

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

SMAT İÇİN TİTREŞİM PLATFORMU TASARIMI VE PROSES
PERFORMANSININ DENEYSEL VE NÜMERİK ANALİZİ

ESER YARAR

KOCAELİ 2022

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

SMAT İÇİN TİTREŞİM PLATFORMU TASARIMI VE PROSES
PERFORMANSININ DENEYSEL VE NÜMERİK ANALİZİ

ESER YARAR

Prof. Dr. Sedat KARABAY

Danışman, Kocaeli Üni.

.....

Doç. Dr. Ş. Hakan ATAPEK

Jüri Üyesi, Kocaeli Üni.

.....

Dr. Öğr. Üyesi E. Asım GÜVEN

Jüri Üyesi, Kocaeli Üni.

.....

Prof. Dr. Recep KOZAN

Jüri Üyesi, Sakarya Üni.

.....

Prof. Dr. Murat PAKDİL

Jüri Üyesi, Bolu Abant İzzet Baysal Üni.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 27.01.2022

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

- ☐ Bu tez çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.
- ☒ Bu tez çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler Bilimsel Araştırmalar Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2020-2218 no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Eser YARAR

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Eser YARAR

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında titreşim hareketinden faydalanılarak geleneksel bilyalı dövme yöntemlerine alternatif bir yöntem olan mekanik yüzey yıpratma uygulaması için bir titreşim tablası tasarlanmıştır. Mevcut uygulamaların beraberinde getirdiği dezavantajlar minimize edilerek uygulamanın performansını artırmak amaçlanmıştır.

Doktora tez çalışmalarım süresince değerli fikirleri ve yorumları ile bana yol gösteren ve desteğini her daim yanımda hissettiğim değerli danışmanım Prof. Dr. Sedat Karabay'a teşekkürlerimi sunarım.

Değerli fikirleri, yorumları ve yönlendirmeleri ile doktora tez çalışmalarına katkılarından dolayı doktora tez izleme jürim Doç.Dr. Ş. Hakan Atapek ve Dr.Öğr.Üy. E. Asım Güven'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca desteğiyle ve çıkmaza girdiğim her noktada bana yol gösteren ve cesaretlendiren çok değerli hocam Doç.Dr. A. Tamer Ertürk'e teşekkürlerimi sunarım.

Metalografik numune hazırlama ve mikroskopi işlemlerinde desteğini esirgemeyen Dr. Funda Gül Koç'a ve MATLAB ile ilgili verdiği destek için Mak.Müh. Çağatay Açıkgoz'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında varlıklarını hissettiğim, en zor zamanlarımda bana destek olan, beni büyüten, yetiştiren ve bugünlere gelmemi sağlayan canım babam Durmuş Yazar'a ve canım annem Fatma Yazar'a, varlığı ile bana her zaman güç veren, doğduğu günden bugüne kadar en güzel arkadaşım, canım kardeşim Özgün Can Yazar'a ve bütün aileme ve dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak değerli eşim, hayat arkadaşım ve yoldaşım Oytun Yazar'a ve gözlerini dünyaya yeni açan ve bana umut olan canım oğlum Can Yazar'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması Kocaeli Üniversitesi (KOÜ) Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından FDK-2020-2218 nolu proje ile desteklenmiştir.

Ocak - 2022

Eser YARAR

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	ix
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. TİTREŞİM PLATFORMU TASARIMI VE TİTREŞİM ANALİZİ	3
2.1. Genel Bilgiler ve Literatür Değerlendirmesi	3
2.2. Titreşim Tablasının Sonlu Elemanlar Modeli.....	6
2.3. Modal Analiz	8
2.4. Frekans Cevap Analizi.....	11
2.5. Titreşim Tablasının İmalatı ve Deneysel Modal Analiz.....	15
3. TİTREŞİM PARAMETRELERİNİN BİLYA HIZI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DİNAMİK ANALİZİ	19
3.1. SMAT Prosesinde Bilya Hızları ve Literatür Değerlendirmesi.....	19
3.2. Dinamik Sonlu Elemanlar Analizi	22
3.2.1. Sonlu Elemanlar Modeli	23
3.3. İstatistikî Analiz.....	24
3.4. Bilya Hızı Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	25
3.5. Varyans Analizi	27
3.6. Bilya Hızının Değerlendirilmesi.....	29
4. SMAT İÇİN TEK DARBELİ PLASTİK DEFORMASYON DAVRANIŞININ MODELLENMESİ.....	36
4.1. SMAT Prosesinde Darbe Davranışı ve Literatür Değerlendirmesi	36
4.2. Dinamik Sonlu Elemanlar Analizi	40
4.2.1. SMAT için Sonlu Eleman Modeli	40
4.2.2. Ağ Yakınsama Çalışması	41
4.2.3. Malzeme Modelinin Belirlenmesi	43
4.2.4. Durum Denklemi (EOS).....	44
4.2.5. İstatistikî Model.....	45
4.3. Simülasyon Sonuçları	46
4.4. Plastik Deformasyon Mekanizmasının Değerlendirilmesi	55
4.5. Kalıntı Gerilmenin Değerlendirilmesi	59
4.6. Çarpışma Katsayısı	61
4.7. Regresyon Eşitlikleri	62
4.8. Tartışma ve Sonuçlar	63
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	68
5.1. Malzeme ve Yöntem.....	68
5.2. Mikroyapı İncelemeleri	71
5.3. XRD analizi	74
5.4. Yüzey Topografisi ve Pürüzlülük İncelemeleri	78
5.5. Aşınma İncelemeleri	84

5.6. Kalıntı Gerilme İncelemeleri	92
5.7. SMAT için Çoklu Darbe Modeli ve Genel Değerlendirme	94
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	100
KAYNAKLAR.....	103
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	113
ÖZGEÇMİŞ.....	115



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Tek serbestlik dereceli sönümsüz serbest titreşim modeli	4
Şekil 2.2.	Üç boyutlu titreşim tablası modeli	7
Şekil 2.3.	Titreşim tablası için titreşim modeli.....	8
Şekil 2.4.	Doğal frekans tayini ve elde edilen mod şekilleri	9
Şekil 2.5.	Harmonik analiz için titreşim tablasının üç boyutlu modeli	12
Şekil 2.6.	Frekans cevap analizi grafikleri	13
Şekil 2.7.	Frekans cevap analizi sonrası titreşim tablası için yer değiştirme, hız ve ivme dağılımları.....	14
Şekil 2.8.	SMAT için tasarlanan titreşim tablası	15
Şekil 2.9.	Deneysel modal analiz sonrası doğal frekans grafiği.....	16
Şekil 2.10.	Titreşim tablasının FFT sonrası ölçülen genlik, hız ve ivme grafikleri.....	17
Şekil 3.1.	SMAT prosesinin şematik görünümü	20
Şekil 3.2.	Bilya hızı için tasarlanan FEM modelinin üç boyutlu görünümü	23
Şekil 3.3.	Bir bilyanın simülasyon boyunca elde edilen hız grafiği.....	26
Şekil 3.4.	Toplam hız dağılımı	26
Şekil 3.5.	Bilya hızı (m/s) için ana etki grafikleri a) OBH b) YBH c) DBH.....	30
Şekil 3.6.	Bilya hızı (m/s) için ikili etkileşim grafikleri a) OBH b) YBH c) DBH	31
Şekil 3.7.	Analitik yaklaşımların şematik gösterimi	32
Şekil 4.1.	Tekli darbe simülasyonları için oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli.....	41
Şekil 4.2.	Ağ yakınsama grafikleri (Ø5 mm, 1 m/s) a) Derinlik ile eleman boyutunun bir fonksiyonu olarak yer değiştirme profili b) Eleman boyutunun bir fonksiyonu olarak kalıntı gerilme profili c) Eleman boyutunun bir fonksiyonu olarak eşdeğer plastik gerilim.....	42
Şekil 4.3.	Sıcaklık dağılımları	46
Şekil 4.4.	Ana etki ve ikili etkileşim grafikleri a) Eşdeğer gerilme (von Mises), b) eşdeğer plastik gerilim	48
Şekil 4.5.	Ana etki ve ikili etkileşim grafikleri a) Maksimum deformasyon derinliği b) İz çapı	52
Şekil 4.6.	Ana etki ve ikili etkileşim grafikleri a) Maksimum kalıntı gerilme b) Maksimum kalıntı gerilme derinliği	53
Şekil 4.7.	Eş değer (Von Mises) gerilme dağılımları	55
Şekil 4.8.	Eşdeğer plastik gerilim dağılımları	56
Şekil 4.9.	Tek bir atıştan sonra oluşan eşdeğer plastik gerilim profilleri a) Ø3 mm b) Ø4 mm c) Ø5 mm.....	57
Şekil 4.10.	Deformasyon derinliği dağılımları	58
Şekil 4.11.	İz çapı genişliği dağılımları.....	58
Şekil 4.12.	Kalıntı gerilme dağılımları	59
Şekil 4.13.	Tek bir atıştan sonra oluşan kalıntı gerilme profilleri a) Ø2 mm b) Ø3 mm c) Ø4 mm	60
Şekil 4.14.	Çarpışma katsayıları	62
Şekil 4.15.	Analitik yaklaşımların şematik gösterimi	64

Şekil 4.16. Maksimum plastik gerinim ile eşdeğer gerilimin değişimi ve maksimum deformasyon derinliği ile maksimum artık gerilim derinliğinin değişimi için dağılım grafikleri	66
Şekil 4.17. Pareto etki grafikleri.....	67
Şekil 5.1. a) Mikroyapı incelemeleri için şematik görünüm b) AA7075-T6 için işlem görmemiş kesit mikroyapısı	69
Şekil 5.2. SMAT odasının şematik görünümü	70
Şekil 5.3. 3Y ve 3T için SMAT sonrası OM mikroyapısı	72
Şekil 5.4. 4Y ve 4T için SMAT sonrası OM mikroyapısı	72
Şekil 5.5. 5Y ve 5T için SMAT sonrası OM mikroyapısı	73
Şekil 5.6. 5T için SMAT sonrası SEM mikroyapısı	73
Şekil 5.7. Deney numuneleri için elde edilen XRD paternleri	75
Şekil 5.8. XRD analizi sonrası elde edilen kristalit boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve mikrogerinim grafiği	77
Şekil 5.9. 3Y için SMAT sonrası yüzey morfolojisi	79
Şekil 5.10. SMAT sonrası 3T, 4T ve 5T numuneleri için elde edilen 3 boyutlu yüzey topografisi	80
Şekil 5.11. SMAT sonrası 3Y, 4Y ve 5Y numuneleri için elde edilen 3 boyutlu yüzey topografisi	80
Şekil 5.12. SMAT sonrası pürüzlülük için ana etki ve ikili etkileşim grafikleri a) R_a b) R_z	83
Şekil 5.13. Aşınma testleri sonrası aşınma izinin üç boyutlu topografisi ve en derin profil kesiti	86
Şekil 5.14. Aşınma testleri sonrası mesafeye bağlı sürtünme katsayıları grafiği	87
Şekil 5.15. Aşınma testleri sonrası ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranı	88
Şekil 5.16. Aşınma testleri sonrası işlenmemiş numune için SEM görüntüleri	89
Şekil 5.17. Aşınma testleri sonrası 4Y için SEM görüntüleri	90
Şekil 5.18. Aşınma testleri sonrası 4Y için SEM görüntüleri	91
Şekil 5.19. 3Y için derinliğe bağlı kalıntı gerilme ve kristalit boyutu	93
Şekil 5.20. Çoklu darbe üç boyutlu sonlu eleman modeli ve bilya hızı grafiği	94
Şekil 5.21. Çoklu darbe sonrası eşdeğer gerilme, eşdeğer gerinim ve kalıntı gerilme dağılımları	95
Şekil 5.22. 3Y için çoklu darbe sonrası deformasyon dağılımı	96
Şekil 5.23. 3Y için XRD ve simülasyon sonrası kalıntı gerilme dağılımı	97
Şekil 5.24. 3Y numunesi kalıntı gerilme	98
Şekil 5.25. Tek atış modeli için elde edilen iz çapının deney verileri ile karşılaştırılması	99

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. İzotropik elastik malzeme modeli	7
Tablo 2.2. Modal analiz için elde edilen yönlere bağlı katılım faktörü tablosu	10
Tablo 2.3. Modal analiz ve FFT için titreşim ölçüm parametreleri	16
Tablo 2.4. Titreşim analizi sonuçları	18
Tablo 3.1. Paslanmaz çelik için izotropik elastik malzeme modeli	24
Tablo 3.2. Simülasyonlar için belirlenen parametreler	25
Tablo 3.3. Tüm SMAT simülasyonları için toplam hız sonuçları	27
Tablo 3.4. OBH'nin ANOVA tablosu	28
Tablo 3.5. YBH'nin ANOVA tablosu	28
Tablo 3.6. DBH'nin ANOVA tablosu	29
Tablo 4.1. Johnson-Cook malzeme modeli için malzeme sabitleri	44
Tablo 4.2. EOS Gruneisen modeli için malzeme sabitleri	45
Tablo 4.3. Simülasyon parametreleri	46
Tablo 4.4. Simülasyon sonuçları	47
Tablo 4.5. Eşdeğer Gerilme için ANOVA tablosu	48
Tablo 4.6. Eşdeğer Plastik Gerilme için ANOVA tablosu	49
Tablo 4.7. Maks. Deformasyon Derinliği için ANOVA tablosu	50
Tablo 4.8. İz Çapı için ANOVA tablosu	51
Tablo 4.9. Maks. Kalıntı Gerilme için ANOVA tablosu	53
Tablo 4.10. Maks. Kalıntı Gerilme Derinliği için ANOVA tablosu	54
Tablo 4.11. SMAT proses yanıtlarının ampirik modelleri	63
Tablo 5.1. AA7075'in kimyasal bileşenleri (wt.%)	68
Tablo 5.2. Isıl işlem proses parametreleri	68
Tablo 5.3. Deneylerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri	70
Tablo 5.4. XRD analizi tablosu	76
Tablo 5.5. Pürüzlülük analizi	81
Tablo 5.6. R_a için ANOVA tablosu	82
Tablo 5.7. R_z için ANOVA tablosu	82

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

ω	: Açısal frekans (rad/s)
f	: Titreşim frekansı (Hz)
F_0	: Zorlama genliği (μm)
A	: Titreşim genliği (μm)
$V_{i,\max}$	: Maksimum başlangıç hızı (m/s)
m	: Kütle (kg)
k	: Yay sabiti (N/mm)
ω_n	: Doğal frekans (Hz)
$x(t)$	: Hareket denklemi
$x_h(t)$	: Homojen çözüm
$x_o(t)$	: Özel çözüm
$k_{eş}$	: Eş değer yay katsayısı (N/mm)
$m_{eş}$	: Eş değer kütle (kg)
$[M]$	: Kütle matrisi
$[C]$	: Sönüm matrisi
$[K]$	: Rijitlik matrisi
x	: Yer değiştirme vektörü
$\dot{x}$	: Hız vektörü
$\ddot{x}$	: İvme vektörü
F	: Kuvvet vektörü
Ω	: Açısal zorlayıcı frekans (rad/s)
ψ	: Kuvvet fazı kayması
ϕ	: Yer değiştirme fazı kayması
y	: Tahmin edilen yanıt
β_0	: Sabit katsayı
β_i	: Lineer katsayı
β_{ii}	: Kuadratik katsayı
β_{ij}	: Etkileşim katsayı
X	: Kodlanmış değişken
ε	: Hata
ζ	: Bilya çapı (mm)
H	: Bilya hızı (m/s)
DO_Y	: Yarı doluluk oranı
DO_T	: Tam doluluk oranı
v_m	: Titreşim motoru hızı (m/s)
f_m	: Titreşim motoru frekansı (Hz)
v_0	: Başlangıç atış hızı (m/s)
m_s	: Bilya kütlesi (kg)

$m_c + m$	: Titreşim motoru ve titreşim odası toplam kütlesi (kg)
ϕ	: Harmonik titreşim fazı
d_p	: Projeksiyon mesafesi (mm)
g	: Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
σ	: Eşdeğer gerilim (MPa)
ε	: Eşdeğer plastik gerinim
$\dot{\varepsilon}$	: Şekil değiştirme hızı
$\dot{\varepsilon}_{ref}$	: Referans şekil değiştirme hızı
A	: Başlangıç akma dayanımı (MPa)
B	: Gerinim sertleştirme sabiti
C	: Gerinim hızı katsayısı
n	: Gerinim sertleştirme katsayısı
m	: Termal yumuşama katsayısı
T	: Sıcaklık ($^{\circ}C$)
T_{ref}	: Referans sıcaklık ($^{\circ}C$)
T_m	: Erime sıcaklığı ($^{\circ}C$)
P	: Basınç (Pa)
ρ_0	: Başlangıç yoğunluğu (kg/m^3)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
C	: Parçacık hızı (m/s)
μ	: Aşırı sıkıştırma katsayısı
γ_0	: Gruneisen katsayısı
S_1	: Eğim katsayısı
S_2	: Eğim katsayısı
S_3	: Eğim katsayısı
a	: Birinci dereceden hacim düzeltmesi
E_i	: İç enerji (J)
e	: Çarpışma katsayısı
V_r	: Geri tepme (m/s)
V_i	: Başlangıç atış hızı (m/s)
R	: Bilya yarıçapı (mm)
u	: Deformasyon derinliği (μm)
E	: Elastisite modülü (GPa)
ν	: Poisson oranı
F	: İmpuls kuvveti (N)
HNO_3	: Nitrik Asit
HF	: Hidroflorik Asit
CrO_3	: Krom Trioksit
D	: Kristalit tane boyutu (nm)
k	: Scherrer sabiti
λ	: X ışını dalga boyu (nm)
β	: FWHM değeri
θ	: Bragg açısı ($^{\circ}$)

δ	: Dislokasyon yoğunluğu
ε	: Mikrogerinim
R_a	Ortalama pürüzlülük (μm)
R_z	: Beş en derin çukur ve tepe ortalaması (μm)

Kısaltmalar

AA	: Aluminum Alloy (Alüminyum Alaşımı)
AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
APD	: Aşırı Plastik Deformasyon
BD	: Bilyalı Dövme
CYM	: Cevap Yüzeyi Metodolojisi
DBH	: En Düşük Bilya Hızı Ortalaması
DEM	: Discrete Element Method (Ayrık Eleman Yöntemi)
EOS	: Equation of State (Durum Denklemi)
FEM	: Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Metodu)
FFT	: Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
FWHM	: Full Width at Half Maximum (Maksimum Yükseklikte Yarı Genişlik)
JC	: Johnson-Cook
KBG	: Kalıntı Basma Gerilmesi
LCF	: Low Cycle Fatigue (Kısa Ömürlü Yorulma)
MKG	: Maksimum Kalıntı Gerilme
OBH	: Ortalama Bilya Hızı
OM	: Optik Mikroskop
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SMAT	: Surface Mechanical Attrition Treatment (Mekanik Yüzey Yıpratma Uygulaması)
UBD	: Ultrasonik Bilyalı Dövme
XRD	: X-Ray Diffraction (X Işını Kırınımı)
YBH	: En Yüksek Bilya Hızı Ortalaması

SMAT İÇİN TİTREŞİM PLATFORMU TASARIMI VE PROSES PERFORMANSININ DENEYSEL VE NÜMERİK ANALİZİ

ÖZET

Mekanik yüzey yıpratma uygulaması (SMAT) beraberinde getirdiği düşük bilya hızları sayesinde mekanik yüzey işlemleri arasında giderek artan bir popüleriteye sahiptir. Bu tez çalışması SMAT için elde edilebilecek en düşük bilya hızları ile maksimum verim elde etmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla tez çalışmasında SMAT prosesi için yeni bir titreşim platformu tanıtılmış ve titreşim analizleri ile çalışma performansı belirlenmiştir. Daha sonra titreşim platformunun frekans ve genliğine bağlı olarak, SMAT prosesi için ortalama dinamik bilya hızları analiz edilmiştir. Burada bulunan ortalama bilya hızlarına göre, tekli darbe sonrası plastik deformasyon mekanizması dinamik sonlu elemanlar yöntemi ile simüle edilmiştir. Deneysel çalışma aşamasında ise, SMAT için tasarlanan titreşim platformu kullanılarak nümerik analizlere göre AA7075-T6 için SMAT deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları, mikroyapı, yüzey topografisi, aşınma ve kalıntı gerilmeler üzerinden detaylı olarak tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: AA7075-T6, FEM, SMAT, Titreşim, Yüzey Topografisi.

DESIGN OF VIBRATION PLATFORM FOR SMAT AND EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF PROCESS PERFORMANCE

ABSTRACT

Surface mechanical attrition treatment (SMAT) is gaining increasing popularity among mechanical surface treatments due to the low shot velocities. This thesis study aims to achieve maximum efficiency with the lowest possible shot velocities for SMAT. For this purpose, a new vibration platform was introduced for the SMAT process in the thesis study, and its performance was determined by vibration analysis. Then, depending on the frequency and amplitude of the vibration platform, the average dynamic shot velocities for the SMAT process were analyzed. According to the average shot velocities found here, the plastic deformation mechanism after a single impact was simulated by the dynamic finite element method. In the experimental study, SMAT experiments were carried out for AA7075-T6 according to numerical analysis using the vibration platform designed for SMAT. The results of the experiments are discussed in detail on microstructure, surface topography, wear, and residual stresses.

Keywords: AA7075-T6, FEM, SMAT, Vibration, Surface Topography.

1. GİRİŞ

Evrendeki her şey belirli bir frekansta titreşim hareketi yapmaktadır. Titreşimler aslında hayatımızın seyrinde farkında olmadan attığımız adımdan, beynimizden geçen düşüncelere kadar her şeyi kontrol etmektedir. Mühendislik bilimleri, temel bilimlerden aldığı teorik yaklaşımları, hayatın işleyişine uyarlama süreçlerini kapsamaktadır. Bu noktada titreşim hareketleri frekans ve genlikler üzerinden tanımlanmaktadır. Titreşimler bulundukları yerlere göre istenen veya istenmeyen hallerde olabilirler. Titreşimden fayda sağlanmak isteniyorsa doğru tasarımın ve kontrol sürecinin doğru mühendislik hesaplarla yapılması hayati önem taşımaktadır. Bu tez çalışması, temelde titreşim hareketine dayalı dinamik ve mekanik bir işleyişi kapsamaktadır. Mühendislik malzemelerine, kullanım alanlarına göre farklılık gösterebilen aşınma, yorulma, korozyon gibi performans özelliklerini artırmaya yönelik farklı yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Mekanik yüzey yıpratma uygulaması olarak dilimize geçen SMAT prosesi de bu yüzey işlemlerinden birisidir. Temelde titreşim hareketinden faydalanarak hız kazanan bilyaların numune yüzeyine rastgele ve tekrarlı olarak çarptırılması işlemidir. Tez çalışmasının amacı bu proses için yeni bir titreşim platformu tasarlamak ve proses performansını en iyi hale getirebilmektir.

Tez çalışmasının 2. Bölümünde SMAT için yeni bir titreşim platformu tasarlanmıştır. Titreşim platformunun hasarsız çalışma koşullarının bulunması için titreşim analizi yapılmıştır. Tasarım aşaması analitik, nümerik ve deneysel yaklaşımları kapsamaktadır. Tez çalışmasının 3. Bölümünde ise SMAT için kritik önem taşıyan bilya hareketleri dinamik olarak analiz edilmiştir. Dinamik analiz için giriş parametreleri 2. Bölümde elde edilen titreşim frekans ve genlik değerlerine bağlı olarak seçilmiştir.

Tez çalışmasının 4. Bölümünde ise 3. Bölümde elde edilen bilya hızlarına bağlı tek darbeli plastik deformasyon mekanizması dinamik sonlu elemanlar yaklaşımı ile analiz edilmiştir. Buna göre farklı bilya çapı ve bilya hızlarına bağlı tekli darbe sonrası kalıntı gerilme profilleri ve plastik deformasyon mekanizması nümerik olarak değerlendirilmiştir. Tez çalışmasının 5. Bölümünde ise bu aşamaya kadar edinilen bulgular ışığında yapılan deneysel çalışmalar yer almaktadır. Deneysel çalışmalar AA7075-T6 için SMAT sonrası yüzey ve yüzey altı mikroyapı incelemelerini, XRD analizini, kalıntı gerilme ve tribolojik testleri kapsamaktadır. Bu bölümde ek olarak

SMAT için geliştirilen çoklu darbe modeli sunulmuş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tezin son bölümü olan sonuç kısmında ise, tez kapsamında yapılan çalışmalar ve elde edilen bulgular özetlenmiş, nümerik ve deneysel yaklaşımlar karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. Ek olarak yapılabilecek potansiyel çalışmalarla ilgili değerlendirmeler yapılmıştır.



