde kısmen düşüş görülmüştür.
- 0,8mm ve 0,6 mm'lik çoklu dövme işleminden sonra en iyi yüzey kalitesinin elde edildiği açıktır.

Son bilyalı dövme işlemi olarak 0,3 mm'lik bilyalarla atış yapılmasının daha iyi yüzey oluşturması beklenirken hem ikili hem üçlü bilyalı dövme sonrası bu bilyanın etkisiyle yüzey durumu kötüleşmiştir. Bu sonucu bölüm 8.4.' de verilen yüzey SEM görüntüleri desteklemektedir. Aynı püskürtme basıncında küçük çaplı 0,3 mm' lik bilyalar, yüzeyde Hertz Basıncı etkisi oluşturmaktadır [70]. Bu gerilmenin etkisinde, önceden dövülmüş ve sertleşmiş yüzeylerde 0,3 mm'lik atış sonrası yüzeyde pürüzlülüğü arttıran parçalanmış partiküller oluşmaktadır. Bu sonuç bölüm 8.4.' da daha detaylı olarak tartışılmıştır.

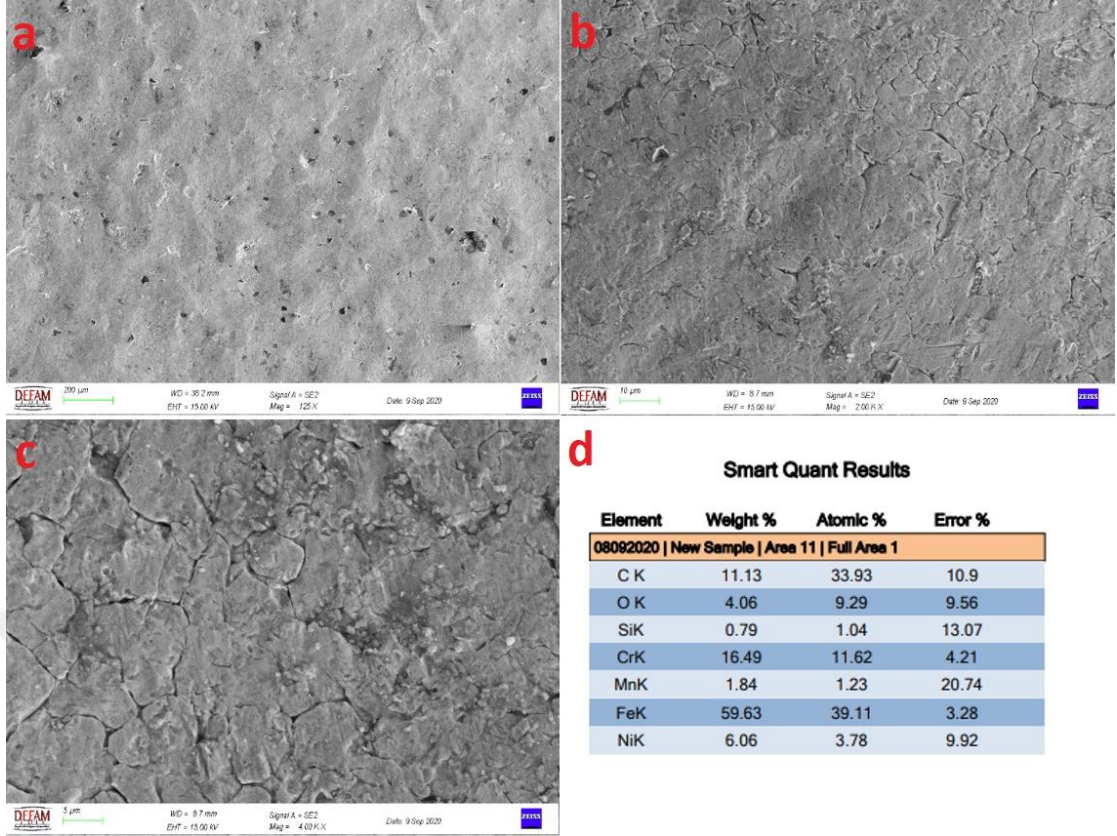
#### **8.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri**

Tekli ve çoklu bilyalama işlemleri sonrası 304 paslanmaz çelik numunelerine ait yüzeyden SEM görüntüleri ve EDX analizleri aşağıda verilmiştir. Numunelerde bilyalı dövme işlemi sırasında yüzey morfolojilerinde meydana gelen değişimler ve deformasyon etkileri incelenmiştir.



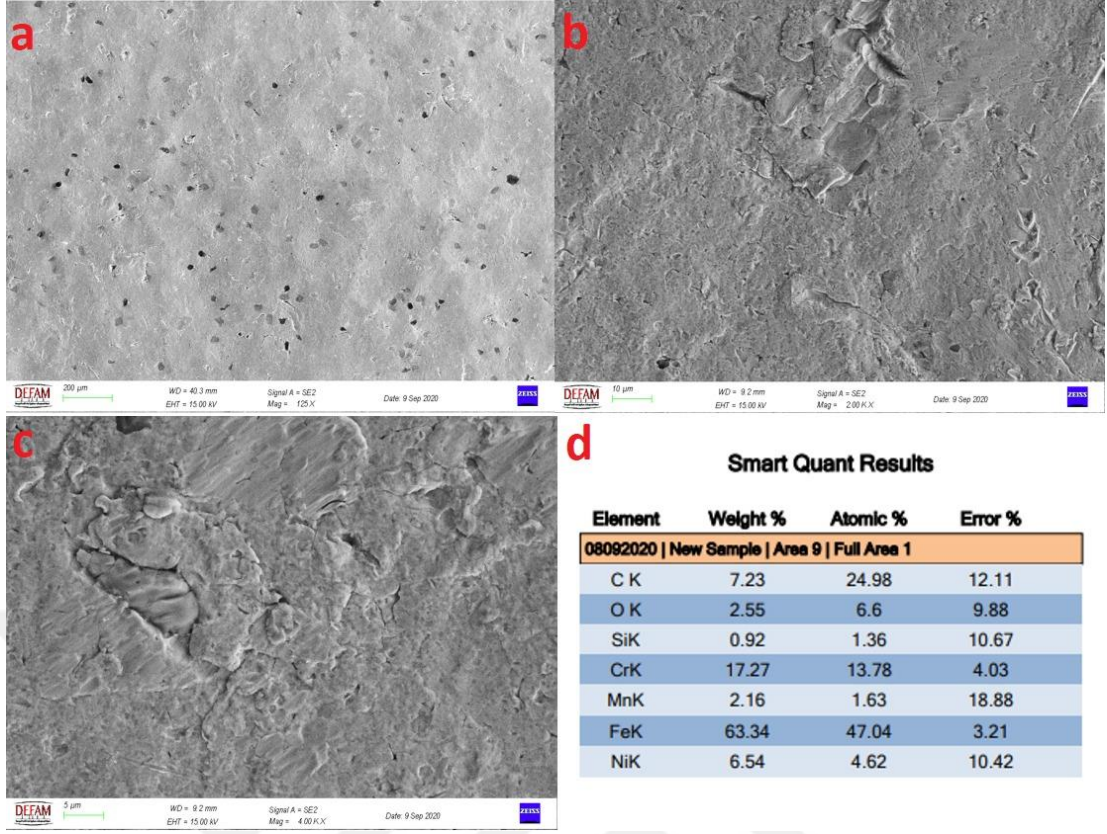
**Şekil 8.17.** Bilyalı dövülmemiş numuneye ait farklı büyütmelerdeki yüzey SEM fotoğrafları (a), (b), (c) ve EDX sonuçları (d)

Bilyalı dövülmemiş numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 8.17.) haddeleme ile üretilmiş olan sac metalin yüzeyinin düzgün olduğu ancak metalin taneli yapısını gösterdiği görülmektedir.