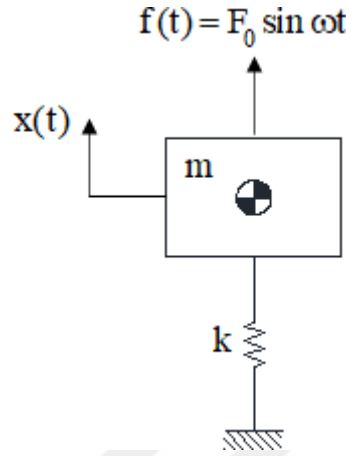
2. TİTREŞİM PLATFORMU TASARIMI VE TİTREŞİM ANALİZİ

2.1. Genel Bilgiler ve Literatür Değerlendirmesi

Bu bölümde SMAT işlemi için tasarlanan ve deneylerde kullanılacak olan titreşim tablası tasarımı detaylı olarak incelenmiştir. SMAT işleminde temel prensip, titreşim etkisiyle titreşim odasında bulunan bilyalara hız kazandırmaktır. Bugüne kadar farklı araştırmacılar farklı titreşim teknikleri kullanarak SMAT düzenekleri tasarlamışlardır. Literatürde en sık olarak kullanılan titreşim platformları ultrasonik titreşim (Chan ve diğ., 2010, Laleh ve Kargar, 2011, Pandey ve diğ., 2015, Sun ve diğ., 2017, Sun ve diğ., (2018a, 2018b), Tsai ve diğ., 2018, Tsai ve diğ., 2015, Yin ve diğ., 2018) ve mekanik titreşim (Arifvianto ve diğ., 2011, Peng ve diğ., 2019) temelli platformlardan oluşmaktadır. Bunlardan farklı olarak yine titreşim temelli çalışan yüzey nanokristalizasyon makinası (Li ve diğ., 2014, Sun ve diğ., 2008, Wen ve diğ., 2015) ve bilyalı öğütme makinası (Peng ve diğ., 2019), krank-biyel mekanizması (Chamgordani ve diğ., 2018), kullanıldığı görülmüştür. Bu proseste titreşimden faydalanmanın aslında en büyük amacı bilyaları kapalı bir ortamda malzeme yüzeyine tekrarlı olarak çarptırmak ve malzeme yüzeyinden kesite doğru nanokristal bir tabaka ve kalıntı gerilmeler elde etmektir. Burada kontrol edilmesi gereken en önemli parametre bilya hızıdır. Bilya hızı SMAT prosesinin verimliliğini belirleyen en önemli parametredir. Bilya hızı ise doğrudan titreşim platformunun çalışma frekansı ve genliğine bağlıdır. Titreşim frekansı ve genliğinin bilya hızı üzerindeki etkisi farklı araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur (Du ve diğ., 2009).

Titreşim, mekanik bir sistemin tekrarlayan, periyodik veya salınımlı tepkisi olarak tanımlanabilir. Titreşim döngülerinin hızına frekans denir. Sapması olmayan ve düzenli olan ve nispeten düşük frekanslarda meydana gelen tekrarlı hareketlere yaygın olarak salınım denirken, yüksek frekanslarda bile, düşük genlikli ve düzensiz ve rastgele davranışa sahip olmak, genel titreşim sınıfına girer. Titreşimler bir tür tahrik yoluyla bir sisteme uygulanabilir. Tahrik kuvvetleri, dinamik sistem içinde dahili veya harici bir kaynak yoluyla aktarılabilir. Dışarıdan uygulanan zorlayıcı tahrik yoluyla oluşan sistemler zorlanmış titreşimler olarak sınıflandırılır. Titreşen bütün fiziksel sistemlerde sürtünme ve sönümlenme etkisi az da olsa vardır. Bu yüzden sistem hareketinin, homojen çözümden gelen kısmı zamanla yok olur. Kısa bir süre sonra, sistem zorlama kuvvetinin

frekansında titreşir (De Silva, 2006, Geradin ve Rixen, 2015). Şekil 2.1’de sönümsüz zorlanmış bir sistemin modeli verilmiştir (Karabay, 2017).



Şekil 2.1. Tek serbestlik dereceli sönümsüz serbest titreşim modeli

Bu tek serbestlik dereceli sistem üzerine ω zorlama frekansında F_0 zorlama genliğinde harmonik bir kuvvet etki etmektedir. Newton’un ikinci yasasına göre bu sistemin hareket denklemi Eşitlik (2.1) ve Eşitlik (2.2)’deki gibi ifade edilebilir ve sistemin doğal frekansı Eşitlik (2.3)’e göre hesaplanabilir:

$$m\ddot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (2.1)$$

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = \frac{F_0}{m} \sin \omega t \quad (2.2)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.3)$$

Burada m (kg) kütle, k (N/mm) yay sabitidir. Bu ikinci mertebeden diferansiyel denklemin genel çözümü, Eşitlik (2.4)’te verildiği gibi homojen ve özel çözümlerin toplamı olarak ifade edilebilir:

$$x(t) = x_h(t) + x_o(t) \quad (2.4)$$

Buradan homojen çözüm Eşitlik (2.5)'te verildiği gibi başlangıç koşullarına bağlı olarak elde edilebilir:

$$x_h(t) = A \sin \omega_n t + B \cos \omega_n t \quad (2.5)$$

Özel çözüm ise Eşitlik (2.6)'da verilen zorlama tipinde bir çözüm olarak kabul edilebilir:

$$x_o(t) = X \sin \omega t \quad (2.6)$$

Bu çözümün türevleri $\dot{x}(t) = \omega X \cos \omega t$, $\ddot{x}(t) = -\omega^2 X \sin \omega t$ alınarak Eşitlik (2.2)'de verilen diferansiyel denklemde yerine konulur ve Eşitlik (2.7) elde edilir:

$$-\omega^2 X \sin \omega t + \omega_n^2 X \sin \omega t = \frac{F_0}{m} \sin \omega t \quad (2.7)$$

Buradan matematik işlemler sonrası;

$$X = \frac{F_0 / k}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \quad (2.8)$$

Eşitlik (2.8) elde edilmiş olur. Homojen ve özel çözümleri toplamı şeklinde ifade edilebilen genel çözüm ise Eşitlik (2.9)'da görüleceği üzere:

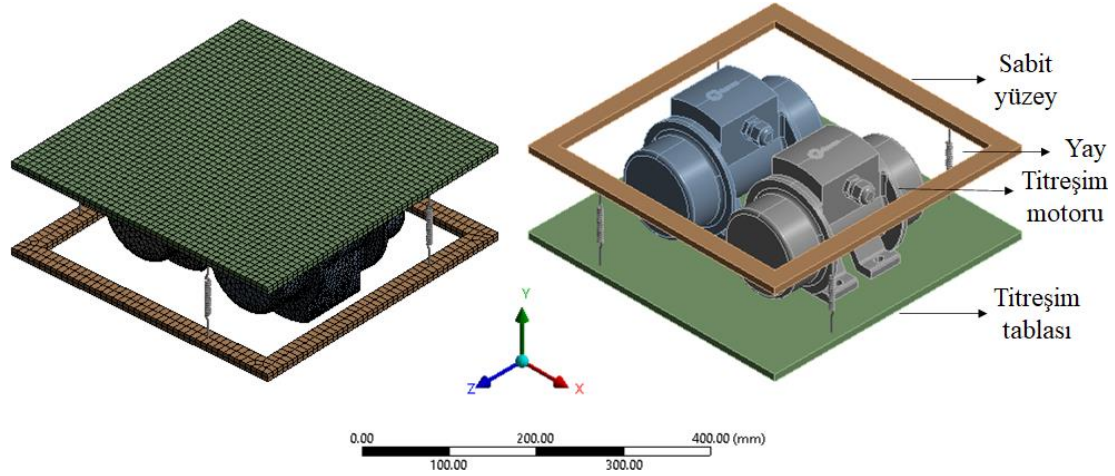
$$x(t) = A \sin \omega_n t + B \cos \omega_n t + \frac{F_0 / k}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \sin \omega t \quad (2.9)$$

olarak bulunabilir. Burada ω_n sistemin doğal frekansını ifade etmektedir. İlk iki terim, A ve B, doğal frekansta meydana gelen salınımı göstermektedir. Zorlayıcı tahrik frekansı, doğal frekans ile çakıştığında, sistem artan genlikle daha güçlü bir şekilde yanıt verecektir. Bu durum rezonans olarak bilinir ve ilişkili frekansa rezonans frekansı denir.

Titreşimler kullanım yerlerine göre kaçınılan veya arzu edilen durumlarda olabilir. Birçok mühendislik sistemi için, rezonans frekanslarında yıkıcı etkileri sebebiyle işlem yapılmak istenmez. Rezonans titreşimlerin bastırılması veya ortadan kaldırılması ve istenen formların ve iyi titreşim seviyelerinin üretilmesi, titreşim mühendisliği açısından oldukça önem arz etmektedir. Buradan hareketle tasarlanacak olan sistemin doğal frekans değerlerini tespit etmek oldukça önemlidir. Rezonans frekanslarının belirlenmesi, sistemin çalışma koşullarını belirlemeye yardımcı olacak ve sistemin sürekliliğini sağlayacaktır. Tez kapsamında titreşim tablasının doğal frekans değerleri hem analitik hem de nümerik çözümlerden faydalanılarak bulunmuştur. Ayrıca titreşim motorlarının yarattığı kütle dengesizliği sisteme etki ettirilmiş ve frekans cevap analizi yöntemi ile tablada meydana gelen yer değiştirme (genlik), hız ve ivme grafikleri elde edilmiştir. Nümerik ve analitik çözümler sırasıyla ANSYS ve MATLAB kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca titreşim tablasının imalatı sonrası deneysel modal analiz yöntemleri kullanılmış ve sonuçlar nümerik ve analitik yöntemlerle karşılaştırılmıştır.

2.2. Titreşim Tablasının Sonlu Elemanlar Modeli

Şekil 2.2’de SMAT için tasarlanan titreşim platformunun üç boyutlu modeli verilmiştir. Buna göre sistem kütle dengesizliği prensibine dayalı olarak çalışan 2 adet titreşim motorundan, 1 adet titreşim tablasından ve toplamda 8 adet yaydan oluşmaktadır. Titreşim motorlarından her birisi çalışma esnasında hem rotasyonel hem de eksenel olarak titreşim üretmektedir. SMAT prosesinin daha verimli olarak gerçekleşmesi için titreşim hareketinin eksenel yönde oluşması gerekmektedir. Bu sebeple aynı anda iki titreşim motorunun da dönüş yönleri birbirine zıt olarak ayarlanmış ve böylelikle rotasyonel titreşim hareketlerinin birbirini sönmülemesi sağlanabilmiştir. Her bir titreşim motoru tam kütle dengesizliği ayarından sonra toplamda 785 N’luk bir santrifüj kuvvet üretmektedir. Proses esnasında her iki titreşim motoru da birlikte çalışıyor olacağından toplamda 1570 N’luk bir santrifüj kuvveti elde edilmiş olacaktır. Titreşim motorları, titreşim tablasının altına Şekil 2.2’de gösterildiği gibi sabitlenmiştir. Titreşim tablası ise kendi içinde birbirine seri bağlı ikişer yay ve toplamda tablanın 4 köşesinde olacak şekilde paralel bağlı 4 adet yay grubundan oluşmaktadır. Her bir yayın yay katsayısı 45 N/mm olarak seçilmiştir.



Şekil 2.2. Üç boyutlu titreşim tablası modeli

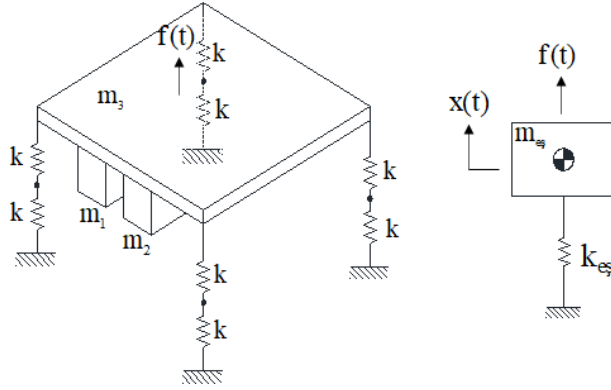
Şekil 2.2’de titreşim tablası için oluşturulan adaptif ağ yapısı gösterilmektedir. Yayların bağlı bulunduğu alt yüzey sabit olarak kabul edilmiştir. Titreşim tablasının sonlu elemanlar modeli toplamda 120336 eleman ve 276865 düğüm noktasından oluşmaktadır. Tablo 2.1’de sistemi oluşturan elemanlar için kullanılan izotropik malzeme modeli verilmiştir.

Tablo 2.1. İzotropik elastik malzeme modeli

Malzeme	Yoğunluk (g.cm ⁻³)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Hacim Modülü (GPa)	Kayma Modülü (GPa)
Yapısal Çelik	7,85	200	0,30	166	76,9
Alüminyum	2,77	71	0,33	69,6	26,6

Şekil 2.3’te titreşim tablasının titreşim modeli ve bu modelin indirgenmiş hali gösterilmiştir. Yayların taşıdığı titreşim tablası $m_3 = 4,43kg$ ve titreşim motorlarının toplam kütlesi ise $m_1 + m_2 = 12,46kg$ ’dir. Yayların taşıdığı toplam eşdeğer kütle $m_{eş} = 16,89kg$ olarak bulunur. Yayların seri ve paralel bağlı olma durumları göz önüne alınarak eş değer yay katsayısı ise $k_{eş} = 90N/mm$ olarak hesaplanmıştır. Titreşim

tablasının indirgenmiş modeli analitik hesaplamaları yapmak üzere MATLAB programında kullanılmıştır.



Şekil 2.3. Titreşim tablası için titreşim modeli

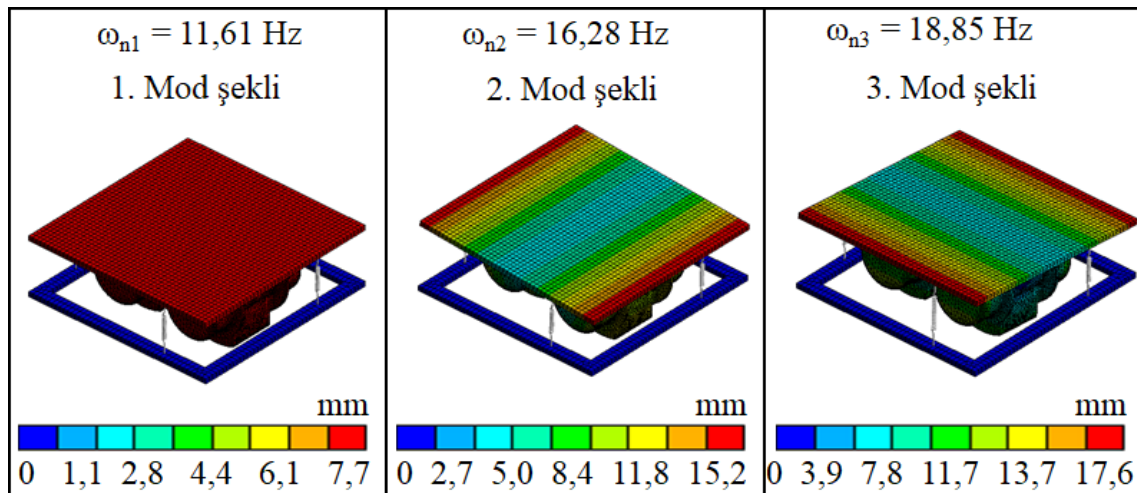
2.3. Modal Analiz

Modal analiz, bir sistemin doğal frekansları, sönüm faktörleri ve mod şekilleri biçimindeki doğal dinamik özelliklerini belirlemek ve bunların dinamik davranışını matematiksel bir model ile formüle etmek için kullanılan analiz türüdür. Bu matematiksel model, sistemin modal modeli olarak adlandırılır ve sistemin dinamik karakteristiklerine ilişkin bilgiler verir. Bir yapının dinamik özellikleri, frekans ve konuma göre fiziksel olarak ayrıştırılabilir. Modal analiz, doğrusal olarak zamanla değişmeyen dinamik bir sistemin titreşim tepkisinin, doğal titreşim modları olarak adlandırılan bir dizi basit harmonik hareketin doğrusal kombinasyonu olarak ifade edilebileceği gerçeğine dayanmaktadır. Bu kavram, karmaşık bir dalga biçimini temsil etmek için, sinüs ve kosinüs dalgalarının Fourier kombinasyonunun kullanımına benzer. Doğal titreşim modları, dinamik bir sisteme özgüdür ve tamamen fiziksel özellikleri (kütle, rijitlik, sönümleme) ve bunların boyutsal dağılımları tarafından belirlenir. Her mod; doğal frekans, modal sönümleme faktörü ve karakteristik yer değiştirme modeli (mod şekli) gibi modal parametreler aracılığı ile tanımlanabilir. Mod şekli gerçek veya karmaşık olabilir. Her bir mod şekli bir doğal frekansa değeri karşılık gelir. Her bir doğal modun genel titreşime katılım derecesi, hem tahrik kaynaklarının özellikleri hem de sistemin mod şekilleri tarafından belirlenir (He ve Fu, 2001).

Modal analiz hem teorik hem de deneysel teknikler uygulanarak yapılabilmektedir. Teorik modal analiz, kütlesi, rijitliği ve sönümleme özelliklerini içeren dinamik bir

sistemin fiziksel modeli oluşturularak yapılabilir. Elde edilen kısmi diferansiyel denklemin çözümü, sistemin doğal frekanslarını, mod şekillerini ve zorlamalı titreşim tepkilerini verecektir. Bununla birlikte, sistemin daha gerçekçi bir fiziksel modeli kütle, rijitlik ve sönüm matrisleri gibi boyutsal dağılımlar çıkarılarak elde edilebilir. Bu matrisler, sistemin diferansiyel hareket denklemlerine dahil edilir. Bir lineer dinamik sistemin süperpozisyon ilkesi, bu denklemleri tipik bir özdeğer problemine dönüştürmemizi sağlar ve çözümü, sistemin modal verilerine ulaşmamızı sağlar. Modern sonlu elemanlar analizi, hemen hemen her doğrusal dinamik yapının ayrıklaştırılmasına olanak sağlar ve dolayısıyla teorik modal analizin kapasitesini ve kapsamını büyük ölçüde geliştirmiştir. Öte yandan, son yıllarda artan veri toplama ve işleme yeteneklerinin hızlı gelişimi, modal test olarak bilinen analizin deneysel alanında büyük ilerlemelere yol açmıştır (He ve Fu 2001). Buradan hareketle titreşim tablasının modal analizi hem sonlu elemanlar metodu ile hem de modal test yöntemi uygulanarak hesaplanmıştır.

Titreşim tablasının modal analizi ANSYS/Modal Analysis modülü kullanılarak yapılmıştır. Şekil 2.4, titreşim tablası için elde edilen doğal frekans ve mod şekillerini göstermektedir. Buna göre doğal frekanslar sırasıyla 11,61, 16,28 ve 18,85 Hz olarak bulunmuştur. Birinci mod şekli incelendiğinde maksimum 7,7 mm’lik bir deplasman oluşacağı görülmektedir. İkinci mod şeklinin elde edildiği doğal frekans olan 16,28 Hz değerinde ise maksimum 15,2 mm’lik bir yer değiştirme olacağı görülmektedir. Son olarak 3. mod şekli incelendiğinde ise maksimum 17,6 mm’lik bir yer değiştirme olacağı hesaplanmıştır.



Şekil 2.4. Doğal frekans tayini ve elde edilen mod şekilleri

Görüldüğü üzere titreşim tablası için toplam da 3 adet doğal frekans değeri hesaplanmıştır. Gerçekçi bir model için toplam serbestlik derecesi binlerce de olabilir ve bu da o kadar çok doğal frekans değeri olduğu anlamına gelmektedir. Sistemin titreşimi üzerinde her doğal frekans değeri aynı etki düzeyine sahip olmayabilir. Genellikle yüksek frekans modları ihmal edilebilir. Ayrıca her bir mod şekli, dinamik yük altında yapının deformasyonuna aynı seviyede etki etmeyebilir. Bu durumda sistem üzerinde gerçekçi ve anlamlı etkiye sahip modların bulunması gerekmektedir (De Domenico ve Ricciardi 2019, Gontier ve diğ., 2006, Mohanty ve Rixen 2004, Nieto ve diğ., 2018, Park ve Oh, 2018). Tablo 2.2’de titreşim tablası modları için oluşturulan mod katılım faktörü ve efektif kütle değerleri verilmiştir. Mod katılım faktörü ve efektif kütle, her mod için her bir yönde hareket eden kütle miktarını gösteren sayısal bir değerdir. Bir yöndeki yüksek değer, modun o yöndeki kuvvetler tarafından uyarılacağını göstermektedir. Buna göre titreşim tablası için X, Y ve Z yönlerine göre ayrı ayrı hesaplanan katılım faktörü ve efektif kütle değerleri Tablo 2.2’de verilmiştir. Efektif kütlelerin toplam kütleyle oranı 1’e yaklaştıkça, o mod değerinin etki düzeyinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

Tablo 2.2. Modal analiz için elde edilen yönlere bağlı katılım faktörü tablosu

Yön	Mod	Frekans	Periyot	Katılım Faktörü	Oran	Efektif Kütle	Efektif Kütle/Toplam Kütle
X	1	11,61	0,08	0,45E-06	0	0,20E-16	0,11E-14
	2	16,28	0,06	0,14E-07	0	0,21E-15	0,12E-13
	3	18,85	0,05	-0,27E-08	0	0,74E-17	0,41E-15
Y	1	11,61	0,08	0,13	1	0,016	0,94
	2	16,28	0,06	0,28E-03	0,002	0,83E-07	0,46E-05
	3	18,85	0,05	0,45E-06	4,0E-06	0,20E-12	0,11E-10
Z	1	11,61	0,08	-0,81E-06	0,7E-04	0,66E-12	0,36E-10
	2	16,28	0,06	-0,15E-06	0,1E-04	0,23E-13	0,13E-11
	3	18,85	0,05	0,64E-06	0,5E-04	0,41E-12	0,23E-10

Tablo 2.2’de Y yönünde ve birinci mod değerinde katılım faktörü ve efektif kütlelerin toplam kütleyle oranı sırasıyla 0,13 ve 0,94 olarak bulunmuştur. Diğer yönlerde ve mod

şekilleri incelendiğinde ise anlamlı bir etki seviyesinin oluşmadığı ön görülmektedir. Buradan titreşim tablası için 11,61 Hz frekans değerinin sistemin doğal frekans değeri olduğu anlaşılmaktadır. Sistemin doğal frekansı Eşitlik (2.3)'e göre hesaplandığında ise 11,61 Hz değeri bulunmaktadır.

2.4. Frekans Cevap Analizi

Titreşim tablası için modal analiz yapılarak sistemin doğal frekansları ve oluşması beklenen mod şekilleri belirlenmiştir. Modal analiz sistemin rezonans frekanslarının ne olduğunu göstermektedir. Rezonans frekansları, modelin şekline ve yalnızca kısıtlanma özelliklerine göre değişebilir. Ancak sistemin yük altında ve çalışma esnasında vereceği frekans cevapları bilinmelidir. Frekans cevap analizi sistemin çalışacağı frekans aralığındaki kararlı durum titreşimini belirlemek için yapılır (Thorby, 2008). Frekans cevap analizinin yaygın bir kullanımı, frekansın bir fonksiyonu olarak titreşim seviyesini yer değiştirme, hız veya ivme üzerinden belirleyebilmektir. Bu, hangi frekansların en fazla titreşime neden olduğunu belirlemek için kullanılmaktadır. Titreşim tablasının çalışma koşullarına bağlı frekans cevap analizi ANSYS/Harmonic Response modülü kullanılarak yapılmıştır. Frekans cevap analizi, yer değiştirme cevabının belirli bir frekans aralığı ile yapı titreşim kuvvetini hesaplamak ve sistemin dinamik yanıtı ve uyarma frekansı eğrisini elde etmek için kullanılır (Çeçen ve Aktas, 2021, Gurve ve Satankar, 2022, Hatch, 2001, Khot ve Yelve, 2011, Wang ve diğ., 2014). Belirli bir yapının farklı frekanslar altında çeşitli harmonik yüklere dayanabileceği ve ne tür tepkiler vereceğinin bilinmesi oldukça önemlidir. Klasik mekanik teorisine göre harmonik tepki analizinin genel denklemi Eşitlik (2.10)'da görüleceği gibi:

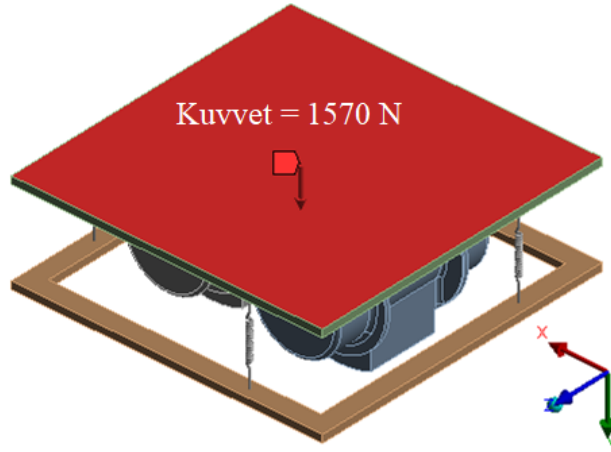
$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (2.10)$$

şeklindedir. Burada, $[M]$ kütle matrisi; $[C]$ sönüm matrisi; $[K]$ rijitlik matrisi; x yer değiştirme vektörü; $\dot{x}$ hız vektörü; $\ddot{x}$ ivme vektörü ve F kuvvet vektörü ; $F = F_0 \cos \omega t$ 'dir. Bir harmonik analizde, yapının yükleme ve tepkisinin harmonik (döngüsel) olduğu varsayılır ve Eşitlik (2.11) elde edilir:

$$\begin{aligned}\{F\} &= \{F_{max} e^{j\psi}\} e^{j\Omega t} \\ \{X\} &= \{X_{max} e^{j\phi}\} e^{j\Omega t}\end{aligned}\quad (2.11)$$

Burada açısal zorlayıcı frekans Ω , yüklemenin meydana geldiği frekanstır. Farklı yükler farklı fazlarda uyarılırsa bir kuvvet fazı kayması ψ , sönümlere veya bir kuvvet fazı kayması mevcutsa bir yer değiştirme fazı kayması ϕ oluşabilir.

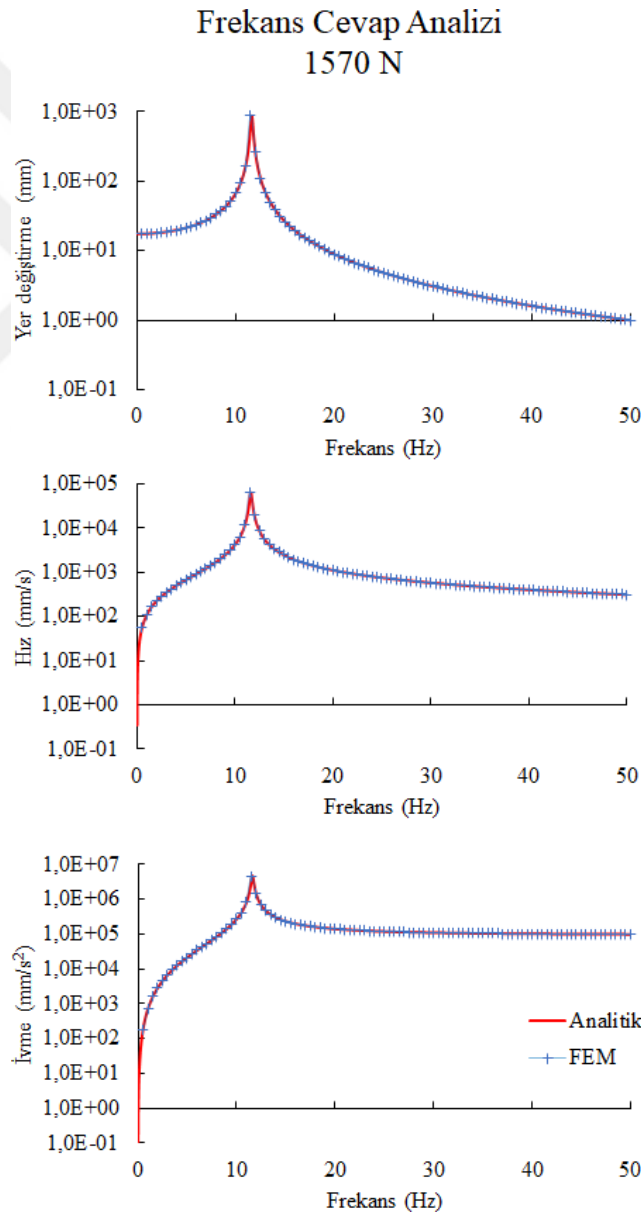
Modal analizde elde edilen sonuçlar kullanılarak ve Şekil 2.5'te görüldüğü gibi titreşim motorlarının sisteme etkiyeceği santrifüj kuvvetler tatbik ettirilerek frekans cevap analiz tasarımı yapılmıştır. Titreşim motorlarından gelen santrifüj kuvvet toplam 1570 N'dur. Harmonik cevap analizi için modal süperpozisyon yöntemi seçilmiştir. Bu yöntem hem serbest titreşim hem de zorlanmış titreşim problemlerine uygulanabilir. Burada temel fikir, hareket denklemlerini ayırmak için serbest titreşim modu şekillerini kullanmaktır. Birleştirilmemiş denklemler, mod koordinatları adı verilen yeni değişkenler cinsindendir. Modal koordinatlar için çözüm, her bir denklemin bağımsız olarak çözümü sonrası elde edilebilir. Modal koordinatların süperpozisyonu daha sonra asıl denklemlerin çözümünü verir.



Şekil 2.5. Harmonik analiz için titreşim tablasının üç boyutlu modeli

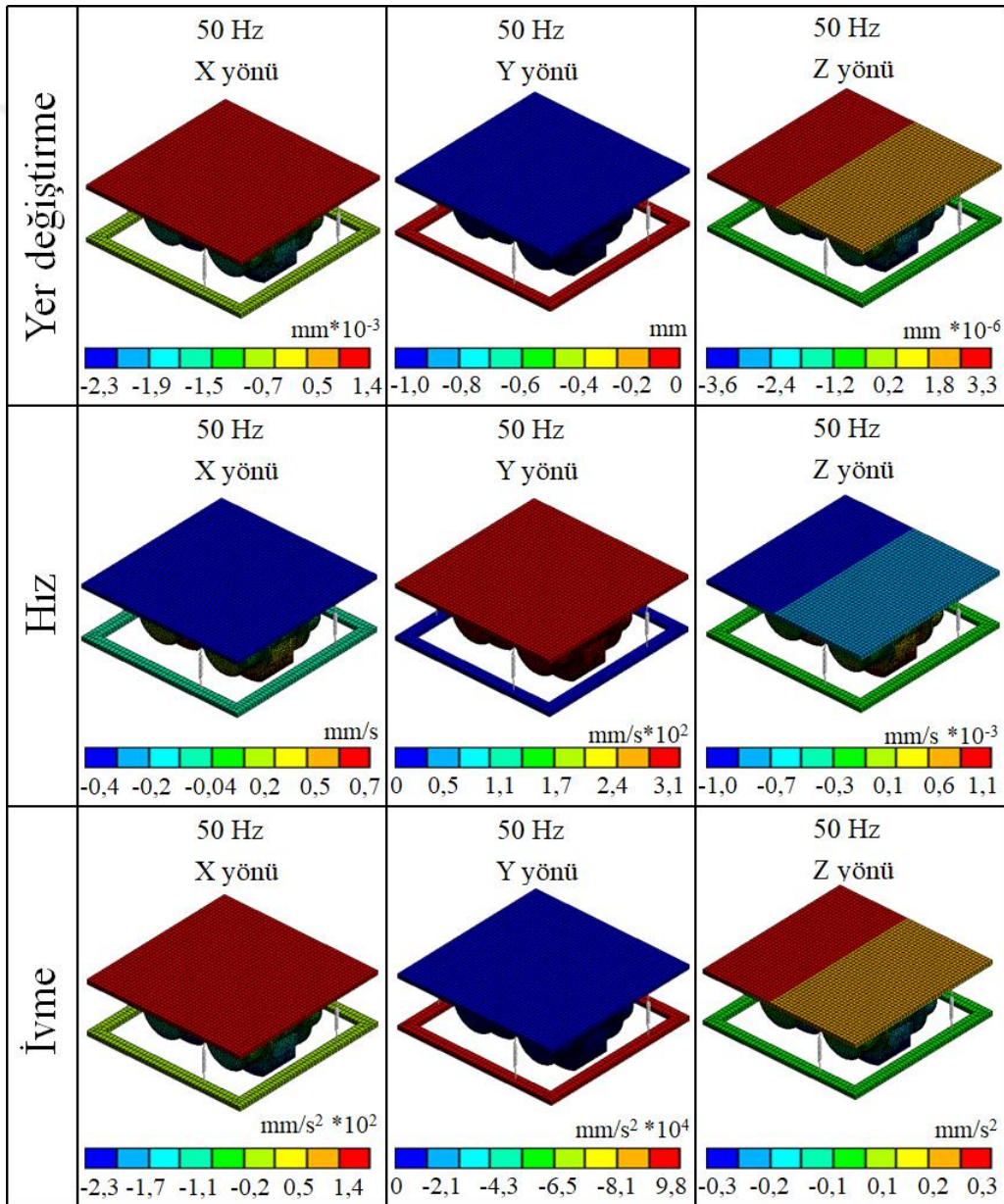
Harmonik analiz sonrası elde edilen frekans cevap grafikleri Şekil 2.6'da verilmiştir. Burada verilen sonuçlar ANSYS ve MATLAB kullanılarak elde edilmiştir. Titreşim tablasının, titreşim motorlarının çalışma frekansı olan 0 – 50 Hz aralığındaki yer değiştirme, hız ve ivme grafikleri verilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile ulaşılan

sonuçların analitik yöntemle elde edilenlerle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Burada frekans cevabı, sistemin tahrik frekansında oluşacak yer değiştirme, hız ve ivme değerlerini göstermektedir. Görüldüğü üzere titreşim genliğinin, rezonans frekansı olan 11,61 Hz’de 877 mm değerine kadar çıkabileceği görülmektedir. Titreşim motorlarının tahrik frekansı bu değere yakın olduğunda sistem çalışırken hasara uğrayacaktır. Modal analiz sonrası yapılan katılım faktörü analizi de bu sonucu doğrular niteliktedir. Modal analiz sonrası bulunan diğer doğal frekans değerlerinde (16,28 Hz ve 18,85 Hz) herhangi bir rezonans durumu söz konusu değildir. Öte yandan nümerik ve analitik çözümler için elde edilen grafiklerin aynı olduğu görülmektedir.



Şekil 2.6. Frekans cevap analizi grafikleri

Öte yandan SMAT için hedeflenen 50 Hz tahrik frekansında sistemin hasara uğramadan çalışabileceği görülmüştür. Şekil 2.7’de 50 Hz tahrik frekansında titreşim platformunun yönlere bağlı yer değiştirme, hız ve ivme görselleri verilmiştir. X ve Z yönlerinde ihmal edilebilir seviye de frekans cevaplarının olduğu görülmektedir. Ancak Y yönünde 1.0 mm seviyesinde bir titreşim genliğinin oluşacağı öngörülmektedir. Bu değer bilinmesi oldukça önemlidir. SMAT deneylerinde sistemin çalışma koşullarının bilya hızları üzerindeki etkisi belirleyici bir faktördür. Ayrıca titreşim tablasının 50 Hz’de çalışma hızı ve ivmesi de sırasıyla 0,314 m/s ve 98,67 m/s² olarak bulunmuştur.



Şekil 2.7. Frekans cevap analizi sonrası titreşim tablası için yer değiştirme, hız ve ivme dağılımları

2.5. Titreşim Tablasının İmalatı ve Deneysel Modal Analiz

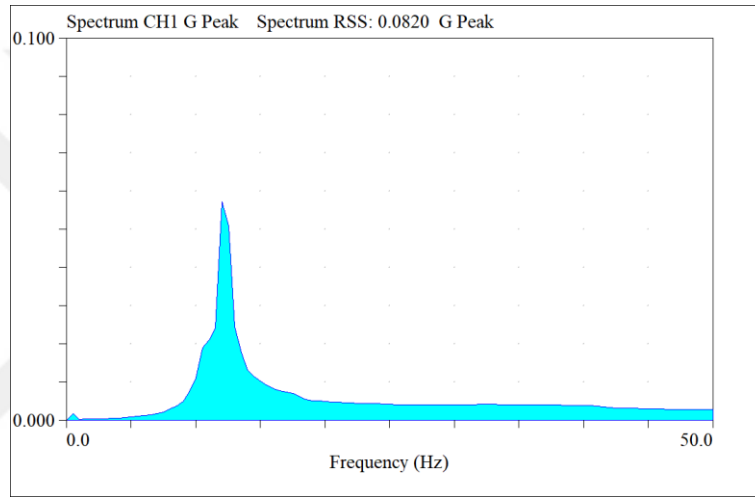
Titreşim platformu modal analiz ve frekans cevap analizi sonrası elde edilen veriler ışığında tasarlanmıştır. Şekil 2.8’de titreşim tablasının tasarım sonrası görüntüsü verilmiştir. Burada SMAT deneyleri için tasarlanan SMAT odacıkları da görülmektedir. Titreşim analizinde bu SMAT odacıklarının kütsel etkileri oldukça küçük olduğundan ihmal edilmiştir. Makinelerin titreşim davranışını değerlendirmek için, genellikle makinenin mekanik yapısındaki doğal frekansları veya bir diğer adıyla rezonans frekansları ölçölmek istenir. Bunu yapmanın klasik yolu, bir çekik veya başka bir titreşim uyarıcısı ile yapıya ölçölü bir kuvvet vermek ve uyarım gerçekleştiği anda yapının tepkisini ölçmektir. Titreşim kuvveti verileri, iki kanal arasındaki aktarım işlevini veya frekans cevap işlevini hesaplayan çift kanallı bir FFT (Fast Fourier Transform) analizörü ile analiz edilebilmektedir.



Şekil 2.8. SMAT için tasarlanan titreşim tablası

Darbe testi (çekik testi), bir makinenin veya yapının doğal frekanslarını belirler. Testin arkasındaki fikir, bir nesne darbeye maruz kaldığında veya tahrik edildiğinde yapının doğal frekans değerlerinde uyarılması beklenir. Yapı darbe nedeniyle titreşirken bir spektrum alınırsa, nesnenin doğal frekanslarını tam olarak belirleyen spektral tepeler oluşur. Bu titreşim yanıtını yakalamak ve rezonans veya doğal frekansları gösteren bir spektrum görüntölemek için bir titreşim analizörü kullanılabilir. Buna göre Şekil 2.9’da

verilen grafik titreşim tablasının bir darbe çekici ile uyarılmasından sonra elde edilmiştir. Ölçümler SKF Microlog MX titreşim analizörü kullanılarak yapılmıştır. Deneysel modal analiz ve frekans cevap analizi için kullanılan titreşim ölçüm parametreleri Tablo 2.3'te verilmiştir. Grafiğe göre titreşim tablasında yaklaşık olarak 11,8 Hz değerinde spektral tepe oluşumu gözlenmiştir. Bu değer analitik ve nümerik çözümlerle elde edilen 11,61 Hz değerine oldukça yakındır ve sistemin doğal frekansıdır. Aradaki yaklaşık %1'lik hata payının tablaya bağlı titreşim odacıklarından ve öngörülemeyen reel koşullardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak, titreşim platformu için yapılan analitik ve nümerik yaklaşımların doğru ve güvenilir olduğu anlaşılmıştır.

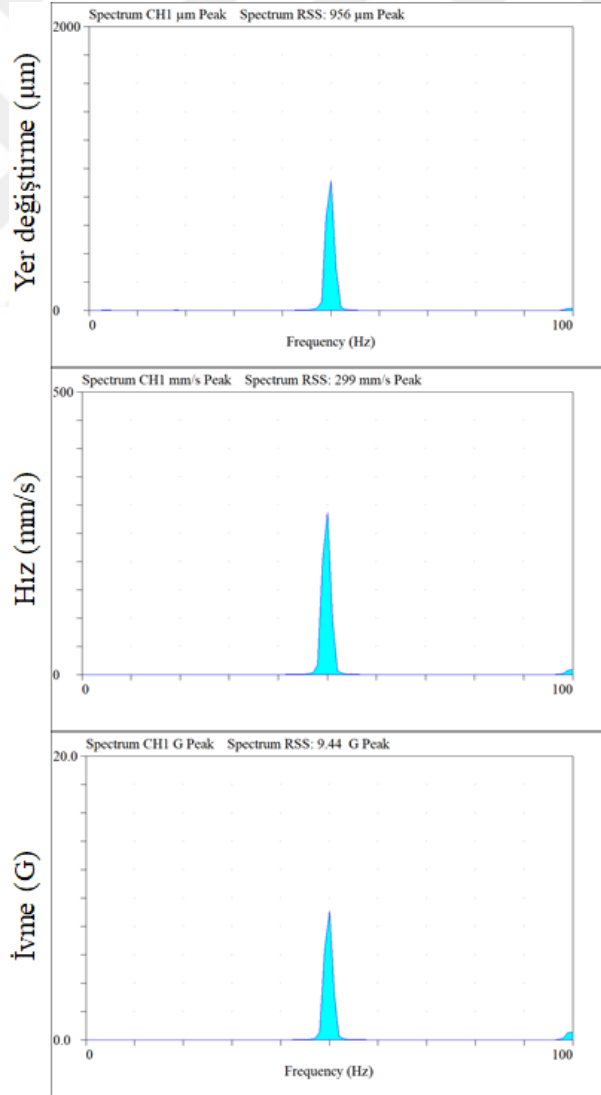


Şekil 2.9. Deneysel modal analiz sonrası doğal frekans grafiği

Tablo 2.3. Modal analiz ve FFT için titreşim ölçüm parametreleri

Özellik	Değer
Sensör tipi	Accel G
Hassasiyet (mV/g)	100
	Disp um
Y eksen birimi	Vel. (mm/s)
	Accel (m/s ²)
X eksen birimi	Hz
Detection	Peak
Filter	2 Hz
Frekans aralığı	100

Şekil 2.10'da ise sırasıyla, titreşim tablasının tam yükle ve 50 Hz'de çalışması esnasında ivme ölçer yardımı ile kaydedilen yer değiştirme, hız ve ivme grafikleri verilmiştir. Şekil 2.10'da verilen titreşim spektrumundaki en yüksek genliğe sahip frekans 50 Hz ve yaklaşık olarak 956 μm seviyesindedir. Titreşim tablasının hızı için verilen titreşim spektrumundaki en yüksek genliğe sahip frekans ise yine 50 Hz ve yaklaşık olarak 0,299 mm/s'dir. Bu değerler teorik ve nümerik yaklaşımlarla elde edilen 1 mm yer değiştirme ve 0,314 mm/s hız değerlerine oldukça yakındır. Şekil 2.10'da verilen 3. grafikte ise titreşim tablasının çalışma esnasında ölçülen ivme grafiği G cinsinden verilmiştir. Titreşim tablasının toplam da 9,44 G'lık bir ivme ile çalışacağı ölçülmüştür. Bu değer yaklaşık olarak 92,6 m/s² değerine denk gelmektedir. Analitik ve nümerik yaklaşımlarla ölçülen titreşim tablasının ivme değeri de 98,67 m/s² olarak bulunmuş idi.



Şekil 2.10. Titreşim tablasının FFT sonrası ölçülen genlik, hız ve ivme grafikleri

Tablo 2.4’te SMAT için tasarlanan titreşim tablasının titreşim analizi sonrası elde edilen analitik, nümerik ve deneysel sonuçlar verilmiştir. Sonuç olarak titreşim analizi yaklaşımının analitik ve nümerik yaklaşımlarla oldukça yakın ve uyumlu sonuçlar verdiği saptanmıştır.

Tablo 2.4. Titreşim analizi sonuçları

Yöntem	Doğal frekans (Hz)	Genlik (mm)	Hız (m/s)	İvme (m/s²)
Deneysel	11,80	0,95	0,299	92,60
Nümerik	11,61	1,00	0,314	98,67
Analitik	11,61	0,99	0,312	98,25

Sonuç olarak tasarlanan titreşim tablasının rezonans frekansında kaçınılarak 50 Hz frekansında çalıştırılabileceği anlaşılmıştır. Titreşim tablasının çalışma esnasında üreteceği deplasman değerinin (genlik) bilinmesi, SMAT için yapılması planlanan bilya hızı analizleri için oldukça önemlidir. Bölüm 3’te burada bulunan frekans ve genlik değerleri bilya hızlarının saptanabilmesi için kullanılmıştır.

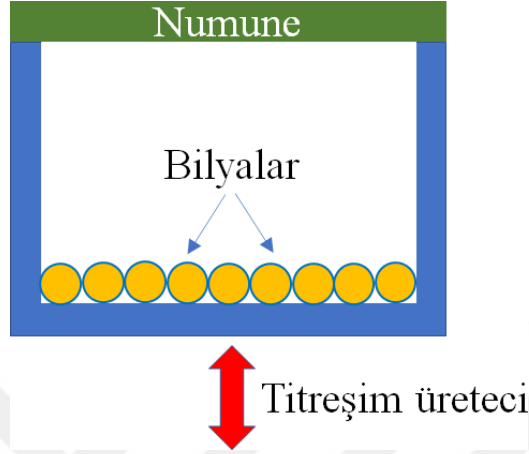
3. TİTREŞİM PARAMETRELERİNİN BİLYA HIZI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DİNAMİK ANALİZİ

3.1. SMAT Prosesinde Bilya Hızları ve Literatür Değerlendirmesi

SMAT metalik malzemelere uygulanan mekanik bir yüzey işlemdir ve şematik görünümü Şekil 3.1’de verilmiştir (Zhou ve diğ., 2018). SMAT işlemi sırasında, titreşim tahriki, kapalı bir odada yüksek kinetik enerjiye sahip çok yönlü küresel bilyaların hareketine neden olur. Bu küresel bilyalar rastgele numune yüzeyine çarpar (Liu ve diğ., 2000, Lu ve Lu, 2004). SMAT işlemi, geleneksel bilyalı dövme (Bagheri ve Guagliano, 2009) ile benzerliklere sahiptir. SMAT (Lu ve Lu, 1999)’te ortalama bilya hızı 1 - 20 m/s arasında iken, bilyalı dövme de (Rakita ve diğ., 2013, Todaka ve diğ., 2004) genellikle 20-100 m/s arasındadır. SMAT uygulamasında, numune-bilya mesafesi, bilya miktarı, titreşim genliği, titreşim frekansı ve odanın geometrisi gibi pek çok farklı faktör bilya hızını etkilemektedir. SMAT işleminde belirlenmesi gereken en önemli parametre aslında bilya hızıdır. Çünkü mikroyapısal ve mekanik özellikler bilya hızına bağlı olarak kontrol edilmektedir. SMAT odasının yüksekliği ve çapı, bilya hızını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle hedef malzemede istenilen mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için doğru hazne tasarımının yapılması önemlidir.

SMAT işlemi, hedef malzemenin yüzeyini ciddi plastik deformasyona maruz bırakarak, nispeten düşük sıcaklıklarda büyük gerilim ve yüksek gerinim oranları nedeniyle ultra ince taneli veya nanoyapı oluşumlarına neden olur (Yarar ve Erturk, 2021, Yarar ve diğ., 2021). Plastik deformasyon mekanizması, ikizlenme, dislokasyon ve tane sınırı kayma mekanizmaları tarafından etkinleştirilir. Dislokasyonlar, dislokasyon sınırları boyunca oryantasyonsuzluğu ve sınırlar arasındaki boşluklar dahil olmak üzere yapısal parametreler açısından ölçülebilen plastik deformasyon mikroyapılarının geliştirilmesinde çok etkilidir (Hughes ve Hansen, 2003, Olugbade ve Lu, 2020). SMAT, dövülmüş yüzeyden derinliğe doğru tane içi oryantasyonsuzluğu artırır (Sun ve diğ., 2017). SMAT’ten etkilenen bölgede kalıntı basma gerilmeleri de meydana gelir (Yarar ve diğ., 2021). Mikro yapının tane inceltilmesiyle ilişkili bu kalıntı basma gerilmeleri, malzemenin yorulma direncini artırarak, yorulma çatlaklarının başlamasını ve yayılmasını geciktirir (Anand Kumar ve diğ., 2012). Ayrıca SMAT, diğer dövme yöntemlerine göre az da olsa malzeme yüzeyinde pürüzlülüğe neden olur. Bu pürüzlülüğün fazlalığı aşınma

direncini olumsuz yönde etkileyerek çatlakların başlamasını ve ilerlemesini hızlandırabilir. SMAT uygulamasında %100 örtme oranı içinde bir zamana ihtiyaç vardır. Örtme oranı, özellikle kalıntı gerilme ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için çok önemlidir (Kang ve diğ., 2010).



Şekil 3.1. SMAT prosesinin şematik görünümü

SMAT işlemlerinde, titreşimin etkisiyle hareketlenen bilyalar hedef malzeme yüzeyine rastgele çarpmaktadır. Ayrıca, bilyalar birbirleriyle ve titreşim odasının iç yüzeyiyle de rastgele olarak çarpışmaktadır. Bu çarpışmaların bir sonucu olarak, her bilyanın hızı, titreşim odası içinde sürekli olarak değişmektedir. Bu nedenle bilya hızının belirlenmesi, özellikle sayısal ve analitik çalışmalarda karmaşık bir olgu haline gelmektedir. Bu nedenle birçok araştırmacı, SMAT'ta bilya hızını belirlemeye çalışırken ortalama hız tanımı yapma gereği duymuştur. Todaka ve diğ. (2004), titreşim odası için 90 μm genlik, 20 kHz frekans ve 10 mm projeksiyon mesafesi parametrelerini kullanmış ve bilya hızının 20 m/s altında olduğunu belirtmişlerdir. Burada projeksiyon mesafesi titreşim odasındaki bilya ile numune arasındaki mesafe olarak tanımlanmaktadır. Chaise ve diğ. (2012), 20 kHz'de çalışan bir piezoelektrik dönüştürücü kullanarak sonotrot genliğini 25 μm ve titreşim odasının yüksekliğini 50 mm olarak belirlemiş ve buna göre bir nümerik model önermiş ve ortalama bilya hızının (OBH) 4 m/s olacağını kaydetmişlerdir. Astaraee ve diğ. (2017), özel olarak tasarlanmış bir deney düzeneğinde sayısal modelde kullanmak üzere titreşim odasındaki OBH'yi 3,6 m/s olarak hesaplamıştır. Yin ve diğ. (2014), çalışmalarında OBH'yi 3,6 m/s olarak varsaymışlardır Manchoul ve diğ. (2018), 32 ve 64 μm ve 20 kHz sabit frekanslı iki farklı genlik için OBH'yi sırasıyla 4 ve 8 m/s olarak belirlemiştir. Sun ve diğ. (2018), daha küçük projeksiyon mesafelerinin daha yüksek

darbe enerjisi ile sonuçlandığını, daha uzak projeksiyon mesafesinin ise düşük darbe enerjisi ile sonuçlandığını bildirmiştir. Bu ve diğer benzer çalışmalar, OBH'nin belirlenmesi için teorik yaklaşımların geçerli olduğunu öne sürmektedir. SMAT'ta titreşim kaynağı tarafından üretilen titreşim sinyali harmonik sinüzoidal fonksiyon biçimindedir ve Eşitlik (3.1)'de ifade edilmiştir.

$$x(t) = A \sin \omega t \quad (3.1)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (3.2)$$

Eşitlik (3.2)'de ise ω açısal frekans, A titreşim genliği, f ise titreşim frekansıdır. Eşitlik (3.1)'de verilen ifadesinin birinci türevi alınırsa Eşitlik (3.3) elde edilecektir.

$$\frac{dx}{dt} = A\omega \cos \omega t \quad (3.3)$$

Buradan, maksimum başlangıç hızı Eşitlik (3.4)'te verilen ifade olarak bulunur:

$$V_{i,\max} = 2A\pi f \quad (3.4)$$

Farklı araştırmacılar SMAT'ta bilya dinamiğini etkileyen faktörleri farklı yöntemler kullanarak incelemişlerdir. Du ve diğ. (2009), titreşim frekansının bilya hızını arttırdığını bildirmiştir. Ayrıca titreşim odasının frekansa bağlı hızını ve bilya hızının değişimini de ortaya koymuşlardır. Pilé ve diğ. (2005), bilya ve sonotrot arasındaki etkileşim için bir model önermiş ve bilya miktarı azaldıkça OBH'nin artabileceğini bildirmişlerdir. Ayrıca artan titreşim genliğinin bilya hızını artırabileceğini, ancak artan etkileşim hızının da harcanan enerjiyi artırabileceğini kaydetmişlerdir. Micoulaut ve diğ. (2007), ultrasonik bilyalı dövmede (UBD) karmaşık bir yapıya sahip olan bilya dinamiklerini anlamak için granüler gaz modeline dayalı Event Driven Dynamics algoritmasını geliştirmiştir. Aynı algoritmaya dayalı olarak, Badreddine ve diğ. (2014), sonotrot genliği, titreşim odası geometrisi, bilya çapının bilya dinamiği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Rousseau ve diğ. (2015), SMAT'ta bilya miktarının yüzey özelliklerini nasıl etkilediğini deneysel ve

sayısal olarak araştırmış ve Ayırık Eleman Yöntemini (DEM) kullanarak OBH'yi belirlemişlerdir. SMAT için sonotrot frekansını 20 kHz, yarı genliğini (0-tepe) 4 mikron ve numune ile sonotrot arasındaki mesafeyi 30 mm olarak seçmişlerdir. Bilya miktarındaki artışın OBH'yi azalttığını belirtmişlerdir.