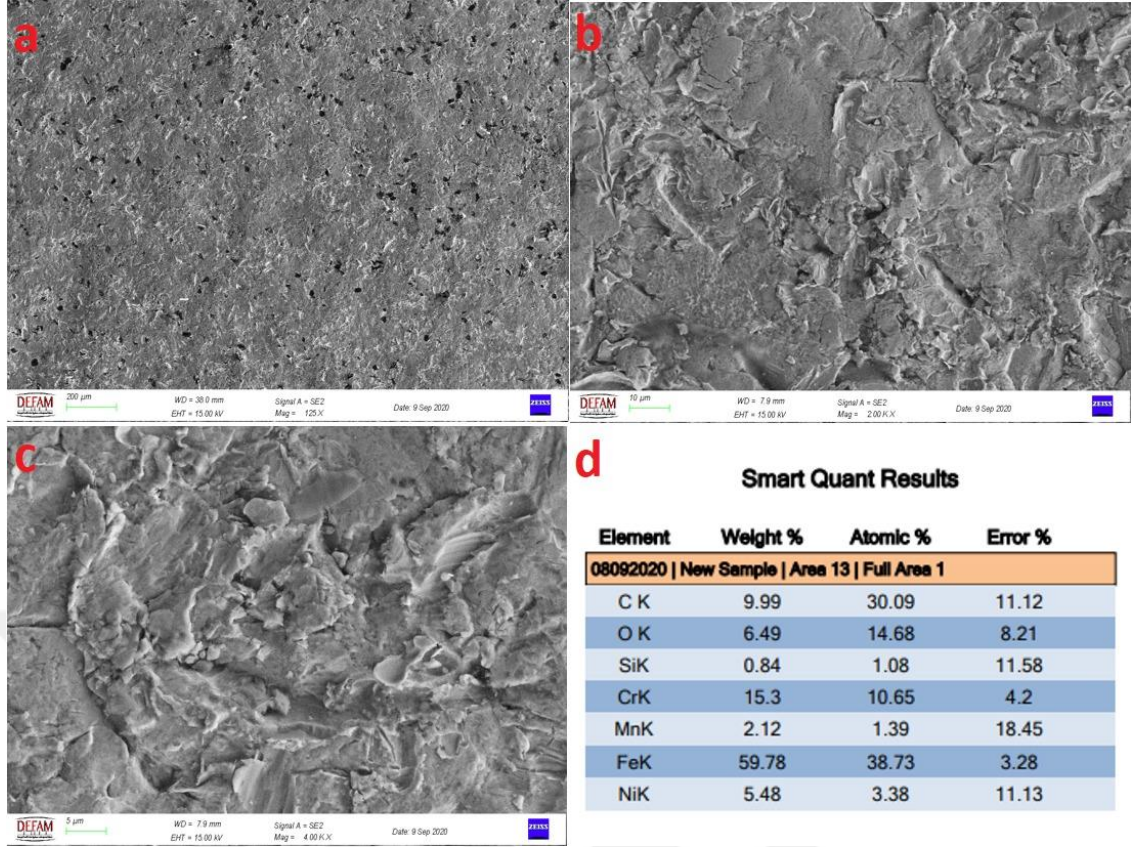
**Şekil 8.18.** 0,8 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numuneye ait farklı büyütmelelerdeki yüzey SEM fotoğrafları (a),(b),(c) ve EDX sonuçları (d)

0,8 mm çapına sahip çelik bilyalar ile dövülmüş numuneye ait farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri ile EDX sonucu verilmiştir (Şekil 8.18.). SEM görüntüleri incelendiğinde yüksek hava basıncı ile numune yüzeyine püskürtülen bilyaların plastik deformasyon yaratarak, yüzeyde çukurcuklara sebep olduğu ve yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, işlem sonucu taneli yapının belirginliği azalmıştır. Bazı bölgelerde ise boşluklar görülmektedir, bunun sebebinin basınç ve deformasyon etkisi ile yüzeyden kopan parçalar olabileceği düşünülmektedir.



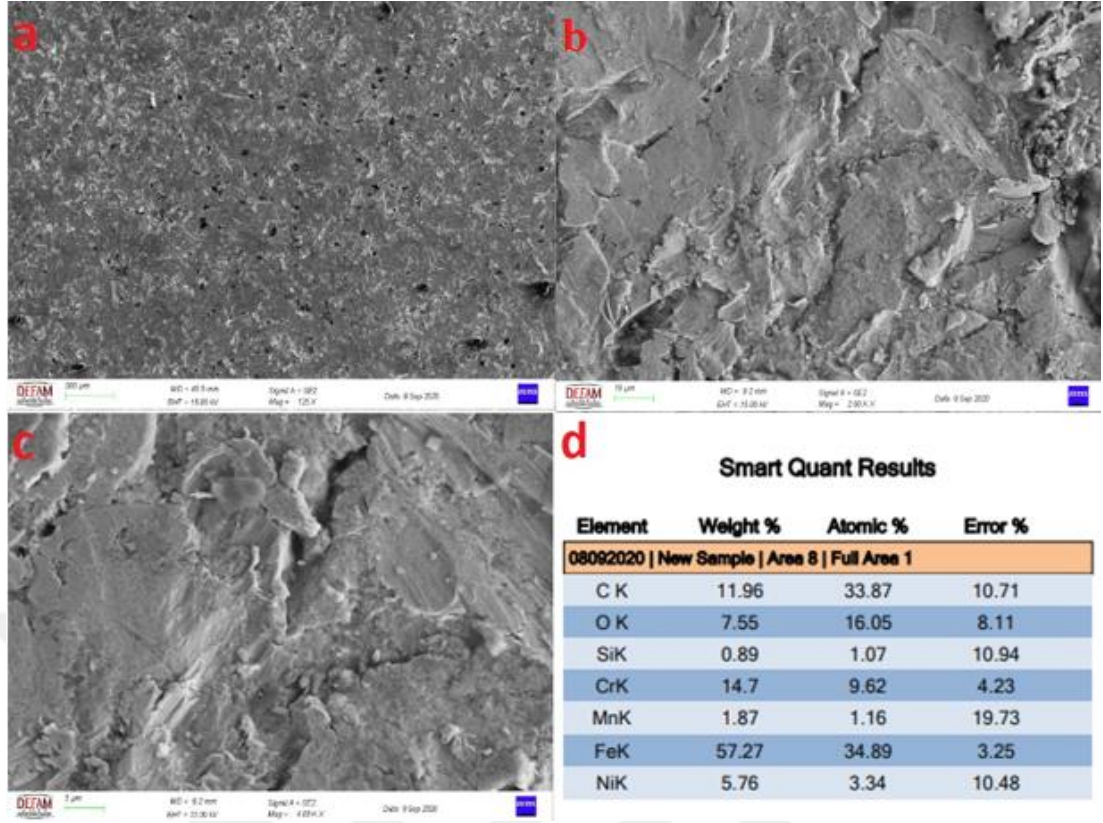
**Şekil 8.19.** Sırasıyla 0,8 mm ve 0,6 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numuneye ait farklı büyütmelelerdeki yüzey SEM fotoğrafları (a),(b),(c) ve EDX sonuçları (d)

Sırasıyla 0,8 mm ve 0,6 mm çaplara sahip çelik bilyalar ile dövülmüş numuneye ait SEM görüntüleri ile EDX analizi sonrası elde edilen elementel içerik tablosu verilmiştir (Şekil 8.19.). SEM görüntüleri incelendiğinde yüksek hava basıncı ile numune yüzeyine püskürtülen bilyaların plastik deformasyon yaratarak, yüzeyde çukurcukların ve kıvrımların oluşmasına sebep olduğu görülmektedir. Bilyalı dövme sırasında rastgele püsküren bilyalar bazı bölgelerde homojen olmayan deformasyon durumu meydana getirmiştir (Şekil 8.19. c.).



**Şekil 8.20.** Sırasıyla 0,8 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numuneye ait farklı büyütme ölçeklerindeki yüzey SEM fotoğrafları (a),(b),(c) ve EDX sonuçları (d)

Sırasıyla 0,8 mm ve 0,3 mm çaplarına sahip çelik bilyalar ile dövülmüş numuneye ait 200 µm, 10 µm ve 5 µm ölçekli SEM görüntüleri ile EDX analizi sonucu elementel içerik tablosu verilmiştir (Şekil 8.20.). SEM görüntüleri incelendiğinde yüksek hava basıncı ile numune yüzeyine püskürtülen bilyaların plastik deformasyon yaratarak, yüzeyde çukurcuklara, kıvrımlara ve dahası parçalanmış (kırılmış) partiküller oluşmasına sebep olduğu görülmektedir. Pürüzlülüğe sebep olduğu tayin edilmektedir. Numune yüzeyinin, 0,8 mm çapına sahip çelik bilyalar ile dövme işlemi yapılan numuneye ve 0,8mm ve 0,6 mm çaplarındaki bilyalarla dövme işlemlerine kıyasla yüzey deformasyonlarının kötüleştiği açıktır. Burada 0,8 mm' lik bilyalar ile dövme sonrası sertleşen yüzeye 0,3 mm gibi oldukça küçük çaplı bilya püskürtülmesi sert yüzeyde kırılmalara yol açmıştır.



**Şekil 8.21.** Sırasıyla 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numuneye ait farklı büyütmelelerdeki yüzey SEM fotoğrafları (a),(b),(c) ve EDX sonuçları (d)

Sırasıyla 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm çaplara sahip bilyalar ile dövülmüş numuneye ait SEM görüntüleri ile EDX sonucu Şekil 8.21.' de verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, yüksek basınç ile numune yüzeyine püskürtülen bilyaların plastik deformasyon yaratarak, yüzeyde çukurcuklara sebep olduğu ve yüzeyin pürüzlülüğünü arttırdığı görülmektedir. Numune yüzeyinin morfolojisi hem deformasyon sonrası kıvrılmış oyuklardan hem de kırılmış partiküllerden oluşmaktadır.

Bu çalışmada, aynı püskürtme basıncında küçük çaplı 0,3 mm'lik bilyalar, yüzeyde daha büyük bir gerilme etkisi oluşturmuştur. Bu gerilmenin etkisinde, önceden dövülmüş ve sertleşmiş yüzeylerde 0,3 mm'lik atış sonrası parçalanmış yapıda çokça partiküle SEM görüntülerinde rastlanmıştır. Ancak, 0,8 mm sonrası 0,6 mm' lik bilyalar ile atış yapılmış yüzeye bakıldığında aynı parçalanmış partiküllere rastlanmamış, daha çok yüzeyde plastik deformasyonun etkisinde kıvrımlar olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda çoklu dövmenin her durumda yüzeyi iyileştirdiği veya her durumda yüzeyi kötüleştirdiği gibi bir sonuç çıkartılması uygun değildir. Bunun

yerine çoklu dövme esnasında malzemedeki sertleşmiş yüzeye, ikincil veya üçüncül olarak uygulanan bilyaların etkisiyle parçalanmış partikül yapıları oluşmadan, yüzeyin plastik deforme olacağı parametrelerin tayin edilmesinin kritik olduğu vurgulanmalıdır.

### **8.5. Mikro-Sertlik Ölçümü Sonuçları**

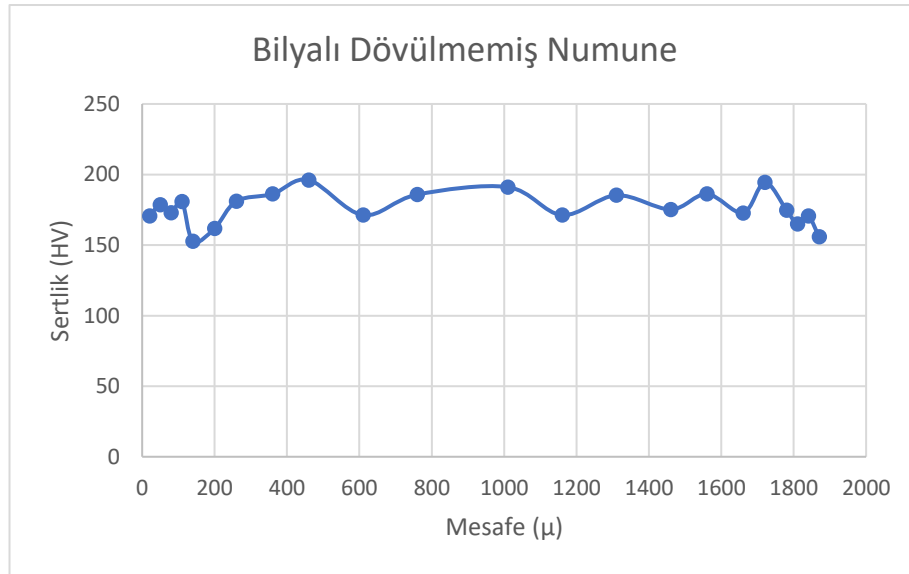
Bilyalı dövme işlemi yapılmamış numunenin kesitinden yapılan Vickers sertlik ölçümü sonuçları Tablo 9.6.'de verilmiştir. Elimizde bulunan sonuçlarda görüldüğü gibi referans olarak kullanılacak sertlik değerleri yüzeyde yaklaşık olarak ortalama 175 HV ( $\pm 5$ ) olarak görülmektedir.





**Tablo 8.6.** Bilyalı dövülmemiş numunenin kesit boyunca sertlik değerleri

Ölçüm Mesafesi ( $\mu\text{m}$ )	HV
Ön Yüzey	
20	170,6
50	178,6
80	172,9
110	180,9
140	152,7
200	161,8
260	181,1
260	186,2
460	196,1
610	171,3
760	185,8
1010	191,1
1160	171,3
1310	185,3
1460	175,3
1560	186,2
1660	172,8
1720	194,4
1780	174,8
1810	165
1840	170,6
1870	155,9
Arka Yüzey	

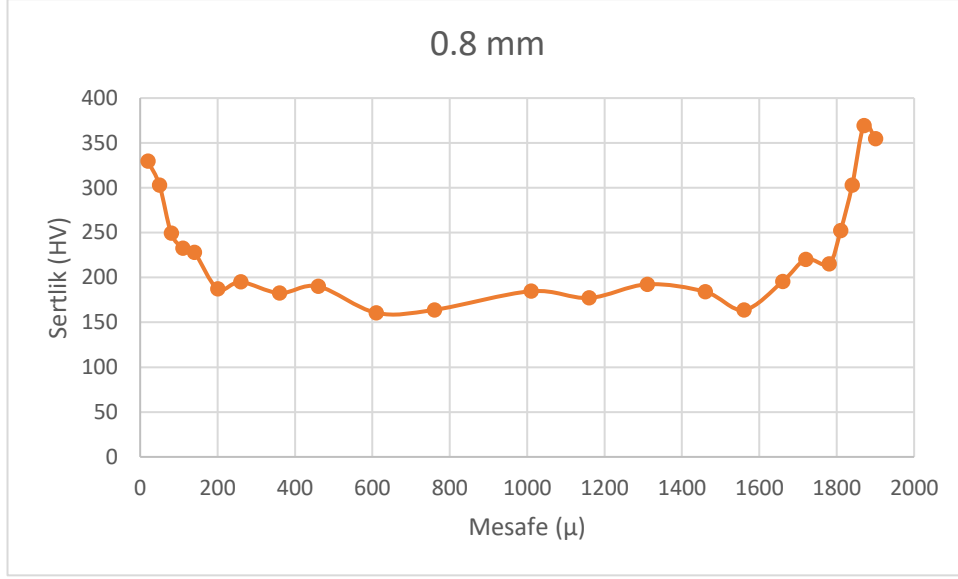


**Şekil 8.22.** Bilyalı dövülmemiş numunenin HV sertlik değişimi

Her iki yüzey üzerine 0,8 mm boyutlarındaki bilyalar ile dövülmüş numunenin kesitinden alınan sertlik ölçüm değerleri Tablo 8.7.'de verilmiştir. Elde edilen verilerde görüldüğü gibi yüzeyde maksimum 354,8 HV sertlik değeri ölçülmüştür. Maksimum sertlik değeri yüzeye yakın bölgelerde elde edilmiş olup merkeze doğru azaldığı görülmüştür. Numune yüzeyine 0,8 mm'lik bilya ile yapılan dövme işlemi yüzeyden 250  $\mu\text{m}$ 'lik mesafeye kadar deformasyon sertleşmesi etkisi meydana getirmiştir.