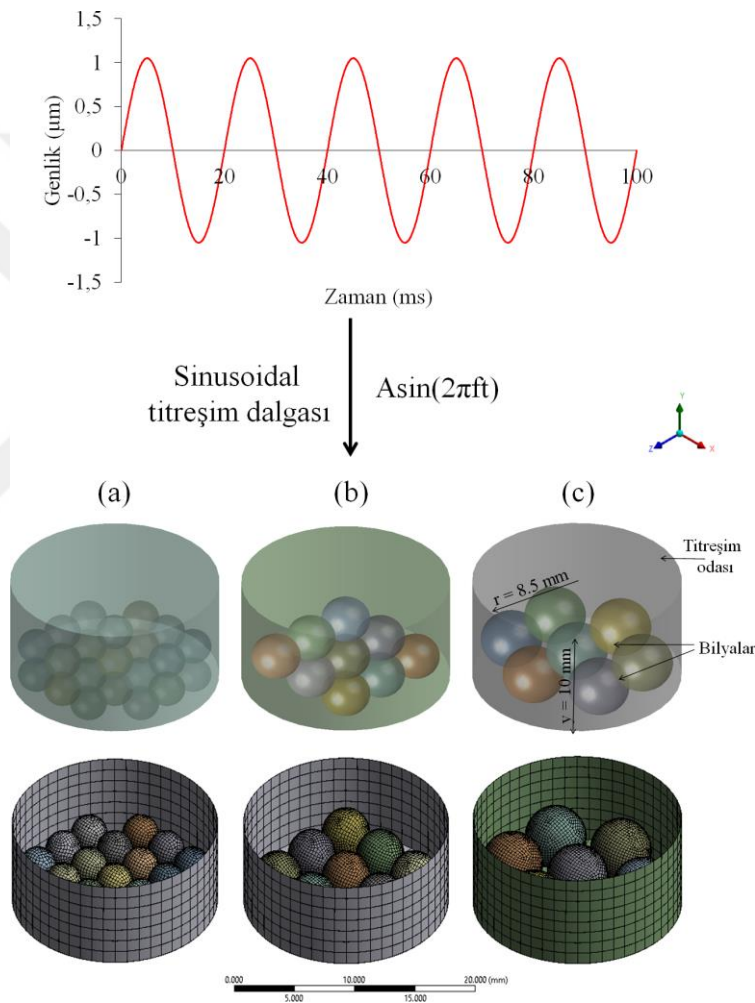
Literatür araştırması, SMAT için atış dinamikleri üzerine sınırlı sayıda çalışma olduğunu göstermiştir. Bu çalışmalar granüler gaz modeline uyarlanmış Event-Driven-Dynamics algoritması ve DEM ile gerçekleştirilmiştir. Bilya hızı, nanokristal tabaka (Bahl ve diğ., 2017, Li ve diğ., 2017, Tsai ve diğ., 2018), yorulma mukavemeti (Gallitelli ve diğ., 2014, Kumar ve diğ., 2017, Pandey ve diğ., 2017), korozyon direnci (Olugbade ve diğ., 2019, Olugbade ve Lu (2019a, 2019b), Olugbade, 2020), aşınma direnci (Chamgordani ve diğ., 2018, Liu ve diğ., 2015, Sun ve diğ., 2008, Wen ve diğ., 2015) vb. gibi SMAT sonuçlarını doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Özellikle sayısal çalışmalar için bilya hızının doğru belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu bölümde, SMAT için geliştirilen titreşim tablasından alınan genlik ve frekans değerlerinin bilya hızını nasıl etkilediği sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılarak araştırılmıştır. Ek olarak deneysel çalışmada kullanılması planlanan farklı bilya boyutu bilya miktarının da bilya hızı üzerindeki etkisini istatistiki olarak değerlendirilmiştir. Bilya hızı analizi ANSYS/AUTODYN açık dinamik çözücü kullanılarak yapılmıştır.

3.2. Dinamik Sonlu Elemanlar Analizi

SMAT, farklı titreşim frekanslarında uygulanan bir işlemdir. Öte yandan, birçok bilya tesadüfen birbirleriyle ve titreşim odasıyla rastgele çarpışır. SMAT işlemindeki bir bilya, titreşim uygulamasının başlangıcında, çarpışmalar ve temaslar nedeniyle titreşim odası içinde sürekli bir enerji aktarımına neden olabilecek kinetik enerji kazanır. ANSYS/Explicit Dynamics modülü, düşük-yüksek hızlı darbeler, karmaşık temas koşulları, yüksek frekanslı dinamik tepki vb. gibi belirli amaçları simüle etmek için tasarlanmıştır. Ayrıca oldukça kısa sürede sayısız çarpışmanın olduğu SMAT işlemi gibi proseslerin simülasyonları için oldukça uygundur. Buna dayanarak, SMAT için bilya dinamiği simülasyonları ANSYS/Explicit Dynamics kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. Sonlu Elemanlar Modeli

Simülasyonlar için tasarlanan titreşim odası, deneysel çalışmalara uygun olarak, kapalı ve içi boş bir silindir ve bilyalardan oluşmaktadır. Silindir ve bilya çapları sırasıyla 8.5 ve 3, 4 ve 5 mm olarak belirlenmiştir. Her farklı bilya çapı için silindirin alt yüzeyi tamamen ve yarı yarıya dolacak şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarım deneysel çalışmalar öngörülerek seçilmiştir. Şekil 3.2’de simülasyonlar için tasarlanan titreşim odacıkları şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Bilya hızı için tasarlanan FEM modelinin üç boyutlu görünümü

Simülasyon süresini azaltmak için hem silindir hem de bilyalar yüzey gövdesi (surface body) olarak tanımlanmıştır. Titreşim odası ve bilyalar paslanmaz çelik malzeme olarak tanımlanmış ve izotropik elastik malzeme modeli kullanılmıştır. Tablo 3.1, paslanmaz çelik için seçilen malzeme özelliklerini göstermektedir. Burada paslanmaz çeliğin

yoğunluğu 7,75 g.cm⁻³, elastisite modülü 193 GPa ve Poisson oranı 0,31'dir. Tüm malzemelerin katılık (stiffness) davranışı tamamen rijit olarak kabul edilmiştir.

Tablo 3.1. Paslanmaz çelik için izotropik elastik malzeme modeli

Yoğunluk (g.cm ⁻³)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı
7,75	193	0,31

Simülasyonlarda her bir bilyanın diğer bilyalarla ve titreşim odası yüzeyleri olan etkileşimi birbirinden ayrı ayrı ve bağımsız olarak tanımlanmıştır. Tüm yüzeyler arasındaki temaslar sürtünmesiz kayan temas olarak seçilmiştir. Yani sürtünmeler ihmal edilmiştir. Sonlu eleman modeli için oluşturulan Quad/Tri ağ yapısına göre eleman boyutu 0,25 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3.2, sonlu eleman modeli için oluşturulan ağ yapısını göstermektedir. Titreşim odasına uygulanacak olan titreşim harmonik sinüzoidal bir fonksiyon olarak tanımlanmış ve yine Şekil 3.2'de sunulmuştur. 2. Bölümde elde edilen titreşim parametreleri bilya hızı analizi için kullanılmıştır. Buna göre titreşim genliği 1.0 mm, titreşim frekansı da 50 Hz olarak belirlenmiş ve tüm simülasyonlarda sabit tutulmuştur. Her analiz için toplam simülasyon süresi yaklaşık olarak 200 ms olarak belirlenmiştir. Bu süre bilyalar arası çarpışmaların düzenli bir rejime girmesi için yeterli olacak şekilde seçilmiştir. Çarpışmalardan sonraki sıcaklık değişimleri ihmal edilmiştir. Tablo 3.2'de, simülasyonlar için seçilen parametreler verilmiştir.

3.3. İstatistiki Analiz

Simülasyon sonuçlarını değerlendirmek ve bilya çapının ve doluluk oranının ortalama bilya hızı üzerindeki etkisini belirleyebilmek için istatistiksel yöntemlerden yararlanılmıştır. Minitab 19 istatistik yazılımı kullanılarak deneysel sonuçları değerlendirmek için cevap yüzeyi metodolojisi (CYM) kullanılmıştır. Model oluşturulurken bilya çapları sürekli faktör olarak tanımlanmıştır. Bağımsız değişkenler ve CYM'deki cevaplar arasındaki ilişki Eşitlik (3.5)'te verilen ikinci dereceden bir polinom modeli ile tanımlanmaktadır:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.5)$$

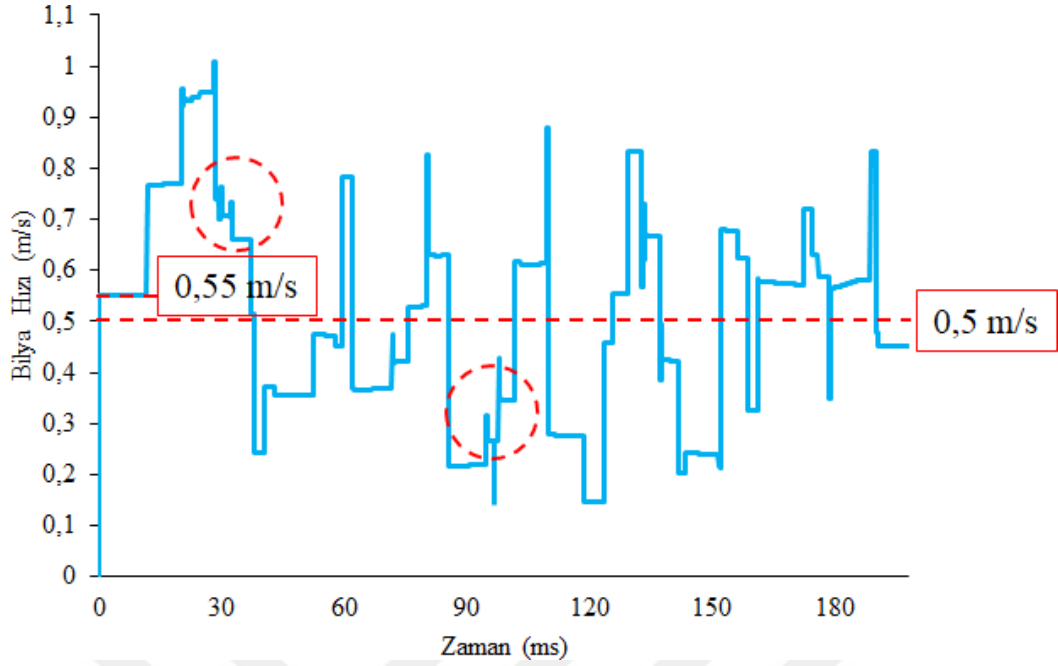
burada y tahmin edilen yanıt, β_0 sabit, β_i , β_{ii} ve β_{ij} sırasıyla lineer, kuadratik ve etkileşim terimlerinin katsayılarını temsil etmektedir. X kodlanmış değişkenleri gösterirken, ε ise hatayı göstermektedir (Nam ve diğ., 2015, Unal, 2016, Yazar ve diğ., 2021).

Tablo 3.2. Simülasyonlar için belirlenen parametreler

Faktörler	Seviye	Değerler
Doluluk Oranı	2	Yarı; Tam
Çap (mm)	3	3; 4; 5
Genlik (μm)	1	1,0
Frekans (Hz)	1	50

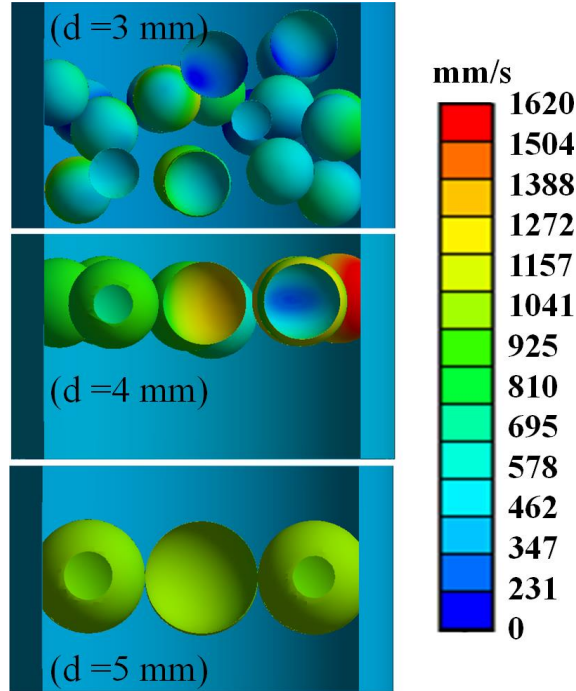
3.4. Bilya Hızı Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

CYM'nin deneysel tasarımına bağlı olarak toplamda 6 ayrı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Çarpışmaların ve titreşimin etkileri nedeniyle simülasyon sırasında bilya hızı sürekli değişmektedir. Şekil 3.3, simülasyon sırasında tek bir bilya için ortaya çıkan hız grafiğini göstermektedir. Bilya hızı, titreşim etkisiyle önce yaklaşık 0,55 m/s'ye ulaşmış ve ilk 10 ms boyunca bu hızı korumuştur. Bu ana kadar diğer bilyalarla veya titreşim odası yüzeyi ile etkileşime girmemiştir. Daha sonra, titreşim odası ve diğer bilyalarla etkileşime girmiş ve bilyanın kazandığı kinetik enerji simülasyon süresi boyunca değişim göstermiş ve böylelikle dalgalı bir hız grafiği elde edilmiştir. Örneğin, bilya 30 ile 40 ms arasında düşük enerjili çarpışmalara maruz kalmıştır. Ancak, bu çarpışmalar bilya hızını önemli ölçüde değiştirememiştir. Bilya, titreşim odasının alt ve üst yüzeyleri ile temas ettiği anlarda yeniden hız kazanmaya devam etmiştir. Böylece bilya hızı profili, görece titreşim odasına uygulanan harmonik sinüs fonksiyonuna benzemiştir. OBH, istatistiksel analizde kullanılmak üzere bu grafiğin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Örneğin Şekil 3.3'te verilen bilyanın ortalama hızı 0,5 m/s olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.3. Bir bilyanın simülasyon boyunca elde edilen hız grafiği

Şekil 3.4'te simülasyon sırasında bilya hızlarının anlık değişimini göstermektedir. Burada her üç bilya çapı için de oluşturulan simülasyon koşullarının görsel temsili verilmiştir. Bu gösterim şekli titreşim odasının boyuna kesiti alınarak elde edilmiştir. Bu sebeple görsel olarak bazı bilya boyutları farklı görünebilmektedir.



Şekil 3.4. Toplam hız dağılımı

Tablo 3.3, tüm simülasyon sonuçlarına göre elde edilen ortalama, en yüksek ve en düşük bilya hızlarını göstermektedir. Burada her bir bilyanın ortalama bilya hızı ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ardından en düşük bilya hızını tanımlamak için, simülasyon süresi boyunca bir bilyanın ulaştığı en düşük ortalama hız kullanılmıştır. En yüksek bilya hızının tespiti için de aynı yöntem uygulanmıştır. Ortalama bilya hızı ise, tüm bilya hızlarının ortalaması alınarak elde edilmiştir.

Tablo 3.3. Tüm SMAT simülasyonları için toplam hız sonuçları

Faktörler		Bilya Hızı (m/s)		
DO	Çap	Ortalama	Yüksek	Düşük
Yarı	3	0,901	1,060	0,823
Yarı	4	0,817	0,855	0,768
Yarı	5	0,722	0,785	0,710
Tam	3	0,501	0,687	0,348
Tam	4	0,744	0,758	0,703
Tam	5	0,791	0,829	0,767

3.5. Varyans Analizi

Tablo 3.4, OBH için varyans analizine göre oluşturulan ANOVA tablosunu göstermektedir. P-değeri %95 güven aralığında (Yarar ve Karabay, 2020) değerlendirildiğinde, her iki faktörün de ortalama hız üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. En yüksek bilya hızı ortalaması (YBH) ve en düşük bilya hızı ortalaması (DBH) için elde edilen ANOVA tabloları ise Tablo 3.5 ve 3.6'da verilmiştir. Tablolar P-değeri üzerinden değerlendirildiğinde varyans analizi sonuçlarının her iki hız tanımı içinde güven aralığının içinde kaldığı görülmektedir. Genelleyecek olursak, CYM'ye göre yapılan deney tasarımı ve analiz sonrasında elde edilen istatistiki veriler bilya çapı ve doluluk oranının OBH, YBH ve DBH için de anlamlı ve tutarlı sonuçlar verdiği ortaya çıkmaktadır.

Tablo 3.4. OBH'nin ANOVA tablosu

Kaynak	SD	Katılım (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Model	4	96,89%	0,266591	0,066648	101,18	0,000
Lineer	2	33,02%	0,090865	0,045433	68,98	0,000
Ç	1	3,35%	0,009229	0,009229	14,01	0,002
DO	1	29,67%	0,081636	0,081636	123,94	0,000
Kare	1	3,89%	0,010705	0,010705	16,25	0,001
Ç*Ç	1	3,89%	0,010705	0,010705	16,25	0,001
2'li etkileşim	1	59,97%	0,165020	0,165020	250,53	0,000
Ç*DO	1	59,97%	0,165020	0,165020	250,53	0,000
Hata	13	3,11%	0,008563	0,000659		
Uyum eksikliği	1	3,11%	0,008563	0,008563	*	*
Saf Hata	12	0,00%	0,000000	0,000000		
Total	17	100,00%				
R ² = 96,89% R ² (adj) = 95,93% R ² (tah.) = 94,42%						

Tablo 3.5. YBH'nin ANOVA tablosu

Kaynak	SD	Katılım (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Model	4	98,13%	0,238978	0,059744	170,46	0,000
Lineer	2	42,71%	0,104005	0,052002	148,37	0,000
Ç	1	5,45%	0,013267	0,013267	37,85	0,000
DO	1	37,26%	0,090738	0,090738	258,90	0,000
Kare	1	1,87%	0,004556	0,004556	13,00	0,003
Ç*Ç	1	1,87%	0,004556	0,004556	13,00	0,003
2'li etkileşim	1	53,55%	0,130417	0,130417	372,11	0,000
Ç*DO	1	53,55%	0,130417	0,130417	372,11	0,000
Hata	13	1,87%	0,004556	0,000350		
Uyum eksikliği	1	1,87%	0,004556	0,004556	*	*
Saf Hata	12	0,00%	0,000000	0,000000		
Total	17	100,00%				
R ² = 98,13% R ² (adj) = 97,55% R ² (tah.) = 96,65%						

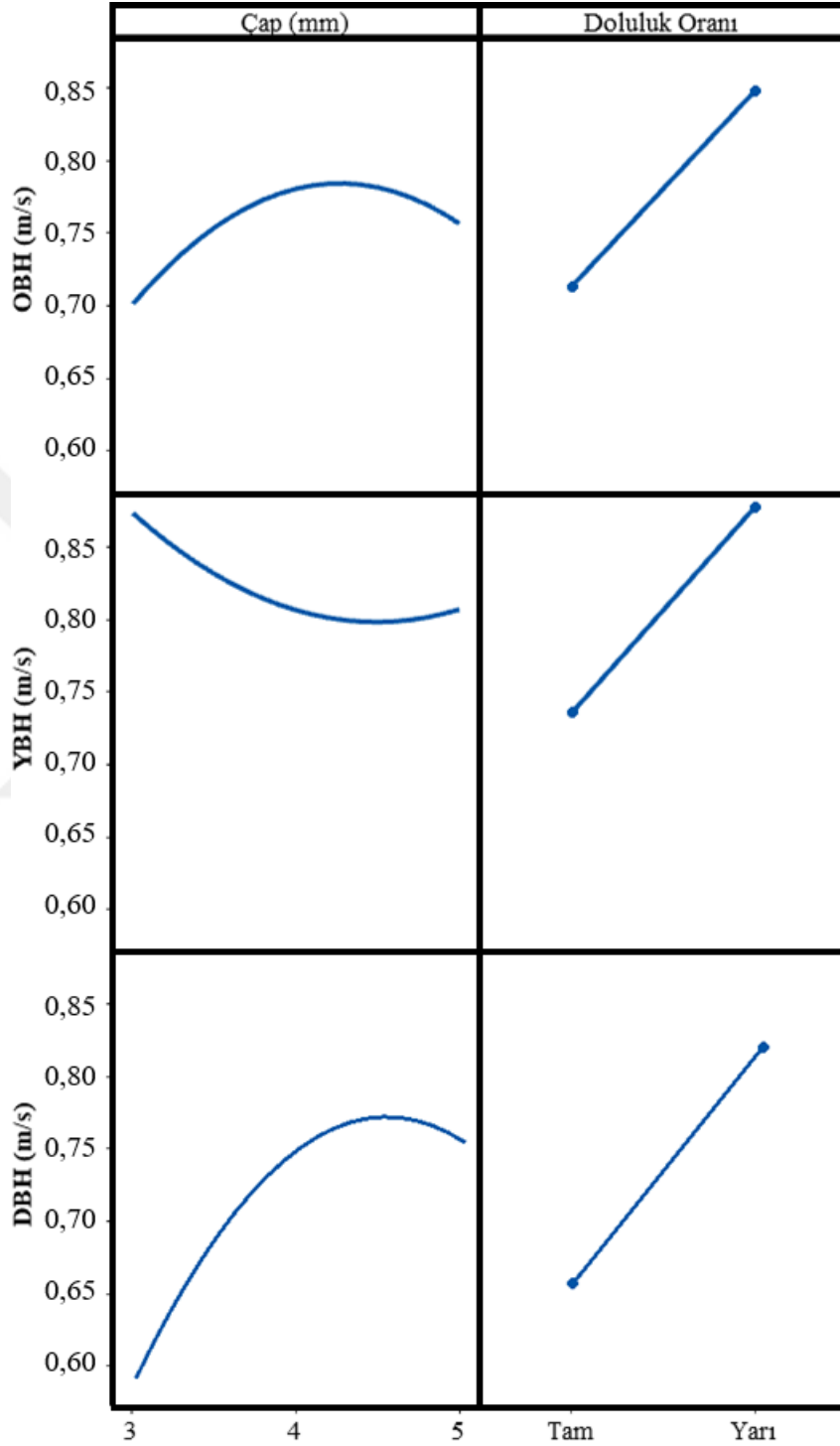
Tablo 3.6. DBH'nin ANOVA tablosu

Kaynak	SD	Katılım (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Model	4	95,28%	0,420516	0,105129	65,63	0,000
Lineer	2	42,31%	0,186727	0,093363	58,29	0,000
Ç	1	15,91%	0,070227	0,070227	43,84	0,000
DO	1	26,40%	0,116500	0,116500	72,73	0,000
Kare	1	4,88%	0,021521	0,021521	13,44	0,003
Ç*Ç	1	4,88%	0,021521	0,021521	13,44	0,003
2'li etkileşim	1	48,10%	0,212268	0,212268	132,52	0,000
Ç*DO	1	48,10%	0,212268	0,212268	132,52	0,000
Hata	13	4,72%	0,020822	0,001602		
Uyum eksikliği	1	4,72%	0,020822	0,020822	*	*
Saf Hata	12	0,00%	0,000000	0,000000		
Total	17	100,00%				
R ² = 95,28% R ² (adj) = 93,83% R ² (tah.) = 91,54%						

3.6. Bilya Hızının Değerlendirilmesi

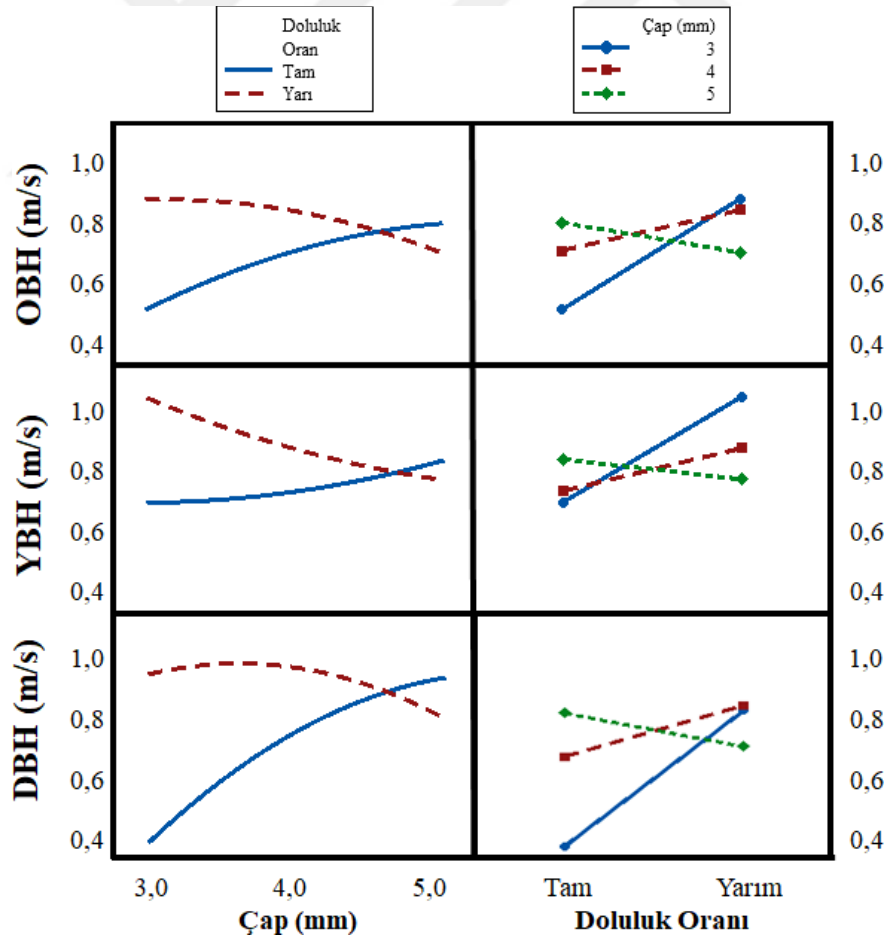
Şekil 3.5, bilya hızları için elde edilen ana etki grafiklerini göstermektedir. Burada OBH dışında YBH ve DBH'de verilmiştir. SMAT prosesinde bilya hızı sürekli değişmektedir ve her bir bilyanın hedef malzemeye hangi hızda çarptığını bilmek oldukça zaman alıcı ve karmaşık bir süreçtir. Bu durum göz önüne alınarak, simülasyon sonuçları değerlendirilirken her bir durumda bilya hızlarının ortalaması alınmıştır, ancak ortalamaya katılan her bir bilyanın ulaştığı en yüksek ve en düşük hızlar için de istatistiki analiz yapılmıştır. Burada amaç, en yüksek ve en düşük bilya hızlarının ortalama değerle arasındaki farkın ne derece de olduğunu anlamaya çalışmaktır. Şekil 3.5'te verilen ana etki grafikleri her durum için ortalama bir değer sunmaktadır. Grafiğe ilk bakışta göze çarpan, doluluk oranının her üç durumda da benzer sonuçlar verdiğidir. Titreşim odasının alt yüzeyi tamamen bilya ile dolu olduğu durumda, bilya hızı yarı dolu duruma göre azalmaktadır. Bir başka deyişle artan bilya miktarı, bilyalar arasındaki etkileşimi artırmış ve bilyaların birbirlerine daha fazla çarpması ve enerji kaybı yaşamasına sebep olmuştur.