**Tablo 8.7.** 0,8 mm çaplı bilyalar ile dövme sonrası kesit boyunca sertlik değerleri

Ölçüm Mesafesi ( $\mu\text{m}$ )	HV
Ön Yüzey	
20	329,7
50	302,8
80	249,3
110	232,6
140	228,1
200	187,3
260	195
360	182,6
460	190,1
610	160,6
760	163,9
1010	184,7
1160	177,2
1310	192,4
1460	184,1
1560	163,8
1660	195,5
1720	220,2
1780	215,1
1810	252,3
1840	302,9
1870	369,3
1900	354,8
Arka Yüzey	

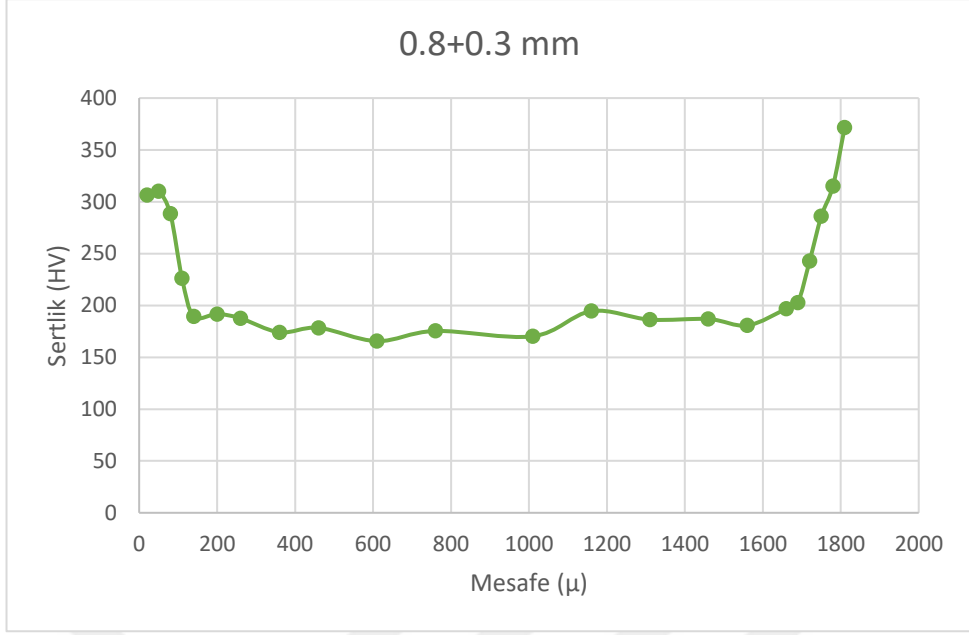


**Şekil 8.23.** 0,8 mm çaplı bilya ile dövülmüş numunenin sertlik değişimi

Her iki yüzey üzerine aynı parametreler ile önce 0,8 mm çapındaki bilyalar ve sonra üzerine 0,3 mm çapındaki bilyalar ile dövülmüş numunenin elde edilen sertlik değerleri Tablo 8.8.de verilmiştir. Bu değerlere baktığımızda ölçülen maksimum sertlik değeri 371,7 HV'dir. 0,8 mm üzerine 0,3 mm çapındaki bilyalar ile yapılan dövme işleminde daha büyük bir deformasyon sertleşme etkisi görülmüştür ve bu etki 300 μ'lık derinliğe kadar oluşmaktadır.

**Tablo 8.8.** 0,8 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar ile çoklu bilyalama sonrası kesit boyunca sertlik değerleri

Ölçüm Mesafesi (µm)	HV
Ön Yüzey	
20	306,4
50	310
80	288,6
110	226
140	189,5
200	191,7
260	187,6
360	174,1
460	178,4
610	165,6
760	175,4
1010	170,2
1160	194,5
1310	186,3
1460	186,9
1560	180,7
1660	196,8
1690	202,8
1720	242,7
1750	286
1780	315,2
1810	371,7
Arka Yüzey	

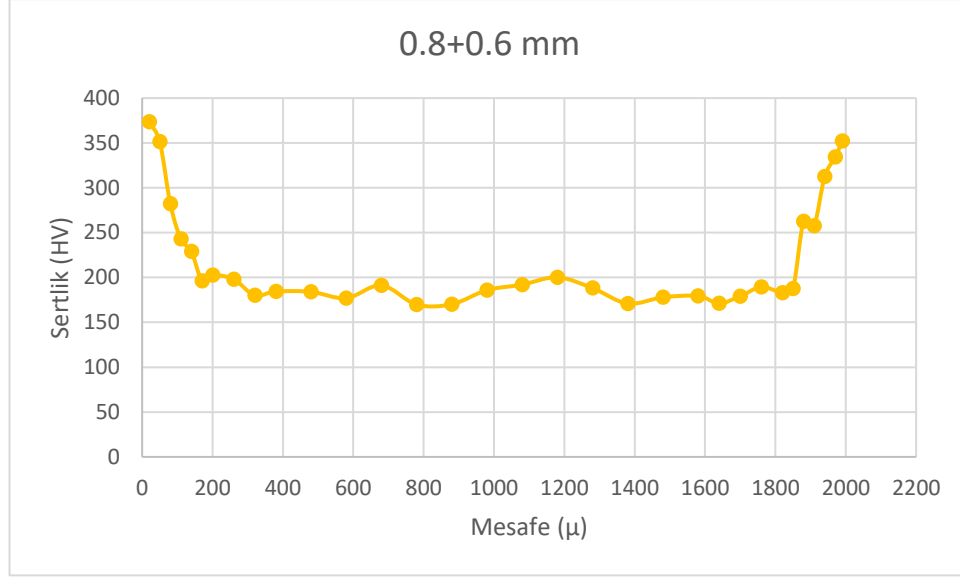


**Şekil 8.24.** 0,8 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numunenin HV sertlik değişimi

Her iki yüzey üzerine aynı parametreler ile önce 0,8 mm çapındaki bilyalar ve ardından üzerine 0,6 mm çapındaki bilyalar ile çoklu bilyalı dövme uygulanmış numuneden elde edilen sertlik değerleri Tablo 8.9.'de verilmiştir. Bu değerlere baktığımızda ölçülen maksimum sertlik değeri 373,5 HV'dir. 0,8 mm üzerine 0,6 mm çapındaki bilyalar ile yapılan dövme işleminde sertleşme etkisi 320 μm'lik derinliğe kadar devam etmektedir.

**Tablo 8.9.** 0,8 mm ve 0,6 mm çaplı bilyalar ile çoklu bilyalama sonrası kesit boyunca sertlik değerleri

Ölçüm Mesafesi (µm)	HV
Ön Yüzey	
20	373,5
50	351,6
80	282,1
110	243
140	229
170	196,3
200	202,6
260	198,1
320	180,1
380	184,4
480	184
580	177
680	191,3
780	169,8
880	170,2
980	185,9
1080	192
1180	200,2
1280	188,2
1380	171
1480	177,9
1540	179,4
1640	171,2
1700	179,1
1760	189,4
1820	183
1850	187,5
1880	262,6
1910	257,7
1940	312,5
1970	334,3
1990	352
Arka Yüzey	



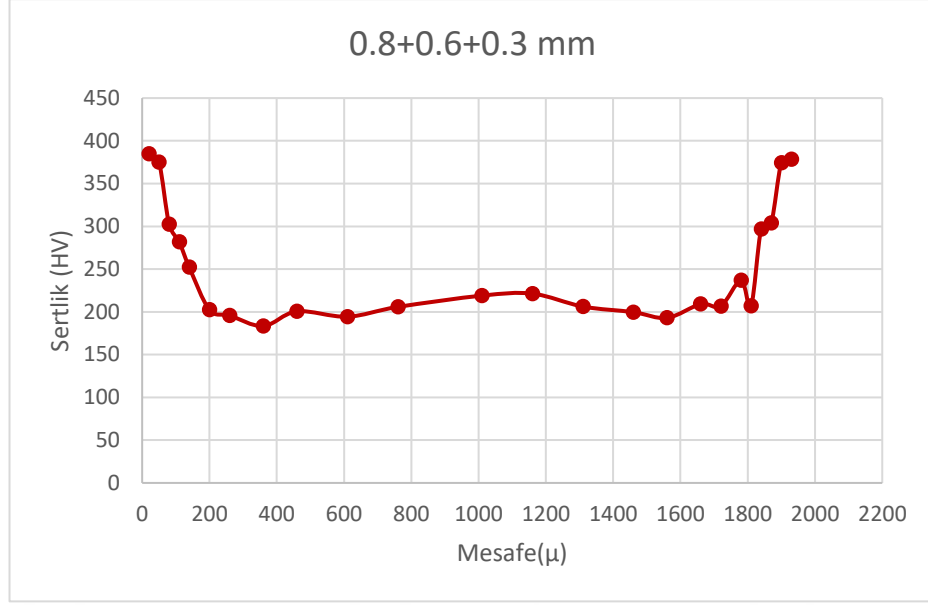
**Şekil 8.25.** 0,8 mm ve 0,6 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numunenin sertlik değişimi

Bu işlemden numune üzerine ilk olarak 0,8 mm çapındaki bilya ile daha sonra üzerine 0,6 mm'lik bilya ve en son 0,3 mm çapındaki bilyalar ile çoklu bilyalı dövme işlemi sonrası ölçülen sertlik değerleri Tablo 8.10.'de verilmiştir. Sonuçlara baktığımızda maksimum sertlik değeri 384,9 HV olarak ölçülmüştür. Yüzeğe yakın bölgelerde daha büyük sertlikler elde edilmiştir. Özellikle ikiz yoğunluklarının hakim olduğu bu bölgelerdeki ikiz sınırları dislokasyonların kaymasını engelleyen unsurlardır [62]. Mikroyapı incelemeleri, 304 paslanmaz çelik numunenin tamamında üretilen gerininin tekdüze olmadığını göstermişti. Bu sertlik artışının malzeme kesitinde derinlerine kadar görülse de yüzeğe uzaklaştıkça sertliğin azaldığı görülmektedir.

**Tablo 8.10.** 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar ile çoklu bilyalama sonrası kesit boyunca sertlik değerleri

Ölçüm Mesafesi (µm)	HV
Ön Yüzey	
20	384,9
50	375,2
80	302,6
110	281,8
140	252,2
200	202,5
260	195,7
360	183,4
460	200,6
610	194,4
760	205,8
1010	219
1160	221,3
1310	206,2
1460	199,7
1560	193
1660	209,1
1720	206,8
1780	236,9
1810	207,1
1840	297
1870	304,1
1900	374,3
1930	378,6
Arka Yüzey	



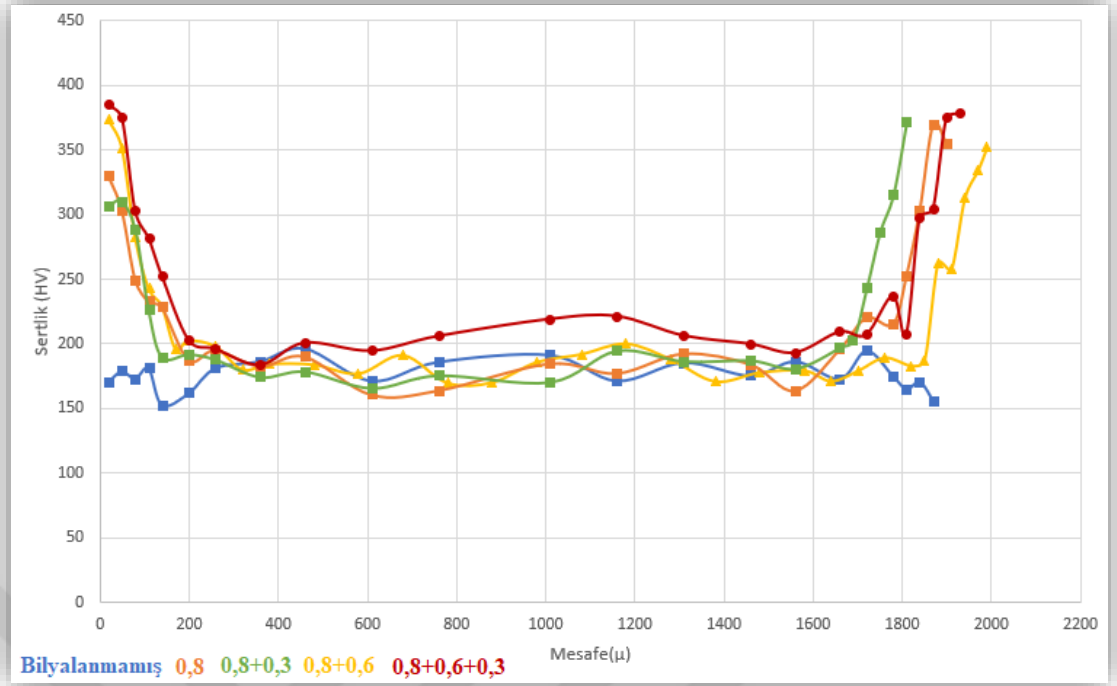


**Şekil 8.26.** 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar ile dövülmüş numunenin sertlik değişimi

Yapılan bilyalama işlemleri sonrası 4 farklı grubun sertlik değerlerindeki artışı incelediğimizde:

- Sadece 0,8 mm çapında bilya kullanılan numunenin sertlik değerindeki maksimum artış yaklaşık %102'dir.
- 0,8 mm üzerine 0,3 mm çapında bilya kullanılan numunenin sertlik değerindeki maksimum artış yaklaşık %112'dir.
- 0,8 mm üzerine 0,6 mm çapında bilya kullanılan numunenin sertlik değerindeki maksimum artış yaklaşık %113'tür.
- 0,8mm üzerine 0,6 mm onun üzerine de 0,3 mm çapında bilya kullanılan numunenin sertlik değerindeki maksimum artış yaklaşık %120'dir.

Bu sonuçlardan hareketle ve Şekil 8.27.'da görüldüğü üzere bilyalı dövme işlemi malzemeye ciddi mertebede bir sertlik artışı kazandırmıştır. Bununla birlikte sertlik değerlerini daha fazla arttırmak ve daha derinlere etki etmesini sağlamak için malzemelere birden fazla bilyalama işlemi uygulanabilir.



Şekil 8.27. Tüm numunelere ait ortak sertlik grafiği

### 8.6. Çekme Testi Sonuçları

Bilyalı dövme işlemi uygulanmış ve bilyalı dövme işlemi uygulanmamış numunelerin her bir parametreden 3'er adet yapılan çekme testleri sonrası elde edilen ortalama çekme mukavemeti ve ortalama yüzde uzama değerleri Tablo 8.11.'de verilmiştir.