Bu da bilya hızını azaltmıştır. Bu sonuç önceki çalışmaları da doğrular niteliktedir (Rousseau ve diğ., 2015).



Şekil 3.5. Bilya hızı (m/s) için ana etki grafikleri a) OBH b) YBH c) DBH

Şekil 3.6’te ise bilya hızları için elde edilen ikili etkileşim grafikleri verilmiştir. Yarı dolu durumda bilya çapı arttıkça bilya hızı azalırken tam dolu durumda ise bilya çapı arttıkça bilya hızının artmaya başladığı görülmektedir. Bu aslında beklenen bir sonuçtur. Öte yandan tam dolu durumda, bilya sayısının bilya hızını artırma eğilimine girdiği görülebilmektedir. Ancak not etmek gerekir ki bu artışın en fazla olduğu değer, yarı dolu durumdaki ortalama bilya hızları ile yaklaşık olarak aynı seviyededir. Artan bilya çapı, titreşim odası geometrisi değişmediğinden, bilyanın titreşim odasının alt ve üst yüzeyiyle daha kısa sürelerde çarpışmasına neden olur. Titreşim motoru tarafından üretilen kinetik enerji, enerji kaybının artmasına izin vermeden bilyalara aktarılabilir. Evvelce yapılan bir çalışmada bu durumun projeksiyon mesafesine bağlı olduğu belirtilmektedir (Sun ve diğ., 2018). Tüm durumlar beraber değerlendirildiğinde bilya hızı yaklaşık olarak 0,5 m/s ile 1 m/s arasında değişmektedir. Bununla birlikte, daha önce belirtildiği gibi, bilya hızı muhtemelen SMAT'taki en belirleyici parametredir. Bu nedenle, düşük etkiler bile proses verimliliği açısından dikkate değerdir.



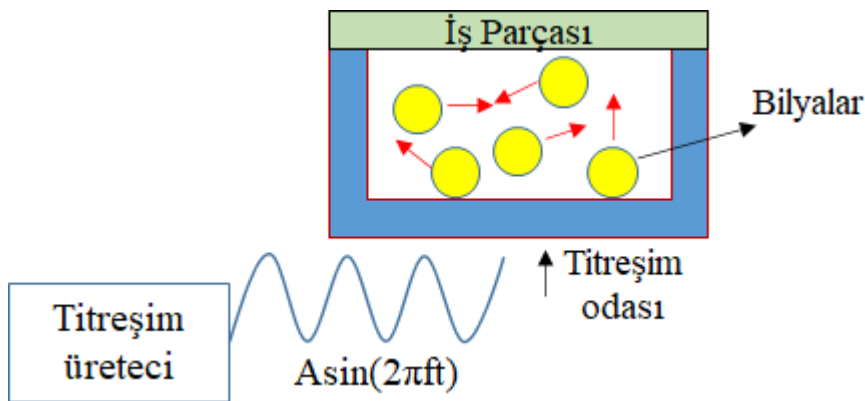
Şekil 3.6. Bilya hızı (m/s) için ikili etkileşim grafikleri a) OBH b) YBH c) DBH

CYM'ye göre OBH için simülasyon sonuçları değerlendirildikten sonra Eşitlik (3.6) verilen regresyon denklemi:

$$OBH(m/s) = -0,158 + 0,442\dot{C} - 0,5364DO_T + 0,5364DO_Y - 0,517\dot{C}^2 + 0,11727\dot{C} * DO_T - 0,11727\dot{C} * DO_Y \quad (3.6)$$

olarak bulunmuştur. Burada $\dot{C}$, bilya çapını, DO_Y titreşim odasının yarı yarıya dolu olduğu durumu ve DO_T titreşim odasının tam dolu olduğu durumu ifade etmektedir. Bir regresyon denkleminin simülasyon sonucunu tahmin etme yeteneği, R^2 ile ifade edilmektedir. Tahmini- R^2 ise, bir regresyon denklemi ile olası diğer gözlemlerin tahmin edilebilme yeteneğini göstermektedir (Erturk ve diğ., 2021, Erturk ve diğ., 2019, Yazar ve diğ., 2021). OBH için R^2 ve R^2 (tah.) değerleri sırasıyla %96,89 ve %94,42'dir (Tablo 3.4). Görüldüğü gibi kurulan modelin simülasyon sonuçlarını tahmin etme başarısı oldukça yüksektir.

SMAT'taki çoklu ve titreşim kaynaklı çarpışmalar, karmaşık bir temas etkileşimi ve karmaşık sistem dinamikleri ile sonuçlanır. Amaç, bilya-bilya ve bilya-oda yüzeyi etkileşimleri için işe yarayabilecek momentumun korunması için genel bir yaklaşım geliştirmektir. Bu analitik yaklaşımlar için, termal etkiler ihmal edilmiştir. Şekil 3.7'de, analitik yaklaşımların şematik bir gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.7. Analitik yaklaşımların şematik gösterimi

Proses süresince her bilya etki-tepki kuvvet çiftleri aracılığıyla başka bir bilya ile etkileşime girer. Ayrıca, her bilya, titreşim odasından gelen titreşim kuvvetlerine maruz

kalır. SMAT'taki çarpışmaların karmaşık detaylarının anlaşılması için temel mekanik modellerle basitleştirilmesi gerekmektedir. Hızı olan bir bilyanın momentumu kütle ve hızın çarpımı ile hesaplanır. Bilya-bilya etkileşim sisteminin toplam momentumu, tekil momentumların vektör toplamıdır. Toplam momentumun zamana göre türevi ise sistem momentumunun zamanla değişimi hakkında bilgi verir. Bir bilyaya etki eden net kuvvet, titreşim odası yüzeyinden veya iş parçasından gelen titreşim kuvvetleri ve sistemdeki tüm diğer bilyalardan kaynaklanan etkileşim kuvvetleri olarak ayrılabilir.

Bilya-bilya etkileşim kuvvetleri, etki/tepki çiftleri halinde gelir ve böylece tüm bilya-bilya etkileşim kuvvetlerinin toplamı sıfır olur. Bir bilyanın net kuvveti, titreşim odası yüzeyi veya iş parçası tarafından sisteme uygulanır. Buraya kadar sistemi göz önünde bulundurarak ulaştığımız sonuca göre, Newton'un ikinci yasasında ortaya konduğu gibi, bilya-bilya etkileşim sistemi için toplam momentumun değişmesi, bilya etkileşim sistemine uygulanan net kuvvete eşittir. Burada önemli olan, SMAT prosesindeki hareketin, bilya-bilya etkileşim kuvvetlerini dikkate almaya gerek kalmadan analiz edilebilmesidir. Ancak net dış kuvvet sıfır değildir, dolayısıyla SMAT prosesi izole bir sistem değildir. Bu nedenle, toplam momentum sabit değildir. Yalnızca Newton'un momentumun korunumu yasası, SMAT sürecini değerlendirmek için yetersizdir. İşlem sırasında, mekanik enerjinin bir kısmı, bilyaların içinde termal enerji olarak dağılır. Böylece kinetik enerjinin tamamı geri kazanılmaz.

Ayrıca mekanik enerjinin bir kısmı sıkıştırılmış moleküler bağlarda elastik potansiyel enerji olarak depolanır. Daha sonra depolanan tüm enerji, nesnelerin çarpışma sonrası kinetik enerjisine geri dönüştürülür. Bir çarpışmadan sonra mekanik enerji korunursa, mükemmel esnek bir çarpışma meydana gelir. SMAT işlemlerinde kullanılan bilyalar çok sert çelik bir nesnedir, bu nedenle elastik bir şekilde davranmaya yaklaşır. Hatırlanacak olursa, bilya hızı için önerilen nümerik model yaklaşımında da bilyalar rijit kabul edilmiş idi. Bilyaların kinetik enerjisi, bilyalar ve oda yüzeyi arasındaki elastik çarpışmaya dayalı olarak hesaplanabilir. SMAT işleminde, titreşim hareketi harmonik karakterdedir ve açısal hız ile karakterize edilebilir. Titreşim motor hızı (v_m), motor frekansı (f_m) ve açısal hız (ω_m) Eşitlik (3.7)'de verildiği gibi hesaplanabilir:

$$v_m = \omega_m \sin(2\pi f_m t) \quad (3.7)$$

İkinci çarpışmadan önce titreşim odasının alt yüzeyindeki bir bilyanın (v_0) ilk hızı Eşitlik (3.8)'de verildiği gibi ifade edilebilir:

$$v_{0,s} = \frac{2A\omega_m}{1 + \frac{m_s}{m_c + m}} \sin \phi \quad (3.8)$$

burada m_s bilya kütlesi, $m_c + m$ toplam kütle, ve ϕ harmonik titreşim fazıdır. Titreşim odası yüzeyi veya bilya ile iş parçası arasında bir çarpışma Eşitlik (3.9)'da verilen koşulda meydana gelir;

$$\frac{1}{2}mv_{0,s} > mgd_p \quad (3.9)$$

burada d_p projeksiyon mesafesi ve g yerçekimi ivmesidir. Çarpışma sırasında impulsif kuvvet kısa bir süre etki eder ve kinetik enerjisini deformasyona veya termal enerjiye dönüştürür. Sürtünme veya yerçekimi gibi diğer kuvvetler impulsif kuvvetten oldukça küçük oldukları için ihmal edilebilir ve böylelikle impuls yaklaşımının geçerli olduğu söylenebilir.

Bu bölümde yapılan analizleri özetleyecek olursak, 2. Bölümde yapılan titreşim analizi sonrası elde edilen titreşim frekansı ve genliği ve deneysel çalışmada kullanılması planlanan bilya boyutu ve miktarının ortalama bilya hızını nasıl etkilediği FEM ile modellenerek simüle edilmiştir. Sonuç olarak tüm durumlar için OBH'nin, 0,5 ile 1,0 m/s arasında değiştiği kaydedilmiştir. Bu sonuç oldukça önemlidir. SMAT prosesinde OBH, 1 ile 20 m/s arasında tanımlanmaktadır. Simülasyon sonuçları SMAT için elde edilen bilya hızı değerlerinin alt sınırdan olduğunu göstermiştir. Mekanik yüzey işlemlerinde yüksek bilya hızlarının pürüzlülük gibi istenmeyen durumlara sebep olduğu bilinmektedir. Burada elde edilen görece düşük bilya hızlarının malzeme deformasyonu için yeterli olup olmayacağı 4. Bölümde tartışılacaktır. Ayrıca SMAT odacığında bilya sayısının artmasının, OBH'yi azaltacağı sonucuna ulaşılmıştır.

2. Bölümde titreşim tablasının hızı nümerik olarak 0,314 m/s bulunmuş idi. Simülasyon sonuçları ise OBH 0,5 ile 1 m/s arasında değiştiğini göstermektedir. Eşitlik (3.4)'e göre hesap yapıldığında ise yine 0,314 m/s değerine ulaşılmaktadır. Literatürde yer alan pek çok çalışma OBH için bu teorik eşitliğe göre hesap yapmaktadır. Ancak görüldüğü üzere OBH için kabul edilen bu eşitlik, aslında titreşim tablasının hızını vermektedir. Sonuç olarak SMAT uygulamalarında bilya hızının belirlenmesi proses verimliliği ve kontrolü bakımından oldukça önem arz etmektedir.



4. SMAT İÇİN TEK DARBELİ PLASTİK DEFORMASYON DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

4.1. SMAT Prosesinde Darbe Davranışı ve Literatür Değerlendirmesi

SMAT, metalik malzemelerin yüzey nanokristalizasyonu ile mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri geliştirmek için kullanılan etkili bir tekniktir (Azadmanjiri ve diğ., 2015, Olugbade ve Lu, 2020, Zhang ve diğ., 2003). Bu işlem; demir ve çelik (Chan ve diğ., 2010, Yin ve diğ., 2014), alüminyum (Pandey ve diğ., 2017, Wen ve diğ., 2015), magnezyum (Chen ve diğ., 2018, Peng ve diğ., 2019) ve titanyum (Chamgordani ve diğ., 2018, Gallitelli ve diğ., 2014) gibi birçok metal ve alaşım için uygulanmış ve tekniğin uzun servis ömürlü ve yüksek performanslı parçalar üretebilme noktasında iyi bir potansiyele sahip olduğu ortaya konulmuştur. SMAT prosesi, yüksek gerilme ve basınç altında ortaya çıkan metal şekillendirme teknikleri olarak tanımlanan aşırı plastik deformasyon (APD) süreçleri arasında kategorize edilmektedir (Astaræe ve diğ., 2017). APD prosesleri, beraberinde getirdiği yüksek gerinim ve yüksek gerilme oranları sayesinde nispeten düşük sıcaklıklarda çok küçük tane boyutunda veya nanokristal mikroyapıların oluşmasına olanak sağlamaktadır. Bu işlemin uygulama yöntemleri arasında yüksek basınçlı burulma (high-pressure torsion), hava patlaması (air blast), eşit kanal açışal presleme ve bilyalı dövme (BD) yer almaktadır. SMAT prosesleri, UBD ve yüksek enerjili bilyalı dövme (HESP) gibi uygulamaları kapsayan bir BD yöntemi olarak değerlendirilebilir. Bu prosesler, malzeme yüzeyinde ince taneli katmanlar elde etmek için başarıyla uygulanmaktadır. BD işlemlerinde metal yüzeyi, farklı boyut ve hızlardaki bilyalarla deforme edilir. Genellikle, SMAT'ta düşük hızda büyük çaplı bilyalar kullanılırken, diğer BD yöntemlerinde yüksek hızda küçük çaplı bilyalar kullanılmaktadır (Gallitelli ve diğ., 2014). SMAT'ta düşük bilya hızının hızın neden olduğu düşük darbe enerjisi, büyük çaplı bilyalar kullanılarak telafi edilir. SMAT'ta, yüksek kinetik enerjili bilyalar, titreşim platformu kullanarak metalik bir yüzeye rastgele çarpar. Bu titreşim platformu ultrasonik jeneratör veya elektrik motoru ile tahrik edilebilmektedir (Tao ve diğ., 2008). SMAT odasındaki titreşimin etkisi ile hareketlenen bilyalar malzeme yüzeyine rastgele çarparak malzeme yüzeyini deforme ederler. Ana işlem parametreleri, bilya hızı, bilya boyutu, bilya sayısı, titreşim frekansı ve genliği ve işlem süresidir. Bilya hızı, titreşimin genliğine, frekansına ve oda geometrisine bağlıdır.

Bilyalı dövme mekanizması statik, dinamik, elastisite ve plastisite gibi birçok disiplini içeren karmaşık bir soğuk şekillendirme sürecidir (Majzoobi ve diğ., 2005). Plastik deformasyon mekanizmasının BD işlemleri üzerindeki etkilerinin deneysel olarak değerlendirmesi oldukça karmaşık ve maliyetlidir. Kalıntı gerilmelerin belirlenmesi zaman alıcı ve oldukça yüksek maliyet getiren en önemli parametrelerden biridir. Bu nedenle kimi araştırmacılar nümerik ve analitik çalışmalara yönelmişlerdir. Birçok araştırmacı, SMAT ve BD için farklı sayısal modeller ve simülasyon çalışmaları sunmuştur.

Majzoobi ve diğ. (2005), LS-DYNA çözücüsünü kullanarak bilyalı dövme için bir 3D-model geliştirmiş ve farklı sayıda bilyanın yüzeye çarpması sonucunda oluşan kalıntı gerilme profillerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Yapmış oldukları simülasyon çalışmalarının doğrulamasını ise bilyanın malzeme yüzeyinde oluşturduğu çukur geometrisini deneysel sonuçlarla karşılaştırarak yapmışlardır. Toplamda 25 bilya darbesinden sonra düzgün bir gerilme dağılımı elde ettiklerini belirtirken, bilya sayısının artmasının gerilme dağılımını düzenli hale getirdiğini ortaya koymuşlardır.

Ullah ve diğ. (2019), BD uygulaması için ANSYS-LS-DYNA çözücüsü kullanarak bir model geliştirmişlerdir. Hedef malzeme olarak AA2618-T61 seçmişler ve şekil değiştirme hızının önemli olmasına vurgu yaparak Johnson-Cook malzeme modelini; bilyalar içinse lineer-elastik malzeme davranışı gösteren mekanik malzeme modelini kullanmışlardır. BD işlemi soğuk bir işlem olduğu için sıcaklığı ihmal etmişlerdir. Bilya çapını 0,4, 1 ve 2 mm ve hızını 20, 50, 75 ve 100 m/s olarak seçmişler ve bilya ile malzeme arasındaki sürtünme katsayısını 0,25 olarak belirlemişlerdir. Oluşturdukları modelde, tek atış sonrası kalıntı basma gerilmeleri ve plastik şekil değiştirme üzerindeki etkilerini detaylı olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak bilya hızı ne kadar yüksek olursa, kalıntı gerilme derinliğinin de o kadar büyük olacağı ve bu durumun da hedef malzemede daha büyük plastik deformasyon bölgesi oluşturacağı sonucuna varmışlardır. Ayrıca, bilya boyutunun arttırılması plastik deformasyonun artmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, maksimum yüzey altı kalıntı gerilmelerin, bilya hızı ve boyutundan önemli ölçüde etkilenmediğini kaydetmişlerdir.

Cao ve diğ. (2013), BD işlemini LS-DYNA programını kullanarak tekli atışlar için bilya hızına ve çapına bağlı olarak modellemişlerdir. Hedef malzeme olarak 20CrMnTi seçerek

elastik/plastik bilineer özelliklere bağlı bir malzeme modelini kullanmışlardır. Kalıntı basma gerilmelerini Von Mises gerilmeleri üzerinden değerlendirmişlerdir.

Marini ve diğ. (2017) AA7075-T651'in mikro BD işlemini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Simülasyonlar için Lemaitre-Chaboche malzeme modelini tercih etmişlerdir. Dinamik sonlu eleman simülasyonlarının, ana işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisini tahmin ederek bulmuş oldukları sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır.

Hong ve diğ. (2008) BD işlemi için ABAQUS programını kullanarak ve FEM-DEM çözücülerini aynı anda uygulayarak hem tekli hem de çoklu darbe için bir model ortaya koymuşlardır. Hedef malzemenin malzeme davranışını lineer elastik sertleşen plastik malzeme olarak ele almış ve kurmuş oldukları modelin doğrulaması için literatür üzerinden bir karşılaştırmaya gitmişlerdir. Kalıntı basma gerilmelerin değerlendirmesini yaparken yüzeydeki kalıntı gerilme, maksimum yüzey altı kalıntı gerilme ve kalıntı basma gerilme derinliği üzerinden değerlendirme yapmışlardır. Çoklu dövme simülasyonlarında ilk iki çarpmanın kalıntı gerilme derinliğini etkilediği ancak 3 ve 6. darbeler arasında benzer bir etkinin olmadığını gözlemlemişlerdir.

Liu ve diğ. (2018) ANSYS/LS DYNA ile AA7050'nin BD işlemini modellemiş ve bilineer sertleşen özellik gösteren malzeme modelini kullanmışlardır. Sabit bilya çapı seçerek (0,8 mm) farklı bilya hızlarının gerilmeler üzerindeki etkilerini, tek ve iki farklı bilyanın farklı zamanlarda yüzeye çarpmasını ve farklı mesafelerden yüzeye çarpmasını değerlendirerek araştırmışlardır. Kurmuş oldukları modelin doğrulamasını literatür üzerinden yaparak kalıntı basma gerilme için bilya hızındaki değişim etkilerini tartışmışlardır.

Xie ve diğ. (2018), Ti6Al4V'nin BD işlemi için ANSYS-LS DYNA kullanarak çoklu darbe üzerinden bilya hızına bağlı bir model geliştirmişlerdir. Hedef malzemenin modellenmesinde Cowper-Symonds malzeme modelini kullanmış ve bilya çapına ve yüzey örtme oranına bağlı simülasyonlar yapmışlardır. Önermiş oldukları modelin doğrulaması için XRD ile elde edilen kalıntı gerilme sonuçlarını kullanmışlardır. Artan yüzey örtme oranı ile yüzeydeki kraterlerin sayısının belirgin şekilde arttığını ve böylelikle yüzey kalıntı gerilmelerinin homojenliğinin sağlanmış olacağını

bildirmişlerdir. %200 ve %300 örtme oranı altındaki sonuçları karşılaştırdıklarında ise, kalıntı basma gerilmelerinin artışı açık bir şekilde gözlemleyemediklerini belirtmiş ve neredeyse tüm kraterler tarafından kaplanan yüzeyin ve oluşan gerilme alanlarının doygunluğa ulaştığını kaydetmişlerdir. Ayrıca, küçük çaplı bilyaların kalıntı basma gerilmesini artırdığını, ancak kalıntı gerilme tabakasının derinliğinin daha düşük olduğunu ortaya koymuşlardır.

Manchoul ve diğ. (2019), AISI 316L'nin BD ve UBD uygulamasını ABAQUS programını kullanarak modellemiş ve bir karşılaştırma çalışması ortaya koymuşlardır. AISI 316L için Chaboche tarafından modifiye edilmiş izotropik lineer olmayan kinematik sertleşen malzeme modelini kullanmışlardır. Kurmuş oldukları modelin doğrulamasını hem XRD ölçümleri hem de literatür karşılaştırması yaparak sağlamışlardır. Sonuç olarak BD'de, UBD'ye göre yüksek yüzey pürüzlülüğü elde ederken UBD'de ise BD'ye göre daha düşük kalıntı basma gerilme değerleri elde ettiklerini bildirmişlerdir.

Xiao ve diğ. (2018) yapmış oldukları çalışmada BD için ABAQUS programını kullanarak farklı modeller ortaya koymuşlardır. Bilyaların yüzeye olan teması sonrası etkiyi, aynı noktaya tekrarlı bilya atışları, iki farklı bilyanın aynı anda hedefe çarpması ve farklı sayıda bilyaların malzeme yüzeyine rastgele çarpması şeklinde üç farklı durum üzerinden değerlendirmişlerdir. Sonuçta elde ettikleri kalıntı basma gerilme değerlerine bağlı olarak bir tahmin denklemi ortaya koymuşlardır.

Sun ve Zhang (2015) ABAQUS sonlu elemanlar yazılımını kullanarak 42CrMo'nun BD işlemi için bir model geliştirmişlerdir. 42CrMo modellenmesinde Johnson-Cook malzeme modelini tercih etmişlerdir. Sonuçları 9 bilyanın yüzeye farklı örtme oranlarında çarpmasına bağlı olarak değerlendirmişlerdir.

Yin ve diğ. (2014), sonlu elemanlar yöntemlerini kullanarak UBD'nin AISI 1018 çelik plakalar üzerindeki plastik deformasyon etkisini araştırmışlardır. Tek bir atıştan sonra oluşan deformasyon etkisini ve çoklu çarpmalardan sonra oluşan yüzey morfolojisini tahmin etmek için bir algoritma geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri algoritmayı, 3B optik profilometre ile yüzey morfolojisini ölçerek doğrulamışlardır.

Literatür araştırması birçok araştırmacının, farklı alaşımlar için FEM kullanan sayısal çalışmalar sunduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, havacılık ve savunma endüstrisinde sıklıkla tercih edilen 7075-T6 alüminyum alaşımı için yapılan çalışmaların çoğu deneyseldir (Cecchin ve diğ., 2014, Sheng ve diğ., 2012, Žagar ve Grum, 2014), ancak nümerik çalışmalar yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, bu çalışmaların çoğu SMAT dışındaki diğer BD prosesleri ile ilgilidir. Bu bölümde, AA7075-T6 üzerindeki elastoplastik dinamik bilya etkisine dayanan SMAT prosesinin tek atış simülasyonu yapılmıştır. Sayısal simülasyonlar ANSYS/AUTODYN açık dinamik çözücü kullanılarak yapılmıştır. AA7075-T6'nın malzeme davranışını modellerken, gerinim hızı ve gerinim sertleşmesine bağlı olan Johnson-Cook formülasyonu kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar, bilya hızı ve büyüklüğünün gerilim ve gerinim üzerindeki etkileri için cevap yüzey CYM kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, AA7075-T6 SMAT için bilya parametrelerine dayalı denklemler önerilmiştir.

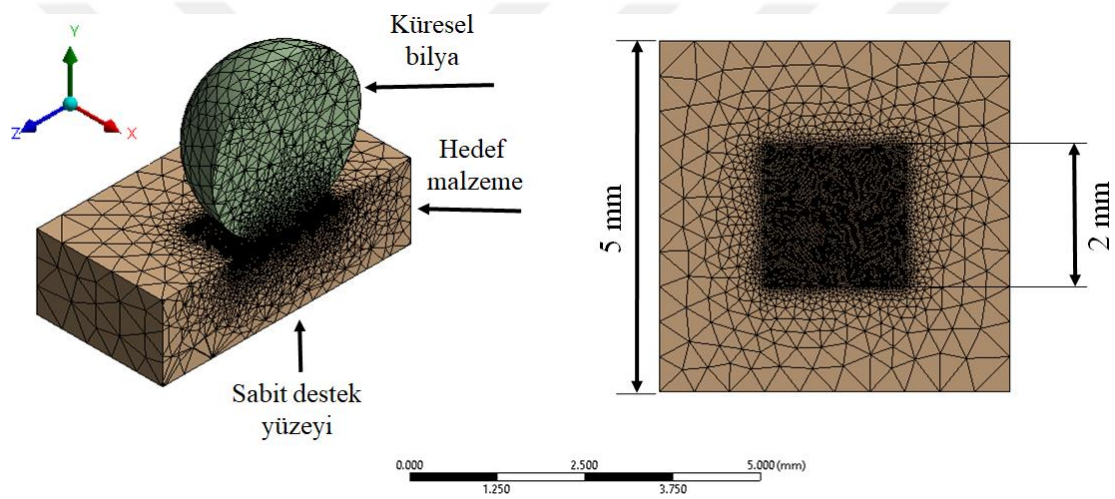
4.2. Dinamik Sonlu Elemanlar Analizi

SMAT prosesi ortalama 1-20 m/s bilya hızlarında uygulanan bir yöntemdir. Açık dinamik analiz; kısa sürede ve yüksek deformasyonların gerçekleştiği proseslerin modellenmesine olanak sağlamaktadır. ANSYS / Explicit Dynamics modülü, düşük-yüksek hızlı darbeler, rijit ve esnek gövdeler, karmaşık temas koşulları, karmaşık malzeme davranışı gibi farklı amaçları simüle etmek için tasarlanmıştır. Kısa sürede gerçekleşen simülasyonlar için de oldukça uygundur. Buna dayanarak, SMAT için tek bilyalı etki davranış simülasyonları ANSYS / AUTODYN açık dinamik çözücü kullanılarak yapılmıştır.

4.2.1. SMAT için Sonlu Eleman Modeli

Tek atışlı darbe simülasyonları için oluşturulan sonlu eleman modeli, bir hedef plaka ve küresel bilyadan oluşmaktadır. Hedef malzemenin boyutu $5 \times 5 \times 1.5 \text{ mm}^3$, bilya içinse 3, 4 ve 5 mm olmak üzere 3 farklı bilya çapı belirlenmiştir. Bu değerler deneysel çalışma göz önüne alınarak belirlenmiştir. Hedef ve bilya, sırasıyla deforme olabilen AA7075-T6 ve rijit paslanmaz çelik olarak tanımlanmıştır (Hong ve diğ., 2008, Majzoobi ve diğ., 2005). Bilyanın malzeme yüzeyine çarpma açısı her simülasyonda 90° olarak sabit tutulmuştur. Simülasyonlar boyunca hesaplama verimliliğini artırmak için bilya ve hedef arasındaki mesafe mümkün olduğunca yakın tutulmuştur. Bilya ve hedef arasındaki sürtünme,

alüminyum ve çelik arasındaki dinamik temasın tipik değeri olan 0,25'lik bir sürtünme katsayısı faktörü olarak seçilmiştir (Astaraee ve diğ., 2017, Yarar ve diğ., 2021). Hedef malzemenin alt yüzeyi yer değiştirme ve dönmelere karşı tamamen sabitlenmiştir. Her simülasyon süresi 20 μ s olarak belirlenmiştir. Hedef malzemede çarpmadan etkilenen alanın eleman boyutu 0,03 mm, bilya için hedefle etkileşime giren temas alanının eleman boyutu ise 0,05 mm olarak belirlenmiştir. Diğer bölgelerin eleman boyutu 0,5 mm olarak belirlenmiş ve Quad/Tri rijit ağ yüz tipi kullanılmıştır. Burada kullanılan sonlu eleman modeli, evvelce yaptığımız çalışmadan yola çıkılarak tasarlanmıştır (Yarar ve diğ., 2021). 3B sonlu eleman modeli için oluşturulan ağ yapısının kesit görünümü Şekil 4.1'de verilmiştir.

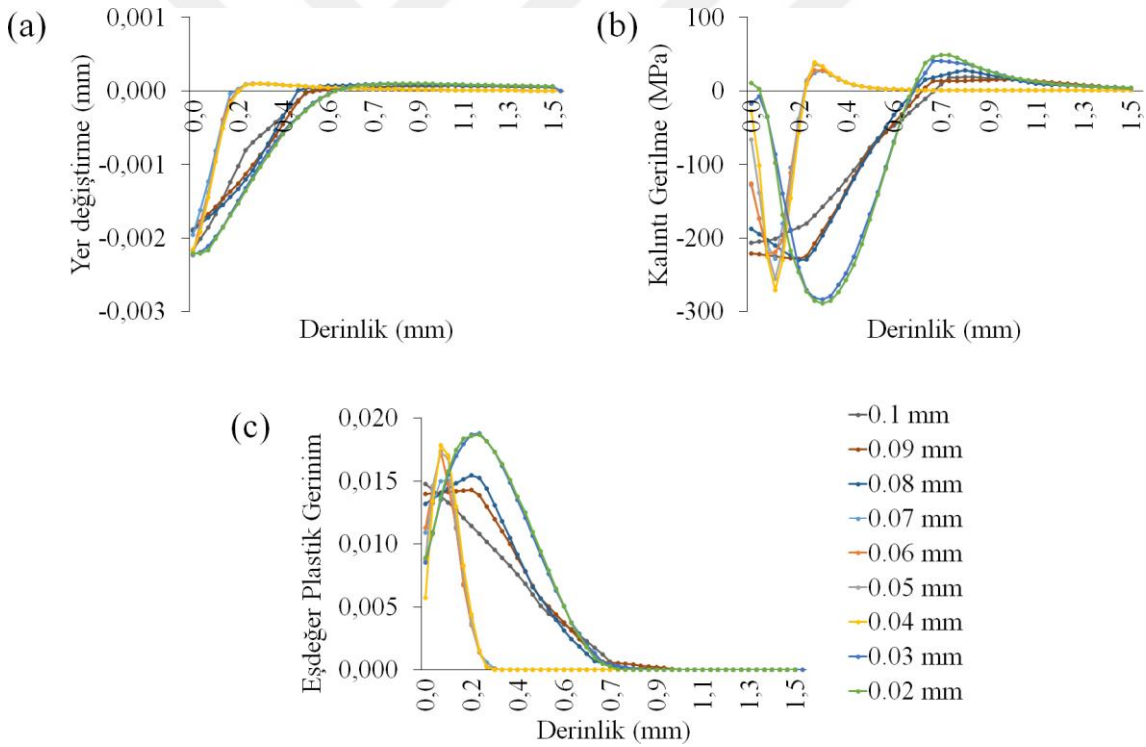


Şekil 4.1. Tekli darbe simülasyonları için oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli

4.2.2. Ağ Yakınsama Çalışması

Tekli darbe simülasyonları için geliştirilen sayısal modelin ağ bağımsızlığı çalışması, dikey yer değiştirme, eşdeğer plastik gerinim ve kalıntı gerilme profilleri değerlendirilerek gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan ağ yakınsama çalışmalarının çoğu kalıntı gerilmenin yakınsamasını hesaba katarken, bu bölümde yapılan ağ bağımsızlık çalışması, eşdeğer plastik gerinim ve yer değiştirme eğilimlerini ve bunların plastik deformasyon üzerindeki etkilerini de kapsamaktadır (Astaraee ve diğ., 2017). Hedef temas alanında dokuz farklı eleman boyutu Şekil 4.2'de gösterildiği gibi hedef plakasının derinliğine bağlı ağ yakınsaması elde etmek için farklı FE modelleri kullanarak oluşturulmuştur. Tüm modellerde bilya eleman boyutu aynı tutulmuştur. Şekil 4.2a,

eleman boyutunun bir fonksiyonu olarak derinlemesine profil üzerinde tek bir darbe tarafından oluşturulan girinti için dikey derinlik yer değiştirmesini (-y yönü) göstermektedir. Dikey yer değiştirme için 0,04 mm'lik eleman boyutu altında ağ yakınsaması sağlandığı görülmektedir. Derinliğe bağlı farklı eleman boyutları için eşdeğer plastik gerinim profilleri Şekil 4.2b'de gösterilmektedir. Darbe merkezinin altında derinliğe bağlı eşdeğer plastik gerilmenin 0,03 mm'lik bir eleman boyutuyla yakınsadığı görülmektedir. Şekil 4.2c'de ise derinliğe bağlı x-yönünde oluşan kalıntı gerilme profilleri verilmiştir. Ağ yakınsama çalışması, azalan eleman boyutu ile stres profilinin yakınsadığını göstermektedir. 0,04 mm'lik eleman boyutunun altında makul bir yakınsama olduğu görülmektedir. Buna göre, ağ bağımsızlığı, düşük hesaplama maliyeti ile tek darbe etkisinin tüm simülasyonları için seçilen 0,03 mm'lik bir eleman boyutu ile elde edilmiştir.



Şekil 4.2. Ağ yakınsama grafikleri (Ø5 mm, 1 m/s) a) Derinlik ile eleman boyutunun bir fonksiyonu olarak yer değiştirme profili b) Eleman boyutunun bir fonksiyonu olarak kalıntı gerilme profili c) Eleman boyutunun bir fonksiyonu olarak eşdeğer plastik gerinim

4.2.3. Malzeme Modelinin Belirlenmesi

Tekli darbenin sonlu elemanlar modeli ANSYS/Explicit Dynamics kullanılarak geliştirilmiştir. Bilyalı dövme işlemi yüzey tabakasında yüksek plastik deformasyona neden olur (Kang ve diğ., 2010). Bu nedenle, malzeme modeli davranışı, sadece malzemenin gerinim sertleşmesini değil, aynı zamanda plastik deformasyonu sırasında akma geriliminin gerinim hızı bağımlılığını da tanımlayabilmelidir. Johnson-Cook (JC) malzeme modeli, büyük deformasyon ve yüksek gerilme oranı koşullarında metalik malzemeler için gerilme ve şekil değiştirme ilişkilerini tanımlayabilme kabiliyetine sahiptir. Bu nedenle JC malzeme modeli (Johnson ve Cook, 1983), ANSYS’de tanımlanmış ve Eşitlik (4.1)’de verilmiştir;

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (4.1)$$

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{ref}} \quad (4.2)$$

$$T^* = \frac{T - T_{ref}}{T_m - T_{ref}} \quad (4.3)$$

Burada σ eşdeğer gerilim, ε eşdeğer plastik gerinim, $\dot{\varepsilon}$ ve $\dot{\varepsilon}_{ref}$ uygulanan ve referans şekil değiştirme hızlarıdır. Başlangıç akma dayanımı A , gerinim sertleştirme sabiti B , gerinim hızı katsayısı C , n ve m , gerinim sertleştirme ve termal yumuşama katsayılarını temsil etmektedir. Eşitlik (4.2) ve (4.3) boyutsuz gerilme hızını ve homolog sıcaklığı ifade etmektedir. T , T_{ref} ve T_m sırasıyla uygulanan, referans ve erime sıcaklığını göstermektedir.

SMAT prosesinde kısa sürede gerçekleşen plastik deformasyon davranışının modellenmesi için, seçilecek olan model parametrelerinin dinamik darbe davranışını kapsayacak şekilde olması oldukça önemlidir. Bu sebeple, AA7075-T6 alaşımının JC model parametreleri, dinamik çekme testleri ile sıcaklığa ve şekil değiştirme hızına bağlı olarak elde edilen bir çalışmadan alınmıştır (Zhang ve diğ., 2015). Paslanmaz çelik bilya

ise lineer elastik bir malzeme olarak tanımlanmıştır. Tablo 4.1, hem hedef hem de bilya için malzeme özelliklerini göstermektedir.

Tablo 4.1. Johnson-Cook malzeme modeli için malzeme sabitleri

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	A (MPa)	B (MPa)	n	C	$\dot{\epsilon}_0$
AA7075-T6	2804	71,7	0,3	473	210	0,3813	0,033	1
Paslanmaz Çelik	7900	200	0,3	-	-	-	-	-

4.2.4. Durum Denklemi (EOS)

Durum denklemi (EOS), basınç, hacim ve iç enerji ilişkilerini tanımlamak için kullanılır. Şok durum denklemi ise, yüksek hızlı darbe simülasyonları için yaygın olarak kullanılan belirli bir durum denklemdir. Bu çalışma için hem atış hem de hedef malzeme için şok EOS lineer / Gruneisen EOS uygulanmıştır. Şok hızı-parçacık hızına sahip Gruneisen EOS, sıkıştırılmış malzemeler için basıncı ($\mu > 0$) Eşitlik (4.4) ve Eşitlik (4.5)'te verildiği gibi tanımlar (Lin ve Li, 2020, Rao ve diğ., 2016):

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - \frac{a}{2}\mu^2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}]^2} + (\gamma_0 + \alpha\mu)E_i \quad (4.4)$$

$$\mu = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) - 1 \quad (4.5)$$

burada ρ_0 başlangıç yoğunluğunu, ρ mevcut yoğunluğu, C şok hızına karşı parçacık hızı ($v_s - v_p$) eğrisinin kesişimini, μ aşırı sıkıştırmayı, γ_0 Gruneisen katsayısını, S_1, S_2 ve S_3 , ($v_s - v_p$) eğrisinin eğim katsayılarını, a , γ_0 'nin birinci dereceden hacim düzeltmesini ve E_i iç enerjiyi temsil etmektedir. Tek darbe simülasyonlarında, AA7075-

T6 ve paslanmaz çelik için Gruneisen EOS modeli kullanılmış ve parametreler Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. EOS Gruneisen modeli için malzeme sabitleri

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Kayma Modülü (GPa)	C (m/s)	S ₁	S ₂	S ₃	γ_0	a
AA7075-T6	2804	26,7	5200	1,36	0	0	2,2	0
Paslanmaz Çelik	7900	77	4570	1,49	0	0	1,93	0

4.2.5. İstatistik Model

SMAT sonrası kalıntı basma gerilmelerini ve plastik deformasyon seviyelerini belirlemek çok önemlidir. Daha önce de belirtildiği gibi, bu koşullar bilya ve malzeme özelliklerine ve işlem süresine bağlıdır. Bu bölümde, bilya hızı ve çapının mekanik özellikler üzerindeki etkisi parametrik bilya koşulları belirlenerek araştırılmıştır. Sayısal çalışma için belirlenen parametrik değerler Tablo 4.3'te gösterilmiştir. Bu parametreler 3. Bölümde değinilen bilya hızlarının dinamik analizine göre seçilmiştir. Tekrar değinilecek olursa, 3. Bölüm'de, SMAT için tasarlanan titreşim tablasının, titreşim parametrelerine bağlı bilya hızlarını tahmin edebilen bir dinamik sonlu elemanlar modeli geliştirilmiş idi. Buna göre ortalama bilya hızlarının 0,5 ile 1 m/s arasında olacağı belirlenmiştir. Buradan hareketle bu bölümde tekli darbenin AA7075-T6'nın plastik deformasyonu üzerindeki etkisi ele alındığından Tablo 4.3'te verilen parametreler seçilmiştir. Minitab 19 istatistik yazılımı kullanılarak simülasyon sonuçları CYM'ye göre değerlendirilmiştir. Model geliştirilirken, bilya hızı ve çapı sürekli faktörler olarak tanımlanmıştır. Yanıtlar için oluşturulan ANOVA tabloları P-değeri için 95% güven aralığında değerlendirilmiştir.

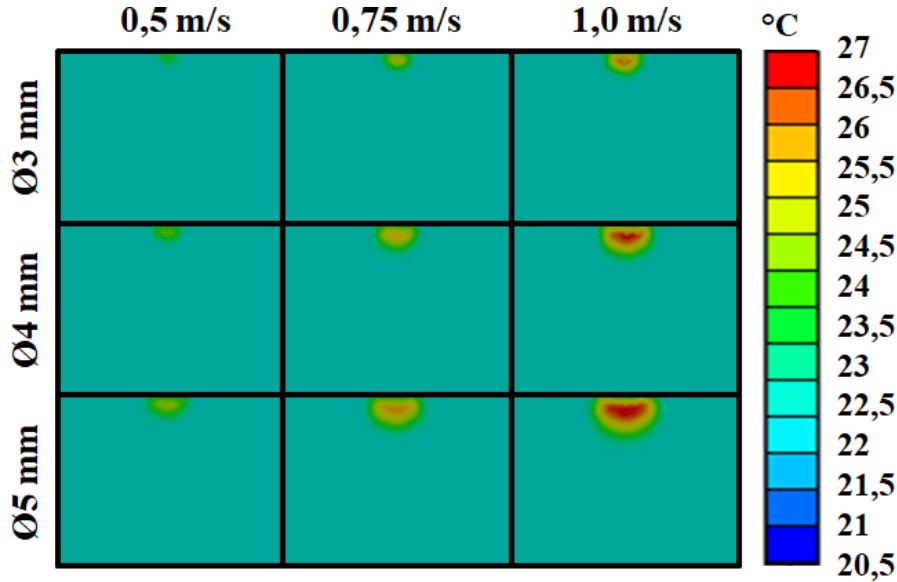
Bir cevap yüzeyi oluşturmanın amacı, deneysel bir çalışmada sonuca etkili olan birçok parametreden oluşan bir tasarım düzleminde belirli özellikleri sağlayan bu bölgenin optimum noktasının tahmin edilmesidir. Elde edilen fonksiyon deneysel verileri temsil etmesine rağmen, bir veya daha fazla yanıt üzerindeki potansiyel etkilerin sayısı ile en önemli faktörleri tanımlamak için gerekli olduğunda model uyumunun yüksek olması çok önemlidir. CYM tasarımları kullanılarak, zaman, kaynak ve enerji tasarrufu sağlanırken neden-sonuç ilişkileri matematiksel modellerle ifade edilebilir.

Tablo 4.3. Simülasyon parametreleri

Faktörler	Seviye	Değerler
Hız (m/s)	3	0,5; 0,75; 1
Çap (mm)	3	3; 4; 5

4.3. Simülasyon Sonuçları

Tek atış darbesinden sonra hedef malzeme üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı Şekil 4.3'te verilmiştir. Buna göre tek darbe sonrası oluşan sıcaklık dağılımlarının 20 ile 27 °C arasında değiştiği görülmektedir. Sıcaklık plastik deformasyon mekanizmaları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ancak böylesine düşük sıcaklıkların AA7075-T6'nın plastik deformasyon kabiliyeti üzerinde dikkate değer bir etkisi yoktur (Senkova ve diğ., 2006). Literatürde bulunan modelleme çalışmalarında da sıcaklık etkisi ihmal edilmiştir (Majzoubi ve diğ., 2005, Ullah ve diğ., 2019). Bu vurguyu yapmak önemlidir, çünkü AA7075'nin plastik deformasyon davranışı, şekil değiştirme hızı ve sıcaklıktan etkilenmektedir. Burada ise plastik deformasyon kabiliyetini etkileyen en büyük etki bilya hızına aittir. Literatürde de SMAT prosesi bir soğuk işleme prosesi olarak tanımlanmaktadır (Zhang ve diğ., 2021).



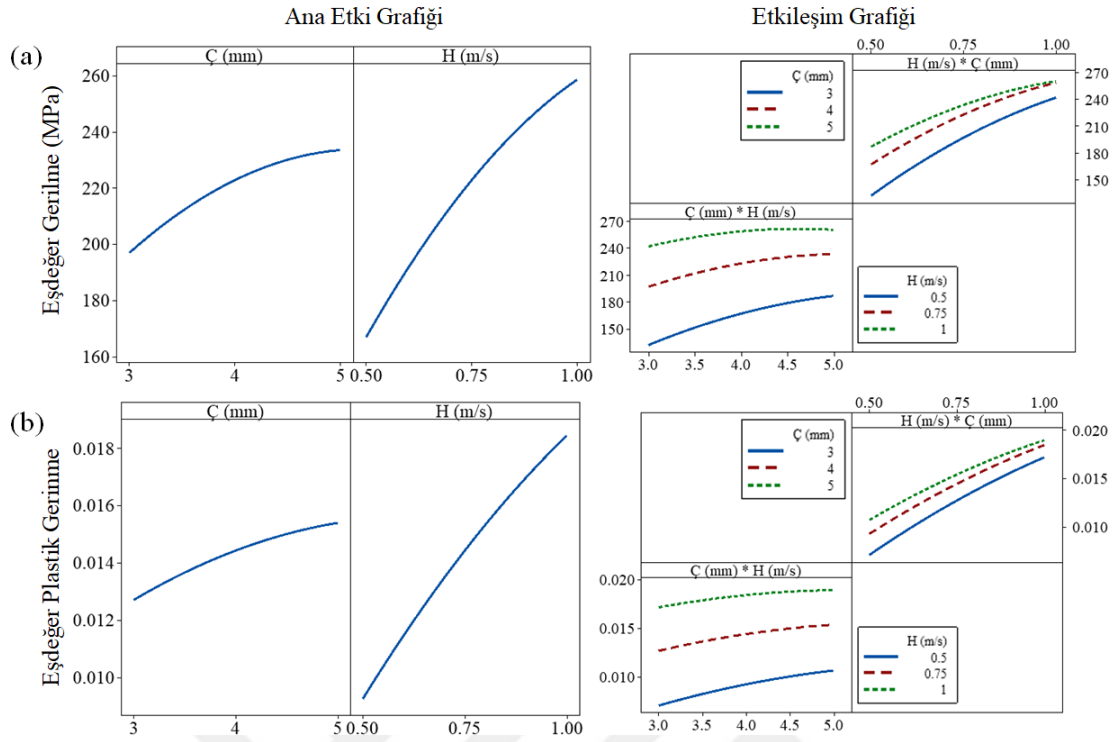
Şekil 4.3. Sıcaklık dağılımları

Bilya çapı ve hızının plastik deformasyon ve farklı mekanik özellikler üzerindeki etkileri Tablo 4.3'e göre incelenmiştir. Bilya, hedef malzeme yüzeyine etki ettikten sonra malzeme üzerinde ve alt yüzeyinde bölgesel bir plastik deformasyona neden olmaktadır. Burada farklı bilya boyutlarının ve hızının malzemenin mekanik yapısında yaratmış olduğu etkiler gerilme, gerinim ve deformasyon sonuçları değerlendirilerek araştırılmıştır. AA7075-T6'nın tekli darbe simülasyonlarında bilya çapı ve hızına bağlı olarak elde edilen sonuçlar Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Simulasyon sonuçları

D	V	Eş.		Maks. Kalıntı		Maks. Kalıntı	
		Ger.	Plastik	Maks. Def.	İz çapı	Gerilme Der.	Gerilme
(mm)	(m/s)	(MPa)	Gerinim	Der. (µm)	(mm)	(mm)	(MPa)
3	0,5	128,2	0,006	-0,344	0,076	0,020	-119,7
3	0,75	201,4	0,012	-0,720	0,120	0,041	-207,0
3	1	241,1	0,017	-1,160	0,138	0,051	-250,6
4	0,5	171,8	0,009	-0,515	0,110	0,041	-158,7
4	0,75	218,8	0,014	-1,060	0,169	0,061	-233,3
4	1	258,3	0,018	-1,720	0,213	0,071	-287,3
5	0,5	185,5	0,010	-0,718	0,162	0,061	-189,2
5	0,75	233,3	0,015	-1,447	0,219	0,071	-249,4
5	1	262,0	0,019	-2,256	0,272	0,092	-292,3

Tek atış sonrası bulunan simülasyon sonuçları CYM'ye göre elde edilen ana etki ve ikili etkileşim grafikleri üzerinden değerlendirilmiştir. Bu grafiklerdeki ortalama değerlerin anlamlı olup olmadığını anlamak için ise ANOVA tablolarından faydalanılmıştır. İlk olarak tek atış sonrası hedef malzeme de görülen maksimum eşdeğer gerilme ve gerinme grafikleri sırasıyla Şekil 4.4a ve 4.4b'de verilmiştir. Her iki cevap için de elde edilen ANOVA tabloları ise, sırasıyla Tablo 4.5 ve 4.6'da verilmiştir. Varyans analizine göre hem eşdeğer gerilme hem de eşdeğer plastik gerinme için P-değeri'nin %95 güven aralığı içerisinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.4. Ana etki ve ikili etkileşim grafikleri a) Eşdeğer gerilme (von Mises), b) eşdeğer plastik gerilim