Tablo 8.11. Çekme Testi Sonuçları

	Çekme Mukavemeti (MPa)	Yüzde Uzama (%)
Bilyalı Dövülmemiş Numune	477,3 MPa	58
0,8 mm	681,85 MPa	43,97
0,8+0,3 mm	682,47 MPa	43,55
0,8+0,6 mm	705,2 MPa	41,86
0,8+0,6+0,3 mm	708,47 MPa	38,53

İşlem uygulanmamış numunelere yapılan çekme işlemi sonucunda çekme mukavemeti 477,3 MPa ve yüzde uzama değeri %58 olarak ölçülmüş ve referans ölçüm olarak kullanılmıştır. 0,8 mm çaplı bilyalar ile bilyalanan numunelerin çekme mukavemetinde %42,86 artmıştır ve yüzde uzama değeri %58 den %43,97'ye

düşmüştür. 0,8 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar ile çoklu bilyalama sonrası numunenin çekme mukavemeti %43 artmıştır ve yüzde uzama değeri %43,55'e düşmüştür. 0,8mm ve 0,6 mm çaplı bilyalar ile yapılan çoklu bilyalama sonrası mukavemet değeri %47,75 artmıştır ve yüzde uzama değeri %41,86'ya düşmüştür. 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm bilya kullanılarak yapılan çoklu bilyalı dövme işlemi sonrası çekme mukavemeti %48,44 artış göstermiştir ve yüzde uzama değeri %38,53 olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu sonuçlara göre:

- Bilyalı dövme, dayanımı arttırmıştır. Buna bağlı süneklikte kısmen azalma meydana gelmiştir. Ancak bu çalışma kapsamında iki taraflı uygulanan bilyalı dövme işlemi sonrası malzemelerin hala sünek davranış sergilediğini söylemek mümkündür.
- Bilyalı dövme yüzeyde iyi bir dayanım artışı meydana getirmiştir. Çoklu dövme sonrası dayanımda biraz daha artış olması daha fazla dislokasyon oluşumu ve hareketi ile ilişkilendirilir. Bunun yanında uygulanan bilyalı dövme işleminin mikroyapısı nedeniyle plastik deformasyona karşı düşük bir direnç meydana getirdiği görülmektedir.
- Bir yüzey işlemi olan bilyalı dövme uygulanması ile gelişen gerinim tekdüze değil bir yüzeyden çekirdeğe doğru azalan bir gradyan meydana getirir. Merkezdeki hafif deforme olmuş iri taneler, dislokasyonları biriktirmek ve yüksek deformasyon sertleşmesi oranını korumak için daha fazla alana sahip olan daha yumuşak bölgeler olarak davranır [68].
- Bu iki faktör 304 paslanmaz çeliğin bilyalı dövme sonrası hala iyi sünekliğini garanti edebilir.
- Bilyalı dövme sonrası en az mukavemet artışı 0,8 mm çaplı bilyalar kullanılan numunelerde gözlemlenmiştir.
- En yüksek mukavemet artışı ise 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar kullanılan çoklu bilyalı dövme işlemi uygulanan numunelerde gözlemlenmiştir. Ancak bu fark düşük mertebelere düşmektedir. Bilya boyutunun yanında bilyalı dövme sayısındaki artış da çekme mukavemetinde bir miktar artışa sebep olduğu söylenebilir.

## 9. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada 304 paslanmaz çelik malzemesinin her iki yüzeyine de tekli ve çoklu bilyalı dövme işlemleri uygulanmıştır. Bilyalı dövme işlemi ile malzemenin tamamında tek düze bir gerinim oluşmamakta, bir gradyan dağılım sunmaktadır. Bu da yüzeyin altındaki çeşitli derinliklerdeki farklı mikroyapısal değişimler meydana getirmiş dolayısıyla malzeme özelliklerini farklı şekilde etkilemiştir.

- Bilyalı dövme ile yüzeydeki şiddetli plastik deformasyon sonucu yüzey ve yüzeye yakın bölgelerde tane boyutunda küçülmeler görülmüştür. Yüzeyin hemen altındaki mikroyapıda şiddetli plastik deformasyonun bir sonucu olarak meydana gelen deformasyon ikizlenmesi, gerinim kaynaklı martenzit dönüşümünü destekler. Tane incelme mekanizması birçok istif hatası oluşumu, yüksek dislokasyon yoğunluğu aktivitesi ve daha ince ve yoğun mekanik ikizlerin oluşumu ile ilişkili olabilir. Bu mekanik ikizlerin gerinim-kaynaklı martenzit için çekirdeklenme lokasyonları olduğu dikkate alınmaktadır. Yüksek gerinim hızı, düşük istif hatası enerjisine sahip olan 304 paslanmaz çeliğinde yüksek yoğunlukta deformasyon ikizlerini indüklemiştir.
- 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar kullanılarak çoklu bilyalama uygulanması ve farklı bilya boyutlarının kullanılmasıyla en yoğun ikiz düzlemleri ve en belirgin tane incelmesi elde edilmiştir.
- Bilyalı dövme işlemi ile yüzeyden merkeze 200 µm derinlere kadar malzeme sertliğinde artış gözlemlenmiştir. Yüzeyde görülen yüksek sertlik değerleri merkeze doğru azalmıştır. 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar 384,9 HV değerine kadar arttırmıştır.
- Numunelere uygulanan bilyalı dövme ile malzeme yapısında daha öncesinde bulunan  $\alpha'$  yapısında artış olmuştur. Deformasyon etkisi ile  $\gamma$  fazından  $\alpha'$  fazına dönüşüm gerçekleşmiştir bunun birlikte bilyalı dövme tekrarı arttıkça östenitik paslanmaz çelik malzemenin  $\gamma$  yapılarındaki kırımlı yoğunluğu azalırken  $\alpha'$  yapılarında arttığı görülmüştür [71].
- Malzeme yüzeyine sadece 0,8 mm çaplı bilya ile yapılan bilyalama işleminde elde edilen 1,84 µm Ra pürüzlülük değeri, ikili ve üçlü bilyalı dövme parametrelerinde birbirlerine çok yakın ortalama 1,50 µm olarak ölçülmüştür. Sırası ile bilya boyutu küçültülerek yapılan tekrarlı bilyalama işlemlerinde mekanik özelliklerini iyileştirmenin yanında yüzey pürüzlülüğünün de bir

miktar düşürülebildiği görülmüştür. Ancak çoklu dövmede son işlem olarak çok küçük çaplı (0,3 mm) bilya kullanılması sertleşmiş yüzeyde daha büyük gerilme etkisi yaratarak yüzeyde kırılmalara yol açmış ve yüzeyi nispeten kötüleştirmiştir.

- Çekme sonuçları incelendiğinde, bilyalı dövme uygulanmamış numunenin çekme mukavemeti değeri 477,3 MPa'dır. Elde edilen maksimum çekme mukavemeti 708,47 MPa olarak ölçülen 0,8 mm, 0,6 mm ve 0,3 mm çaplı bilyalar ile çoklu bilyama yapılan numunelerde elde edilmiştir. Bu parametrede 3 kez uygulan tekarlı bilyama işlemi tane boyutunun küçülmesi, ikiz yoğunluğunun artması ve deformasyon sertleşmesi etkisi ile en yüksek mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlamıştır. Öte yandan süneklikte nispeten bir azalma olsa da hala iyi bir sünekliğe sahip olduğu görülmüştür. Bu da merkezdeki deforme olmuş iri taneler, dislokasyonları biriktirmek ve yüksek deformasyon sertleşmesi oranını korumak için daha fazla alana sahip olan daha yumuşak bölgeler gibi davranmasından kaynaklanır.

Bundan sonraki çalışmalarda bilyalı dövme işlemi ile elde edilen numunelerde basma kalıntı gerilme analizinin yapılması ve numunelerde yüzey kaynaklı meydana gelebilen hasar türlerinin saptanması için de testlerin yapılması önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Kayır, Y. Z., Baççıl, E. G. TÜRKİYE PASLANMAZ ÇELİK ÜRETME Lİ Mİ?. 14. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Ekim, 2008, İstanbul.
- [2] Newson, Tony. Stainless Steels – Applications, Grades and Human Exposure, AvestaPolarit Oyj Abp, February, 2002.
- [3] Günay, M. , Meral, T., Korkmaz, M. AISI 420 Martenzitik Paslanmaz Çeliğın Delinebilirliğinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2018; 4(3): 223-229.
- [4] Yavuzer, Bekir. Mekanik Alaşım lama ile Üretilen AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çeliklere Alaşım Elementlerinin Etkisi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliğı Anabilim Dalı, Karabük, 2019, 129. (Doktora Tezi)
- [5] Gedge, G. Structural uses of stainless steel — buildings and civil engineering. Journal of Constructional Steel Research. 2008, 64, 1194-1198.
- [6] Dewangan, A.K., Patel, A.D., Bhadania, A.G.. Stainless Steel for Dairy and Food Industry: A Review. Journal of Material Sciences & Engineering. 2015, 4, Issue 5, 1000191.
- [7] Podder, A.S., Bhanja, A. Applications of Stainless Steel in Automobile Industry. Advanced Materials Research, 794, 731–740.
- [8] Stainless Steel Uses In Aircraft. ‘www.clintonaluminum.com’. İnternet erişim tarihi: 19.07.2020.
- [9] Osmanoğ lu, Tahir. AISI 304 ve 430 Kalite Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapılarına, Mekanik Özelliklerine ve Korozyon Davranışlarına Soğuk Deformasyonun Etkileri. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliğı Anabilim Dalı, İstanbul, 2012, 107. (Yüksek Lisans Tezi)
- [10] Şiddetli Plastik Deformasyon (severe plastic deformation). ‘http://bilsenbesergil.blogspot.com/’. İnternet erişim tarihi: 10.10.2020
- [11] Alaşım elementlerinin çeliğ e etkisi. ‘www.mmo.org.tr’. İnternet erişim tarihi: 28.07.2020

- [12] Cortie, M. Encyclopedia of Materials: Science and Technology, ISBN: 0-08-0431526, 3037-3039.
- [13] Garrison, W.M., Amuda, M.O.H. Stainless Steels: Martensitic. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. 2017, DOI:10.1016/B978-0-12-803581-8.02527-3
- [14] Kim, K., Kang, J., Kim, S. Effects of carbon and nitrogen on precipitation and tensile behavior in 15Cr- 15Mn-4Ni austenitic stainless steels, Materials Science and Engineering:A. 2018. 712, 114-121.
- [15] Arslan, Buğra. AISI 304 Paslanmaz Çeliğın İşlenmesinde Farklı Talaş Kırıcı Formlarının Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 2019, 105. (Yüksek Lisans Tezi)
- [16] Çiftçi, İ. AISI 304 Ostenitik Paslanmaz Çeliğın Kaplanmış Sementit Karbür Kesici Takımla İşlenmesi Esnasında Oluşan Takım Aşınması. Teknoloji. 2004, 7, 489-495.
- [17] Kahraman, N., Gülenç, B., Akça, H. Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen Ostenitik Paslanmaz Çelik ile Düşük Karbonlu Çeliğın Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2002, 17, 75-85.
- [18] Peruzzo, M., Serafini, F.L., Ordoñez, M.F.C., Souza, R.M., Fariasa, M.C.M., Reciprocating sliding wear of the sintered 316L stainless steel with boron additions. Wear. 2019, 422-423: 108-118.
- [19] McGuire, M., Stainless Steels For Design Engineers. ASM International. Ohio, USA, 2008, 301.
- [20] Wang, M., Zhou, Z., Sun, H., Hu, H., Li, S. Microstructural observation and tensile properties of ODS-304 austenitic steel. Materials Science & Engineering A. 2013, 559, 287-292.
- [21] Kan, W.H., Bhatia, V., Dolman, K., Lucey, T., Tang, X., Chang, L., Proust, G., Cairney, J. A study on novel AISI 304 stainless steel matrix composites reinforced with (Nb<sub>0.75</sub>,Ti<sub>0.25</sub>)C. Wear. 2018, 398-399, 220-226.

- [22] Rajendran, P., Devaraju, A. Experimental Evaluation of Mechanical and Tribological Behaviours of Gas Nitride treated AISI 316LN Austenitic Stainless Steel. *Materials Today: Proceedings*. 2018, 5, 14333-14338.
- [23] 304L (1.4307) Paslanmaz Çelik. 'bircelik.com' İnternet erişim tarihi: 23.08.2020
- [24] Malzeme Teknolojisi-I Prof. Dr. İrfan Ay. 'www.balikesir.edu.tr' İnternet erişim tarihi: 10.05.2020.
- [25] Demir karbon denge diyagramı. 'www.metalurjik.com' İnternet erişim tarihi: 06.06.2020
- [26] Çeliğin İç Yapısında Bulunan Fazlar – Çelik Fazları. 'www.metalurjik.com' İnternet erişim tarihi: 06.06.2020
- [27] Shen, Y. F., Li, X. X., Sun, X., Wang, Y. D., Zuo, L. Twinning and martensite in a 304 austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 552, 514–522.
- [28] Tekaslan, Ö., Gerger, N., Şeker, U. AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerde kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüklerinin araştırılması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 2008, 10, 3-12.
- [29] Metallerin Plastik Deformasyon Kabiliyeti. 'www.nursensaklakoglu.cbu.edu.tr' İnternet erişim tarihi: 04.02.2020
- [30] Subaşı, M., Kafkas, F., Karataş, Ç. AISI 4140 Çeliğinde Sertlik ve Kalıntı Gerilme İlişkisi. 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Kasım, 2010, Balıkesir
- [31] Volk W., Vogt S., Stahl J., Prauser S. Introduction to residual stresses in production technology. *Production Engineering*. 2019, 13, 119-121.
- [32] What is Residual Stress?. 'www.hill-engineering.com'. İnternet erişim tarihi: 07.04.2020
- [33] Kudryavtsev, Y. F. Residual Stress. *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics*. 2008, 371–388.
- [34] Xu, C., Sheng, G., Wang, H., Jiao, Y., Yuan, X. Effect of high energy shot peening on the microstructure and mechanical properties of Mg/Ti joints. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017, 695, 1383-1391.



- [35] Bagleri, S., Guagliano, M. Review of shot peening processes to obtain nanocrystalline surfaces in metal alloys. *Surface Engineering*. 2009, 25, 3-13.
- [36] Majzoobi, G.H., Azizi, R., Nia, A.A. A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005, 164-165, 1226-1234.
- [37] Maleki, E., Unal, O., Amanov, A., Novel Experimental Methods for The Determination of The Boundaries Between Conventional, Severe and Over Shot Peening Processes. *Surfaces and Interfaces*. 2018, 13, 233-254.
- [38] Kubit, A., Bucior, M., Zielecki, W. Ve Stachowicz, F. The impact of heat treatment and shot peening on the fatigue strength of 51CrV4 steel. *Procedia Structural Integrity*, 2016, 2, 3330-3336.
- [39] Frija, M., Hassine, T., Fathallah, R., Bouraoui, C., Dogui, A. Finite element modelling of shot peening process: Prediction of the compressive residual stresses, the plastic deformations and the surface integrity. *Materials Science and Engineering A*. 2006, 426, 173-180.
- [40] Trung, P.Q., Khun, N.W., Butler, D.L. Effects of Shot Peening Pressure, Media Type and Double Shot Peening on The Microstructure, Mechanical and Tribological Properties of Low-Alloy Steel. *Surface Topography: Metrology and Properties*. 2016, 4(4), 045001.
- [41] Bilyalı dövme nedir? ‘[www.malzemebilimi.net](http://www.malzemebilimi.net)’. İnternet erişim tarihi: 07.04.2020
- [42] Barış, Fatih. 50CrV4 Çeliğin Yüzeyinde Oluşturulan Yapay Yüzey Kusurlarına Bilyalı Dövme İşleminin Etkilerinin İncelenmesi. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 2020, 90. (Yüksek Lisans Tezi)
- [43] Sawada, T. Effect of Young's Modulus of Shot Peening Media on Surface Modification Behavior by Micro Shot Peening. 13. International Conferences on Shot Peening, Eylül, 2017, Montreal, Kanada.