Tablo 4.5. Eşdeğer Gerilme için ANOVA tablosu

Kaynak	SD	Katılım(%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Model	5	99,48%	45978,5	9195,7	804,25	0,000
Lineer	2	95,27%	44033,7	22016,9	1925,59	0,000
Ç (mm)	1	13,11%	6058,8	6058,8	529,90	0,000
H (m/s)	1	82,16%	37974,9	37974,9	3321,28	0,000
Kare	2	2,07%	954,9	477,4	41,76	0,000
Ç*Ç	1	0,75%	346,3	346,3	30,28	0,000
H*H	1	1,32%	608,6	608,6	53,23	0,000
2'li etkileşim	1	2,14%	989,9	989,9	86,58	0,000
Ç*H	1	2,14%	989,9	989,9	86,58	0,000
Hata	21	0,52%	240,1	11,4		
Uyum eksikliği	3	0,52%	240,1	80,0	*	*
Saf Hata	18	0,00%	0,0	0,0		
Total	26	100,00%				
$R^2 = 99,48\%$ $R^2(\text{adj}) = 99,36\%$ $R^2(\text{tah.}) = 99,17\%$						

Tablo 4.6. Eşdeğer Plastik Gerinme için ANOVA tablosu

Kaynak	SD	Katılım(%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Model	5	99,82%	0,000421	0,000084	2268,95	0,000
Lineer	2	98,52%	0,000416	0,000208	5598,95	0,000
Ç (mm)	1	7,79%	0,000033	0,000033	885,33	0,000
H (m/s)	1	90,73%	0,000383	0,000383	10312,57	0,000
Kare	2	0,69%	0,000003	0,000001	39,22	0,000
Ç*Ç	1	0,21%	0,000001	0,000001	23,59	0,000
H*H	1	0,48%	0,000002	0,000002	54,86	0,000
2'li etkileşim	1	0,60%	0,000003	0,000003	68,41	0,000
Ç*H	1	0,60%	0,000003	0,000003	68,41	0,000
Hata	21	0,18%	0,000001	0,000000		
Uyum eksikliği	3	0,18%	0,000001	0,000000	*	*
Saf Hata	18	0,00%	0,000000	0,000000		
Total	26	100,00%				
R ² = 99,82% R ² (adj) = 99,77% R ² (tah.) = 99,7%						

Şekil 4.4a'da, bilya hızının artmasıyla eşdeğer gerilmenin ortalama değerinin hızla arttığı görülmektedir. Benzer şekilde, bilya hızının etkisi düşünüldüğünde maksimum plastik gerinimde artmaktadır (Şekil 4.4b). Artan plastik gerinim oranı, tane sınırlarının dislokasyon hareketi üzerindeki geciktirici etkisinden kaynaklanmaktadır (Rida ve diğ., 2017). Bununla birlikte, Şekil 4.4a'da görüldüğü gibi, bilya çapının artmasına rağmen eşdeğer gerilmenin ortalaması bilya hızının yarattığı artışa kıyasla sınırlı bir artış göstermektedir. Aynı şekilde, bilya çapının artışının eşdeğer plastik gerinim oranı üzerindeki etkisi bilya hızı kadar etkili değildir (Şekil 4.4b). Buradan hareketle bilyanın sahip olduğu dinamik özelliklerin, boyutuna kıyasla plastik deformasyon üzerinde daha önemli bir etki yarattığı söylenebilir. Evvelce yapmış olduğumuz çalışmada da özellikle bilya boyutunun plastik gerinim üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu ortaya konulmuştur (Yarar ve diğ., 2021). Eşdeğer gerilim ve gerinim için oluşturulan ikili etkileşim grafikleri ise, bilya çapı arttıkça bilya hızının etkisinin sınırlandığını ve özellikle 4 ve 5 mm çapındaki bilyaların ortalama etkisinin aynı olduğunu ortaya koymaktadır. Daha önce de belirtildiği üzere bilya çapı artışı bilya hızından kaybedilen kinetik enerjiyi telafi

edebilmektedir. Bu sonuç SMAT işlemini diğer mekanik yüzey işlemleri ile rekabetçi yapan önemli bulgulardan bir tanesidir.

Tablo 4.7 ve 4.8’de sırasıyla maksimum deformasyon derinliği ve iz çapı için oluşturulan ANOVA tabloları verilmiştir. Tablolar incelendiğinde deformasyon derinliği ve iz çapının güvenilir sınırlar içerisinde istatistiki değerlendirmeye alınabileceği sonucuna varılmaktadır. CYM’ye göre oluşturulan istatistiki modelde giriş parametreleri olan bilya hızı ve çapının, lineer kuadratik ve etkileşim katsayılarının %95 güven aralığı sınırları içerisinde kaldığı görülmektedir. Başka bir deyişle hedef malzeme yüzeyinde meydana gelen plastik deformasyon, yüzeyde oluşturduğu iz çapı ile ve yüzey altında oluşturduğu maksimum deformasyon derinliği, bilya çapı ve bilya hızına bağlı anlamlı ve tutarlı değişimleri ortaya koymuştur. Bu değerlendirmeye göre varyans analizi plastik deformasyon mekanizması üzerinde SMAT için seçilecek bilya özelliklerinin oldukça önemli olduğunu ortaya çıkarmıştır.

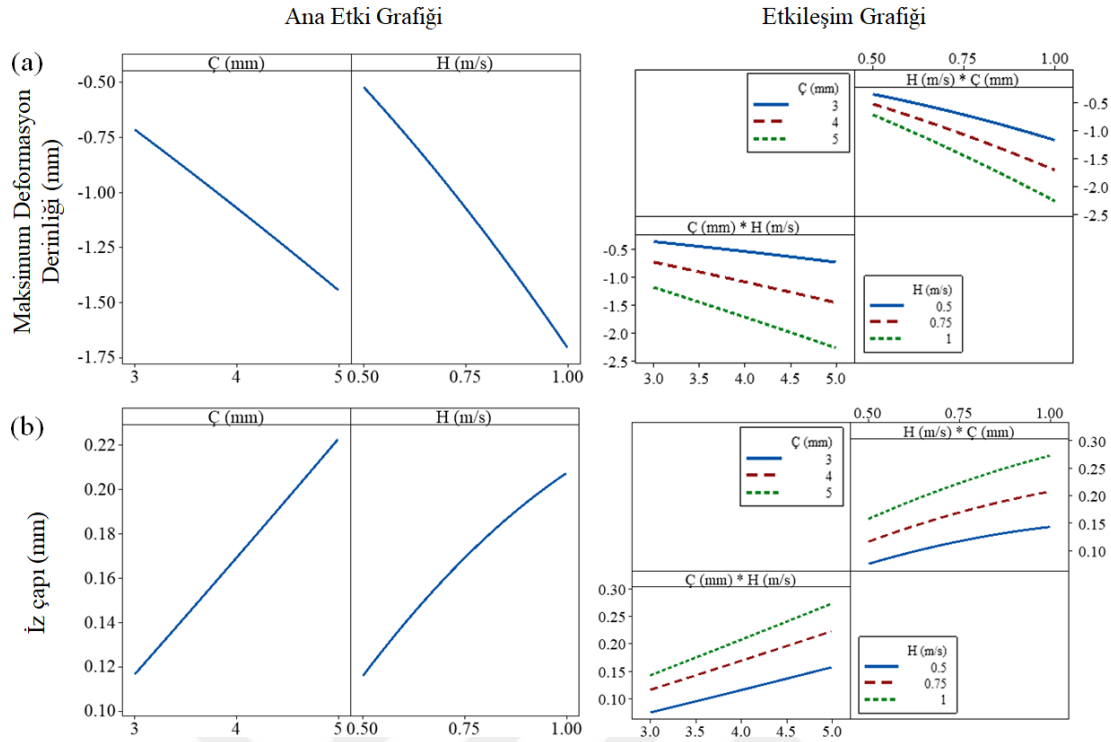
Tablo 4.7. Maks. Deformasyon Derinliği için ANOVA tablosu

Kaynak	SD	Katılım(%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Model	5	99,98%	9,15168	1,83034	27035,34	0,000
Lineer	2	95,57%	8,74806	4,37403	64607,44	0,000
Ç (mm)	1	26,33%	2,41044	2,41044	35603,86	0,000
H (m/s)	1	69,24%	6,33762	6,33762	93611,02	0,000
Kare	2	0,13%	0,01170	0,00585	86,40	0,000
Ç*Ç	1	0,01%	0,00051	0,00051	7,59	0,012
H*H	1	0,12%	0,01118	0,01118	165,20	0,000
2’li etkileşim	1	4,28%	0,39193	0,39193	5789,04	0,000
Ç*H	1	4,28%	0,39193	0,39193	5789,04	0,000
Hata	21	0,02%	0,00142	0,00007		
Uyum eksikliği	3	0,02%	0,00142	0,00047	*	*
Saf Hata	18	0,00%	0,00000	0,00000		
Total	26	100,00%				
R ² = 99,98% R ² (adj) = 99,98% R ² (tah.) = 99,98%						

Tablo 4.8. İz Çapı için ANOVA tablosu

Kaynak	SD	Katılım(%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Model	5	99,55%	0,090760	0,018152	929,74	0,000
Lineer	2	97,28%	0,088693	0,044347	2271,41	0,000
Ç (mm)	1	55,81%	0,050880	0,050880	2606,07	0,000
H (m/s)	1	41,47%	0,037813	0,037813	1936,74	0,000
Kare	2	0,37%	0,000339	0,000169	8,68	0,002
Ç*Ç	1	0,00%	0,000002	0,000002	0,08	0,784
H*H	1	0,37%	0,000337	0,000337	17,29	0,000
2'li etkileşim	1	1,90%	0,001728	0,001728	88,51	0,000
Ç*H	1	1,90%	0,001728	0,001728	88,51	0,000
Hata	21	0,45%	0,000410	0,000020		
Uyum eksikliği	3	0,45%	0,000410	0,000137	*	*
Saf Hata	18	0,00%	0,000000	0,000000		
Total	26	100,00%				
R ² = 99,55% R ² (adj) = 99,44% R ² (tah.) = 99,27%						

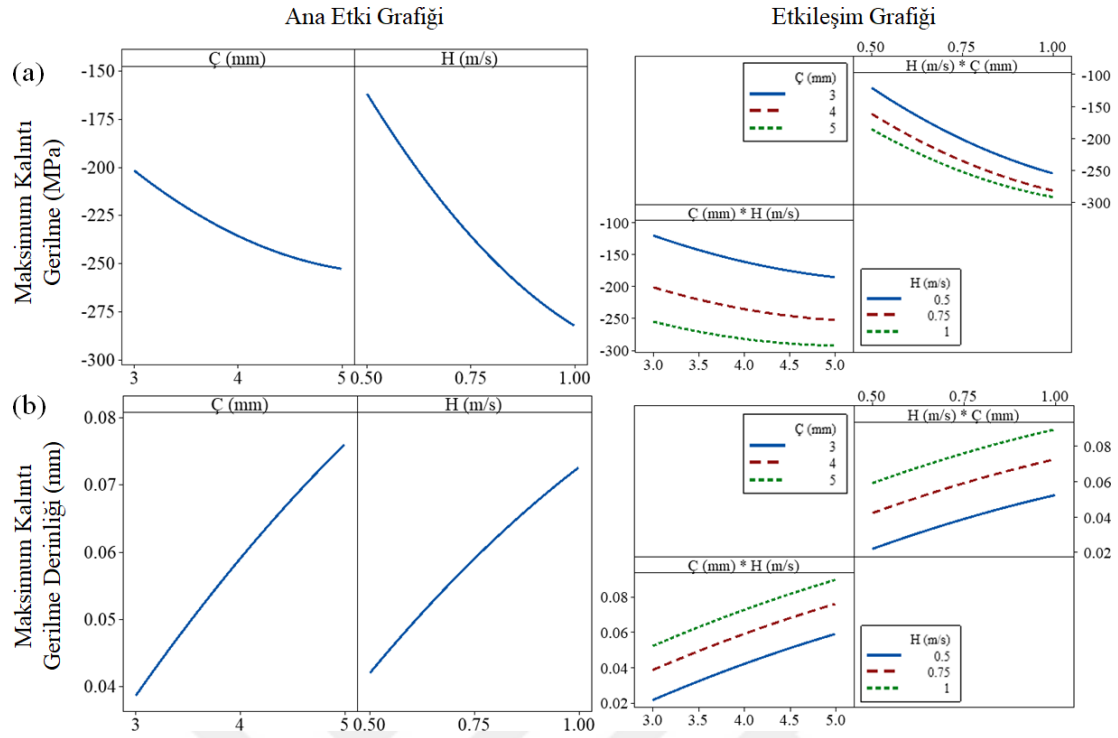
Şekil 4.5a ve 4.5b’de ise sırasıyla maksimum deformasyon derinliği ve iz çapı grafikleri verilmiştir. Şekil 4.5a’da verilen ana etki grafiği incelendiğinde hem bilya çapının hem de bilya hızının deformasyon derinliğini ve iz çapı ortalamasını benzer şekilde ve lineer olarak artırdığı görülmektedir. Ancak deformasyon derinliği için oluşturulan ana etki grafiği daha detaylı olarak incelendiğinde bilya hızının derinliği daha ivmeli bir şekilde artırdığı fark edilmektedir. Bu ivmeli artışı, etkileşim grafiği de doğrular niteliktedir. Öte yandan, iz çapı için elde edilen ana etki grafiğinde, bilya çapı bilya hızına göre daha etkili olmuştur. Bilya çapı artışı, çarpışma sırasında, hedef malzeme ile olan temas alanını artırmış ve çarpışma sonrasında daha geniş bir iz oluşmasına sebebiyet vermiştir. Aslında burada SMAT prosesi diğer BD uygulamalarından ayrılmaktadır. Yüksek bilya hızları bariz şekilde yüzey hasarına sebebiyet verecek şekilde deformasyon derinlikleri ortaya çıkarabilmektedir. Ancak artan bilya çapı, sahip olduğu kinetik enerjisini, deformasyon derinliğinden ziyade, daha geniş bir alana yaymaktadır. Bu da daha geniş iz çapları ile sonuçlanmaktadır. Şekil 4.5b’de oluşturulan ikili etkileşim grafikleri incelendiğinde ise bilya hızı ve bilya çapı etkisinin aynı eğilimlere sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 4.5. Ana etki ve ikili etkileşim grafikleri a) Maksimum deformasyon derinliği b) İz çapı

Şekil 4.6a ve 4.6b’de ise sırasıyla maksimum kalıntı gerilme ve maksimum kalıntı gerilme derinliği grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerin değerlendirilmesinde başvuru ANOVA tabloları ise sırasıyla Tablo 4.9 ve 4.10’da verilmiştir. Tablolar incelendiğinde maksimum kalıntı gerilme ve maksimum kalıntı gerilme derinliğinin güvenilir sınırlar içerisinde istatistiki değerlendirmeye alınabileceği sonucuna varılmaktadır. Tek bilya darbesinin bilya hızına ve çapına bağlı parametrik olarak değerlendirilmesi P değerinin %95 güven aralığı içerisinde kalıntı gerilme sonuçları üzerinde anlamlı etkiye sahip olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır. Bilya darbesinin sebep olduğu plastik deformasyon bilya çapı ve hızına bağlı olarak hem maksimum kalıntı gerilme değerini hem de maksimum kalıntı gerilmenin oluşması beklenen derinliği etkilemiştir.

Şekil 4.6a’ya göre bilya hızının MKG üzerindeki etkisi bilya çapına oranla daha fazladır. MKG’ye göre kırılma tokluğu ve yorulma mukavemeti arasında güçlü bir bağımlılık vardır. Bu sonuç eşdeğer gerilme ve eşdeğer plastik gerilim ile de uyum içerisindedir. Bunun nedeni açıkçası hızın kinetik enerji üzerindeki etkisinin kütleden daha büyük olmasıdır ve beklenen bir sonuçtur.



Şekil 4.6. Ana etki ve ikili etkileşim grafikleri a) Maksimum kalıntı gerilme b) Maksimum kalıntı gerilme derinliği

Tablo 4.9. Maks. Kalıntı Gerilme için ANOVA tablosu

Kaynak	SD	Katılım(%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Model	5	99,57%	79645,3	15929,1	975,64	0,000
Lineer	2	96,92%	77523,4	38761,7	2374,12	0,000
Ç (mm)	1	14,75%	11794,9	11794,9	722,43	0,000
H (m/s)	1	82,17%	65728,5	65728,5	4025,81	0,000
Kare	2	1,92%	1538,8	769,4	47,13	0,000
Ç*Ç	1	0,53%	425,5	425,5	26,06	0,000
H*H	1	1,39%	1113,3	1113,3	68,19	0,000
2'li etkileşim	1	0,73%	583,0	583,0	35,71	0,000
Ç*H	1	0,73%	583,0	583,0	35,71	0,000
Hata	21	0,43%	342,9	16,3		
Uyum eksikliği	3	0,43%	342,9	114,3	*	*
Saf Hata	18	0,00%	0,0	0,0		
Total	26	100,00%				
$R^2 = 99,57\%$ $R^2(\text{adj}) = 99,47\%$ $R^2(\text{tah.}) = 99,31\%$						

Tablo 4.10. Maks. Kalıntı Gerilme Derinliği için ANOVA tablosu

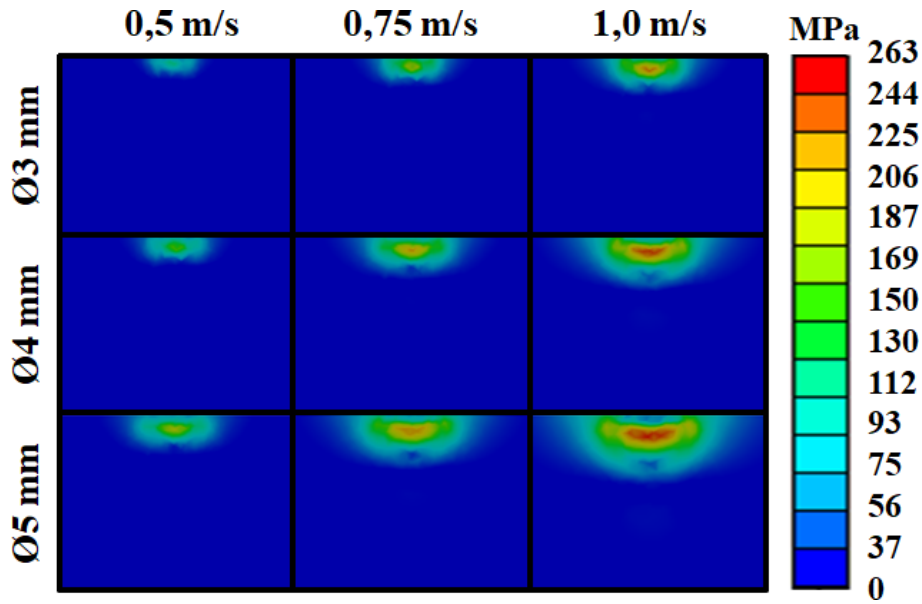
Kaynak	SD	Katılım(%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Model	5	98,70%	0,010560	0,002112	319,19	0,000
Lineer	2	98,38%	0,010525	0,005263	795,34	0,000
Ç (mm)	1	58,93%	0,006305	0,006305	952,83	0,000
H (m/s)	1	39,45%	0,004221	0,004221	637,85	0,000
Kare	2	0,32%	0,000035	0,000017	2,62	0,096
Ç*Ç	1	0,16%	0,000017	0,000017	2,62	0,120
H*H	1	0,16%	0,000017	0,000017	2,62	0,120
2'li etkileşim	1	0,00%	0,000000	0,000000	0,00	1,000
Ç*H	1	0,00%	0,000000	0,000000	0,00	1,000
Hata	21	1,30%	0,000139	0,000007		
Uyum eksikliği	3	1,30%	0,000139	0,000046	*	*
Saf Hata	18	0,00%	0,000000	0,000000		
Total	26	100,00%				
R ² = 98,70% R ² (adj) = 98,39% R ² (tah.) = 97,91%						

Şekil 4.6b’de verilen MKG derinliği değerlendirildiğinde ise, bilya çapının bilya hızına oranla aynı ve hatta daha fazla bir etki yarattığı görülmektedir. Bu sonuç ise iz çapı ile uyum göstermektedir. SMAT tekniğini diğer BD proseslerinden ayıran en önemli özelliklerden bir tanesi bilya boyutlarının benzer proseslere oranla daha yüksek olarak seçilmesidir. Bunun sebebi simülasyon sonuçlarıyla da doğrulanmaktadır. Düşük bilya hızının sebep olacağı düşük gerilme ve gerinim daha büyük bilya boyutları tercih edilerek telafi edilmektedir. Bir başka deyişle, bilya çapı artışı, hedef malzeme ile temas alanını artırarak, kalıntı gerilmenin daha derinlere nüfuz edebilmesini sağlamıştır. Üstelik bu etki daha düşük deformasyon derinliklerinde sağlanabilmektedir. Yani düşük pürüzlülükte daha derin kalıntı gerilmelerin elde edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çıkarım bir sonraki bölümde deneysel olarak da ele alınacaktır. SMAT proseslerinin en önemli özelliklerinden birisi malzeme alt yüzeyinde oluşturduğu kalıntı basma gerilmelerdir. Bu gerilmelerin ulaşacağı maksimum derinlik uygulanan mekanik yüzey işleminin o denli başarılı olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar bilya hızının ve bilya çapının mekanik etkiler üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymuştur ve sonuçlar literatürle

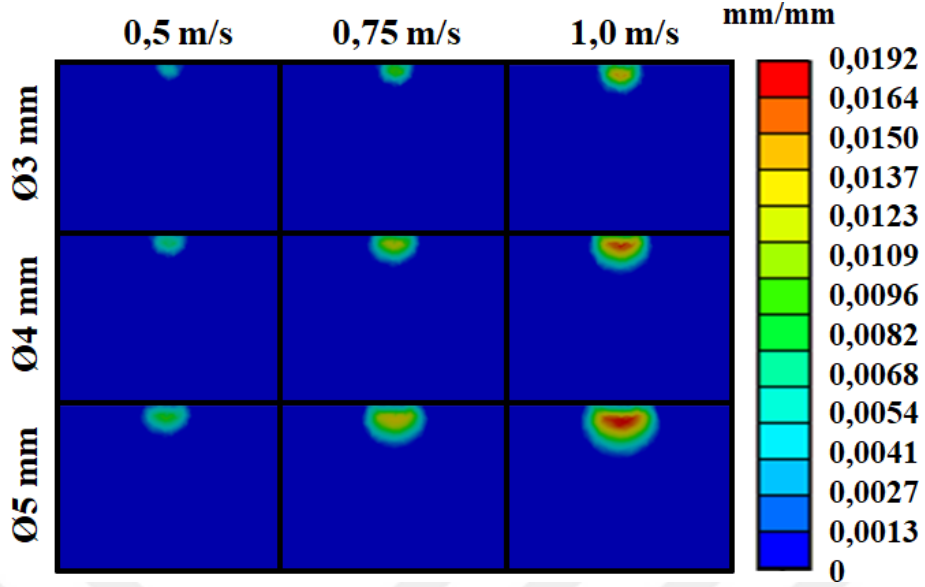
uyum içerisinde. Ayrıca, Johnson-Cook gerinim hızına bağlı plastisite teorisinin, SMAT altında mekanik yanıtı değerlendirmek için kullanılabileceği de anlaşılmıştır.

4.4. Plastik Deformasyon Mekanizmasının Değerlendirilmesi

Bu kısımda tekli bilya darbesinden sonra hedef malzemede derinliğe bağlı olarak değişen mekanik özellikler simülasyon sonuçları görselleştirilerek değerlendirilecektir. SMAT işleminin aynı endüktif parametrik koşullarında daha küçük bilyaların daha büyük olanlardan daha yüksek hız sağladığı bilinmektedir. Önceki çalışmalar, bu tek yönlü bilgiyi, yüksek plastik deformasyon oluşturmak için SMAT prosesinde küçük bilya çaplarının kullanılması için tek öneri olarak sunmaktadır. Bu bölümde, aynı hızda farklı bilye çaplarının ve bunun tersinin etkisi analiz edilmiştir. Şekil 4.7 ve 4.8 farklı bilya çapı ve hızı parametre setlerine göre elde edilen eş değer (von Mises) gerilme ve plastik gerinim dağılımlarını göstermektedir. Diğer proses parametreleri sabit tutulmuştur. Şekil 4.7’de verilen eş değer gerilme dağılımının bilya çapı ve hızına bağlı olarak arttığı anlaşılmaktadır. Ancak dağılım görseli daha detaylı incelendiğinde bilya hızının yarattığı artışın bilya çapına oranla daha fazla olduğu göze çarpmaktadır. Eş değer gerilme için Şekil 4.4’te verilen ortalama etki grafiği de bu sonucu doğrular niteliktedir. Şekil 4.8 incelendiğinde, benzer sonuçların eş değer plastik gerinim için de geçerli olduğu görülmektedir.