- [44] Ahmadi, M., Sadeghi, B. M., Irani, M., Rahimi F. Finite Element Simulation of Shot Peening of an Aluminum Alloy Considering Hardening Model. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2017, 57(6), 565-571.
- [45] Altenberger, I., Scholtes, B., Martin, U., Oettel, H. Cyclic deformation and near surface microstructures of shot peened or deep rolled austenitic stainless steel AISI 304. *Materials Science and Engineering*. 1999, 1-9.
- [46] Karahan B., İnce U. Bilya Püskürtmenin (Shot Peening) Teknik-Teknolojideki Yolculuğu Ve Soğuk Dövme Prosesine Adaptasyonu. *Derin*. 2015, 74-99.
- [47] Gariépy, A., Larose, S., Perron, C., Bocher, P., Lévesque, M. On the Effect of the Orientation of Sheet Rolling Direction in Shot Peen Forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013, 213(6), 926-938.
- [48] Çubuk, Ahmet Burak. Bilyalı Dövme İşleminde Bilya Çarpma Açısı ve Bilya Boyutunun AA7075 Alüminyum Alaşımının Yüzey ve Yüzey Altı Özelliklerine Etkisi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli, 2020, 80. (Yüksek Lisans Tezi)
- [49] Çalışkan, Salim. Determination of Shot Peening Effect on Fatigue Behavior of AISI 4140 Steel By Non-Destructive Measurement of Surface Residual Stresses. Middle East Technical University. The Degree of Master of Science In Metallurgical and Materials Engineering, Ankara, 2018, 111. (Master Thesis)
- [50] Zhang, P., Lindemann, J., Leyens, C. Shot peening on the high-strength wrought magnesium alloy AZ80—Effect of peening media. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, 210, 445–450.
- [51] Nasilowska, B., Bogdanowicz, Z., Wojucki, M. Shot peening effect on 904 L welds corrosion resistance. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015, 115, 276-282.
- [52] Bagherifard, S., Slawik, S., Fernández-Pariente, I., Pauly, C. Nanoscale surface modification of AISI 316L stainless steel by severe shot peening. *Materials and Design*. 2016, 102, 68-77.
- [53] Ateş, M. Nanoparçacıkların Ölçme ve İnceleme Teknikleri. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*. 2018, 11 (1), 63-69.

- [54] Temel, S., Nebi, M., Peker, D. Sol-Gel Döndürerek Kaplama Tekniği ile Saydam İletken ZnO İnce Filmlerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji. 2017, 5(3), 51-59.
- [55] Monshi, A., Reza Foroughi, M., Reza Monshi, M. Modified Scherrer Equation to Estimate More Accurately Nano-Crystallite Size Using XRD. World Journal of Nano Science and Engineering. 2012, 2, 154-160.
- [56] İrizalp, S.G., Saklakoğlu N., Yılbaş, B.S. Characterization of microplastic deformation produced in 6061-T6 by using laser shock processing. Springer-Verlag. 2013.
- [57] İrizalp, Simge. Lazer Şok İşleme Prosesinin 6061-T6 Alaşımının Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi ve Nano Ölçekte Karakterizasyonu. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 2014, 133. (Doktora Tezi)
- [58] Mohammed A., Abdullah A. Scanning electron microscopy (SEM): a review. Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics-HERVEX. November 7-9, 2018, Romania.
- [59] Staudhammer, K. P., Murr, L. E., Hecker, S. S. Nucleation and evolution of straininduced martensitic (bcc) embryos and substructure in stainless steel: a transmission electron microscope study, Acta Metallurgica. 1983, 31(2), 267-274.
- [60] Altenberger, I., Scholtes, B., Martin, U., Oettel, H. "Cyclic deformation and near surface microstructures of shot peened or deep rolled austenitic stainless steel AISI 304, Materials Science and Engineering: A.1999, 264(1-2), 1-16.
- [61] Li, J. S., Gao, W. D., Cao, Y., Huang, Z. W., Gao, B., Mao, Q. Z., & Li, Y. S. Microstructures and mechanical properties of a gradient nanostructured 316L stainless steel processed by rotationally accelerated shot peening. Advanced Engineering Materials.2018, 20(10), 1800402.
- [62] Liu, S., Gao, S. Y., Zhou, Y. F., Xing, X. L., Hou, X. R., Yang, Y. L., & Yang, Q. X. A research on the microstructure evolution of austenite stainless steel by surface mechanical attrition treatment. Materials Science and Engineering: A. 2014, 617, 127-138.

- [63] Hecker, S. S., Stout, M. G., Staudhammer, K. P., Smith, J. L. Effects of strain state and strain rate on deformation-induced transformation in 304 stainless steel: Part I. Magnetic measurements and mechanical behavior. *Metallurgical Transactions A*. 1982, 13(4), 619-626.
- [64] Wang, Z. D., Sun, G. F., Lu, Y., Chen, M. Z., Bi, K. D., Ni, Z. H. Microstructural characterization and mechanical behavior of ultrasonic impact peened and laser shock peened AISI 316L stainless steel. *Surface and Coatings Technology*. 2020, 385, 125403.
- [65] Soyama, H, Chighizolab, C.R., Hill M.R. Effect of compressive residual stress introduced by cavitation peening and shot peening on the improvement of fatigue strength of stainless steel, *Journal of Materials Processing Tech*. 2021, 288, 116877.
- [66] Dhakal, B., Swaroop, S. Effect of laser shock peening on mechanical and microstructural aspects of 6061-T6 aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology*. 2020, 282, 116640.;
- [67] Park, C., Jung, D., Chun, E. J., Ahn, S., Jang, H., Kim, Y. J. “ Effect of laser shock peening without coating on fretting corrosion of copper contacts”, *Applied Surface Science*. 2020, 145917.
- [68] Yan, F. K., Liu, G. Z., Tao, N. R., & Lu, K. Strength and ductility of 316L austenitic stainless steel strengthened by nano-scale twin bundles. *Acta Materialia*. 2012, 60(3), 1059-1071.
- [69] Chen, M., Hing, S., Jiang, C., Zhan, K., Ji, V. Determination of surface mechanical property and residual stress stability for shot-peened SAF2507 duplex stainless steel by in situ X-ray diffraction stress analysis, *Journal of Material Research and Technology*. 2020, 9(xx), 7644-7654.
- [70] Güllü. E., Yılmaz T. G. Rulmanlı Yataklarda Etkili Olan Hertz Basınçlarının ve Yuvarlanma Elemanlarında Oluşan Deformasyonların Analizi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*. 2018, Cilt 23, Sayı 1, 111-126.
- [71] Liu. H., Wei. Y., Tan C.K.I., Ardi D.T., Tan D.C.C., Lee C.J.J. XRD and EBSD studies of severe shot peening induced martensite transformation and grain refinements in austenitic stainless steel. *Materials Characterization*. Volume 168, October 2020, 110574.

[72] Savaş, Serdar. Monitoring Variation of Surface Residual Stresses in The Shot-Peened Steel Components By Magnetic Barkhausen Noise Method. Middle East Technical University, the Graduate School of Natural and Applied Sciences, Metallurgical and Materials Engineering, Ankara, 2010, 81. (The Degree of Master of Science)

[73] Ajit Jain, A DATABASE FOR SHOT PEENING PARAMETERS AND DESIRED RESIDUAL STRESS DISTRIBUTION, International Conference on Shot Peening and Blast Cleaning, 181-189.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Onur MUTLU  
Doğum Yeri ve Yılı : Bursa, 1993  
Medeni Hali : Bekar  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : onurmutlu93@yahoo.com

### Eğitim Durumu

Lise : Hürriyet Anadolu Lisesi, 2011  
Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü,  
2017  
Yüksek Lisans :Manisa Celal Bayar Üniversitesi Üniversitesi, İmalat ve  
Konstrüksiyon Bölümü, 2021

### Mesleki Deneyim

Esa Metal Teknoloji 2019-2020