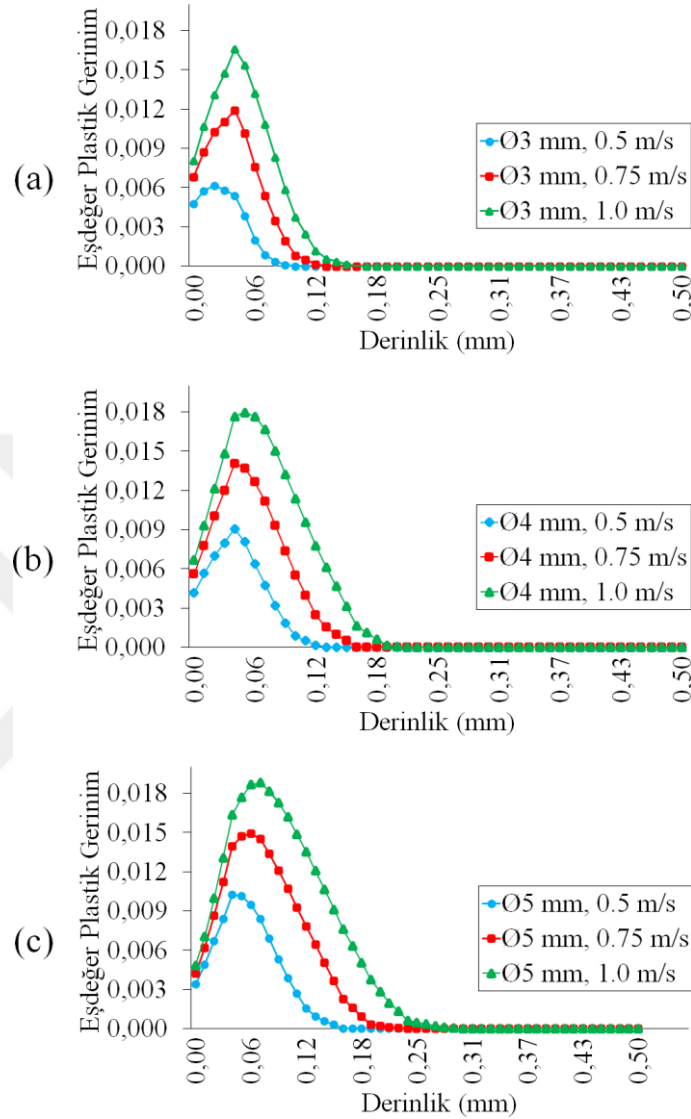
Şekil 4.7. Eş değer (Von Mises) gerilme dağılımları



Şekil 4.8. Eşdeğer plastik gerinim dağılımları

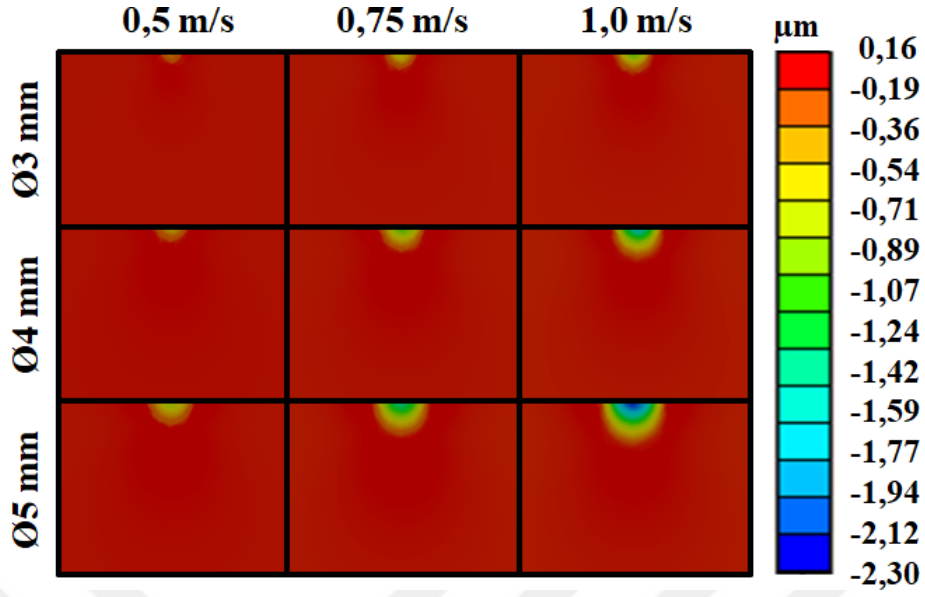
Bir bilyanın farklı çap ve hızının kullanılması, bilye kütlesi ve hızının kinematığından dolayı eşdeğer gerilmeyi ve plastik şekil değiştirmeyi etkiler. Şekil 4.9a, 4.9b ve 4.9c sırasıyla 3, 4 ve 5 mm çapındaki atışlar için hızla bağlı eşdeğer plastik gerinim profillerini göstermektedir. Buna göre, bilya çapı plastik deformasyonun meydana geldiği bölgenin derinliğini arttırırken, maksimum plastik şekil değiştirmeyi de arttırmaktadır. Önceki çalışmadan (Yarar ve diğ., 2021) farklı olarak burada bilya çapının sebep olduğu plastik deformasyon, bilya hızlarının görece düşük olması sebebiyle deformasyon bölgesini doğrudan etkilemektedir. Ancak daha yüksek hızlı bilyalar, bilya boyutunun maksimum eşdeğer plastik şekil değiştirme üzerindeki etkisini sınırlandırmaktadır. Şekil 4.7 ve 4.8’de verilen görselleştirilmiş plastik deformasyon farklılıkları, SMAT sürecindeki değişken parametrik faktörlerin neden olduğu lokalize enerji farklılıkları ile güçlü bir şekilde ilişkilidir. Plastik deformasyon işlemi, yüzeydeki tane yapısının polikristalinden ultra ince tanelere dönüşmesine olanak sağlar. Bilya hızının değişmesi, plastik deformasyonda farklı gerilme oranlarına sebebiyet verir. Düşük gerinim oranı, dislokasyon hareketinden kaynaklanan bir deformasyona neden olurken, yüksek gerinim oranı ikizlenme mekanizmasını tetikler. Dislokasyonlar tane sınırlarında yoğunlaşır ve kayma hareketlerini kısıtlar. Tane inceltmesiyle elde edilebilecek mukavemet, Hall-Petch denkleminde göre gelişir. Gerilim artışı sırasında, ana taneler, deformasyon enerjisinin aşırı birikmesi nedeniyle dislokasyonların yönelim bozukluğu olan küçük tanelere bölünür. Sonuç olarak, daha önceki çalışmalarda da bildirilen sonuçlara göre, işlem

görmüş yüzeyde yüksek gerilme oranı deformasyonu ile ultraince taneli bir nanokristalin tabaka oluşur (Meng ve diğ., 2018, Samih ve diğ., 2013).



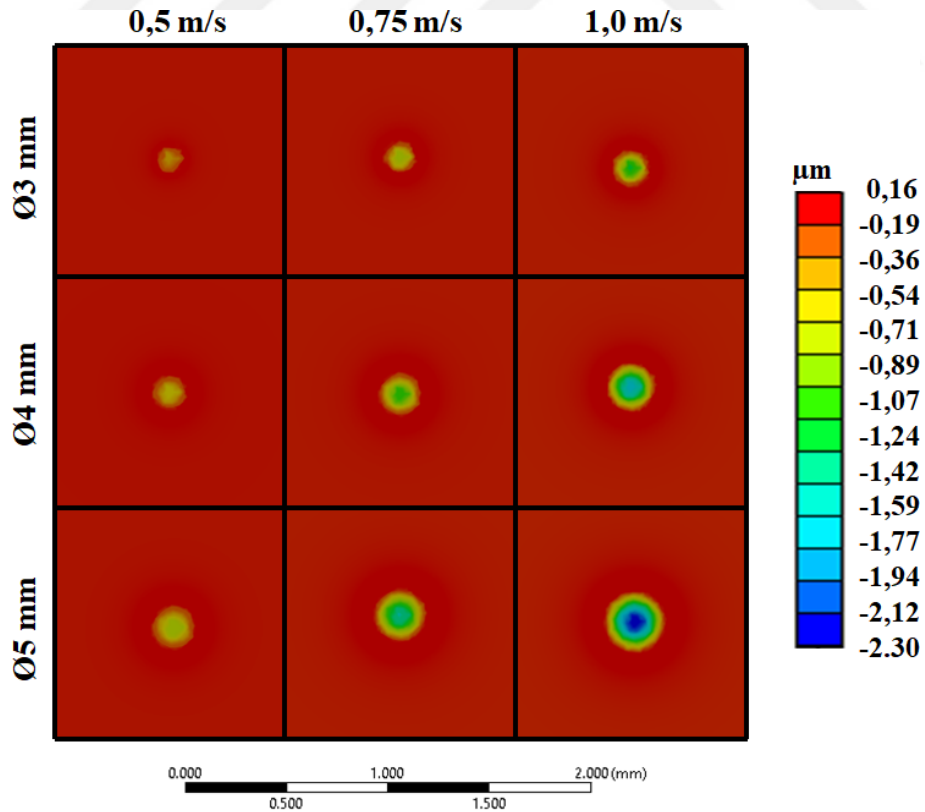
Şekil 4.9. Tek bir atıştan sonra oluşan eşdeğer plastik gerinim profilleri a) Ø3 mm b) Ø4 mm c) Ø5 mm

Şekil 4.10 ve 4.11’de sırasıyla deformasyon derinliği ve iz çapının ölçüldüğü hedef malzemenin üstten görünümü verilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi, deformasyon derinliğinin artması malzeme yüzeyini daha pürüzlü hale getirmektedir. Şekil 4.10’a göre tek darbe sonrası oluşan deformasyon derinliği üzerinde bilya hızının bilya çapına oranla daha etkili olduğu anlaşılmaktadır. Bilya çapının artışı bilya hızının yarattığı deformasyon derinliğini daha da artırmıştır.



Şekil 4.10. Deformasyon derinliği dağılımları

Şekil 4.11’de ise bilya hızı sabit alındığında, bilya çapı artışının iz çapı üzerinde bilya hızına oranla daha etkili olduğu görülmektedir. Bu sonuç Şekil 4.5b’de verilen ana etki ve ikili etkileşim grafiklerini de doğrular niteliktedir.

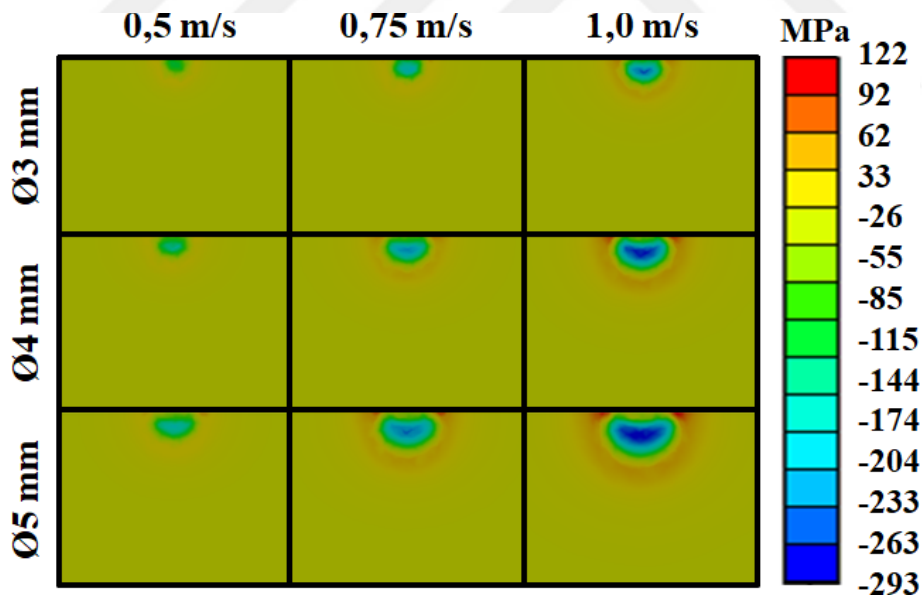


Şekil 4.11. İz çapı genişliği dağılımları

Simülasyonlar için seçilen bilya hızları muadil proseslere oranla oldukça düşük seviyelerdedir. SMAT için proses hızının 1 – 20 m/s olduğu düşünüldüğünde, tek atış simülasyonları için belirlenen 0.5 ile 1 m/s'nin alt sınırlarda olduğu görülmektedir. Ancak bu hızlarda kalıcı şekil değişiminin gerçekleşebilmesi bilya çapı artırılarak telafi edilebilmiştir. Sonuç olarak en düşük deformasyon derinliği ile kalıntı gerilmelerin elde edilebileceği ortaya konulmuştur. İlerleyen bölümlerde Şekil 4.11'de verilen iz genişliği, deneysel olarak elde edilen ölçümlerle de kıyaslanacak ve geliştirilen modelin reel değerleri tahmin etme yeteneği tartışılacaktır.

4.5. Kalıntı Gerilmenin Değerlendirilmesi

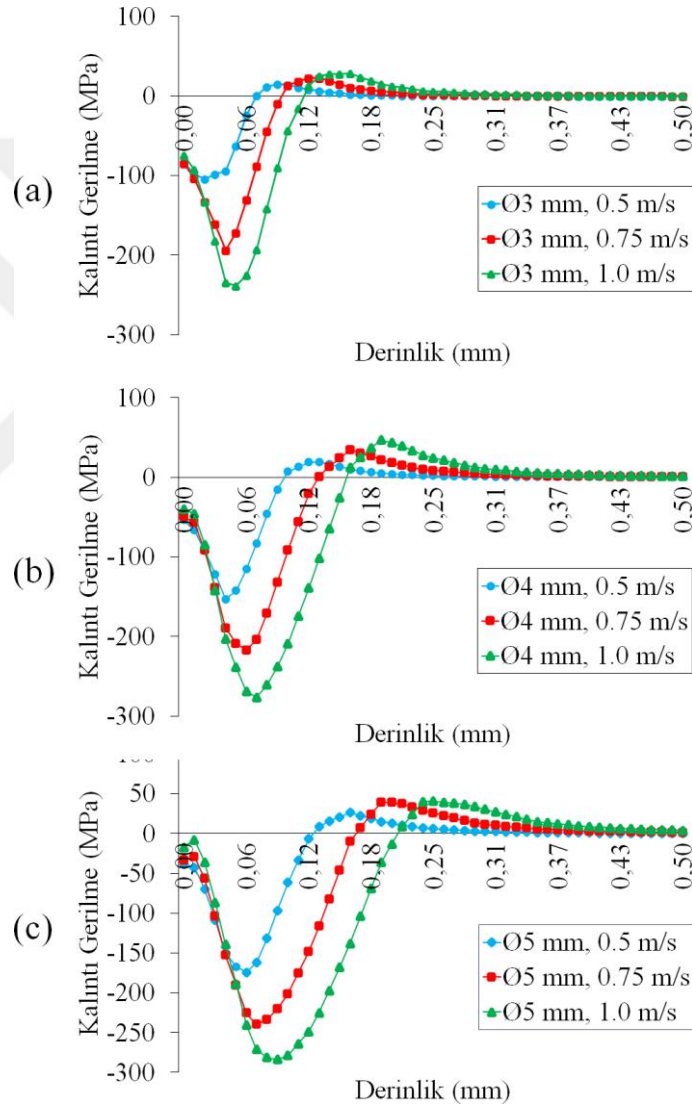
SMAT prosesinin farklı aşamalarında geçerli olan farklı analitik yaklaşımlar, kalıntı basma gerilmesini (KBG) belirlemek için kullanılabilir. Tek bilya darbesinden sonraki plastik deformasyon, kalıntı gerilmenin oluşacağı bölgeyi belirler. Şekil 4.8 ve 4.12'te verilen eşdeğer plastik gerinim ve kalıntı gerilme dağılımları incelendiğinde ve her bir durum için karşılaştırıldığında bu açıkça görülmektedir.



Şekil 4.12. Kalıntı gerilme dağılımları

Şekil 4.13, tek darbe simülasyonları için elde edilen derinliğe bağlı kalıntı gerilme profillerini göstermektedir. Buna göre, bilya hızının KBG alanında önemli bir artış sağladığı gösterilmiştir, ancak bilya çapının bu anlamda daha az etkisi vardır. Şekil 4.13a, 4.13b ve 4.13c sırasıyla 3, 4 ve 5 mm çapındaki bilyalar için hıza bağlı kalıntı gerilme

profillerini göstermektedir. Bu grafiklere göre, bilya hızının artmasıyla MKG artmaktadır. Öte yandan, aynı hız için MKG'nin meydana geldiği derinlik de doğrusal olarak artmıştır. Kalıntı gerilme dağılımları için elde edilen MKG (Şekil 4.6a) bu değerlendirmeyi doğrulamaktadır. MKG derinliğinin artış hızı ise hem bilya çapından hem de bilya hızından önemli ölçüde etkilenmektedir. Hatta bilya çapı artışı MKG derinliğini bilya hızına göre daha da fazla etkilemiştir. Bu sonuçlar daha düşük hızlarda bilya boyutu artırılarak kalıntı gerilme derinliğinin önemli ölçüde artabileceğini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.13. Tek bir atıştan sonra oluşan kalıntı gerilme profilleri a) Ø2 mm b) Ø3 mm c) Ø4 mm

Hedef malzemede tek bir darbe ile meydana gelen KBG, bilya kaynaklı gerilme ile belirlenir. Başka bir deyişle, bilya dinamiğinin neden olduğu gerilmeler hedef

malzemenin akma dayanımına ulaştığında, yüzey altındaki MKG'deki değişiklik azalır (Ullah ve diğ., 2019). Şekil 4.6a bilya hızına bağlı olarak artan MKG'nin lineer olarak artma eğilimde olduğunu göstermektedir. Yani, hedef malzeme de henüz maksimum kalıntı gerilme değerine ulaşamamıştır. Bilya çapının neden olduğu MKG için ise bir stabilizasyon eğilimi söz konusudur. Yani bilya çapı artışı belli bir seviyeden sonra MKG'yi etkilemeyecektir. SMAT 20 m/s ve altında gerçekleşirken, BD daha önce bahsedildiği gibi 20 m/s ve üzerinde atış hızında gerçekleşen bir işlemdir. Farklı araştırmacılar, BD'de bilya hızı ve boyutunun neden olduğu MKG'deki değişimin ihmal edilebilir olduğunu belirtmiştir (Guagliano, 2001, Meguid ve diğ., 1999, Ullah ve diğ., 2019). Diğer yandan hem bilya çapı hem de bilya hızı, MKG'nin neredeyse aynı seviyede indüklendiği derinliği etkiler. Yani, bilya parametrelerinin neden olduğu kalıntı gerilmenin büyüklüğü önemli ölçüde değişmezken, derinliği önemli ölçüde değişir. Çünkü MKG malzemenin akma dayanımı ile kontrol edilirken, MKG derinliği plastik deformasyon ve şekil değiştirme ile kontrol edilir. Bu sonuç Şekil 4.8'da verilen plastik gerinim profilleri ile de kanıtlanmıştır. Benzer şekilde Şekil 4.5b'de iz çapının bilya parametrelerine bağlı olarak lineer bir artış gösterdiği açıkça görülmektedir.

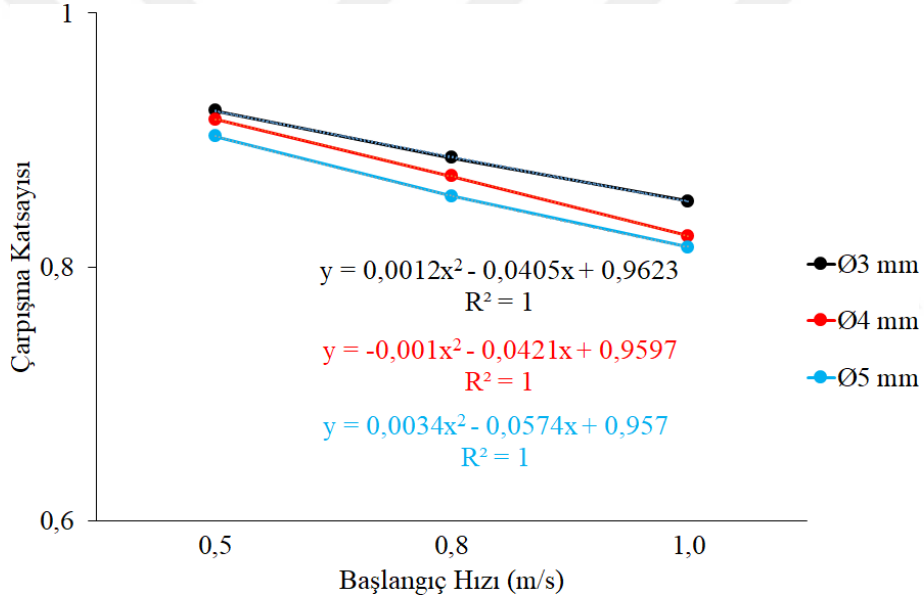
4.6. Çarpışma Katsayısı

Malzemelerin darbe davranışını makro-mekanik olarak değerlendirmek için çarpışma katsayısı hesaplanır (Seifried ve diğ., 2010). Çarpışma katsayısı Eşitlik (4.6)'da görüleceği üzere kürenin yüzeye çarpmasından sonraki geri tepme oranı ve çarpma hızı ile bulunur:

$$e = \frac{V_r}{V_i} \quad (4.6)$$

Burada e çarpışma katsayısı, V_r ve V_i sırasıyla geri tepme ve başlangıç atış hızıdır. Çalışmada her bir simülasyon için bilyaların geri tepme hızı hesaplanmış ve bilya çapına ve hızına bağlı olarak Şekil 4.14'teki çarpışma katsayısı grafiği elde edilmiştir. Çarpışma esnek değildir çünkü $e < 1$. Şekil 4.14'e göre, bilya hızının artması çarpışma katsayısını azaltmıştır, yani geri tepme hızı azalmıştır. Böylece çarpışma sırasındaki kinetik enerji kaybı plastik deformasyona neden olmuştur. Bilya hızının plastik deformasyonu arttırdığı

zaten vurgulanmış idi. Çarpışma katsayısının azalması da bu sonucu desteklemektedir. Ayrıca hız artışının neden olduğu çarpışma katsayısındaki azalma da literatürle uyumludur (Azimian ve Bart, 2017, Gorham ve Kharaz, 2000, Jackson ve diğ., 2010, Seifried ve diğ., 2010). Öte yandan, bilya çapının çarpışma katsayısı üzerinde bilya hızı kadar etkili olmadığı söylenebilir. Daha önce, Şekil 4.4b'de bilya çapının maksimum plastik şekil değiştirmeyi bilya hızı kadar etkilemediği gösterilmiş idi. Bilya boyutu ve bilya dinamiğinin maksimum plastik gerinim ve çarpışma katsayısı ile ilişkisi birbiriyle tutarlı ve uyumludur. Diğer bir deyişle, bilya çapından kaynaklanan plastik gerinimdeki değişim, bilya hızı kadar etkili değildir. AA7075 aynı zamanda gerinim sertleşmesine ve gerinim hızına bağlı bir alaşım olduğu için (Lee ve diğ., 2000), artan bilya hızı plastik deformasyon üzerinde daha etkili olmuştur.



Şekil 4.14. Çarpışma katsayıları

4.7. Regresyon Eşitlikleri

CYM'ye göre simülasyon sonuçları değerlendirildikten sonra elde edilen regresyon denklemleri Tablo 4.11'de verilmiştir. Burada lineer, etkileşim ve ikinci dereceden terimlerin katsayıları her bir cevap için ayrı ayrı sunulmuştur. Regresyon denklemlerinin test sonuçlarını tahmin etme yeteneği R^2 ile ifade edilir. Öngörülen R^2 , elde edilen regresyon denklemi (Gopalakannan ve diğ., 2012, Kilickap, 2010) ile olası yeni gözlemleri tahmin etme yeteneğini gösterir. Her bir yanıt için elde edilen R^2 ve R^2 (tah.)

değerleri ise ilgili cevap için ANOVA tablosu altında verilmiştir. Buna göre istatistiksel model, simülasyon sonuçlarını tahmin etmek için yeterince yüksek bir yeteneğe sahiptir.

Tablo 4.11. SMAT proses yanıtlarının ampirik modelleri

Cevap	Regresyon Eşitlikleri					
	Sabit	Ç	H	Ç ²	H ²	Ç.H
Eşdeğer gerilme (MPa)	-309,4	106,4	570,8	- 7,60	- 161,1	- 36,33
Eş değer Plastik Gerinim	-0,02167	0,005787	0,03978	- 0,000382	- 0,00932	- 0,00184
Deformasyon Derinliği (µm)	-0,5315	0,2503	1,5543	- 0,00926	- 0,6908	- 0,72289
İz Çapı (mm)	-0,0967	0,0132	0,1713	0,00050	- 0,1200	0,04800
Kalıntı Gerilme (MPa)	389,1	- 113,9	- 680,2	8,42	217,9	27,88
Kalıntı Gerilme Derinliği (mm)	-0,1043	0,03232	0,1021	- 0,00170	- 0,0272	0

*Ç: Çap (mm), H: Hız (m/s)

4.8. Tartışma ve Sonuçlar

SMAT işleminde, bilye ve hedef metal yüzey arasındaki çarpışma esnek değildir ve deformasyon ve termal enerji nedeniyle kinetik enerjinin bir kısmı kaybolur. SMAT sürecinin toplam mekanik enerjisi, atışın kinetik enerjisi ve potansiyel enerjisidir ($E_{Toplam} = K + U$). Bu sistemde net dış kuvvetlerin sıfır olduğu varsayılır. Sadece internal nonkonservatif kuvvetler mevcuttur. Çarpışma sırasında, impulsif kuvvet kısa bir süre etki eder ve kinetik enerjisini deformasyona veya termal enerjiye dönüştürür. Kütlesi m olan ve v hızı ile hareket ettirilen bilyanın kinetik enerjisi $K = \frac{1}{2}mv^2$ olup skaler bir niceliktir. İmpulsif kuvvet, çarpışma süresinin karmaşık bir fonksiyonudur, bu nedenle momentum ve itme, SMAT sürecinde çarpışmayı analiz etmemizi sağlar. Metal yüzey üzerindeki bileşke kuvvet lineer momentum değişimine eşittir. Doğrusal momentum veya hareket miktarı, bilya için Eşitlik (4.7)'deki ifade edilebilir:

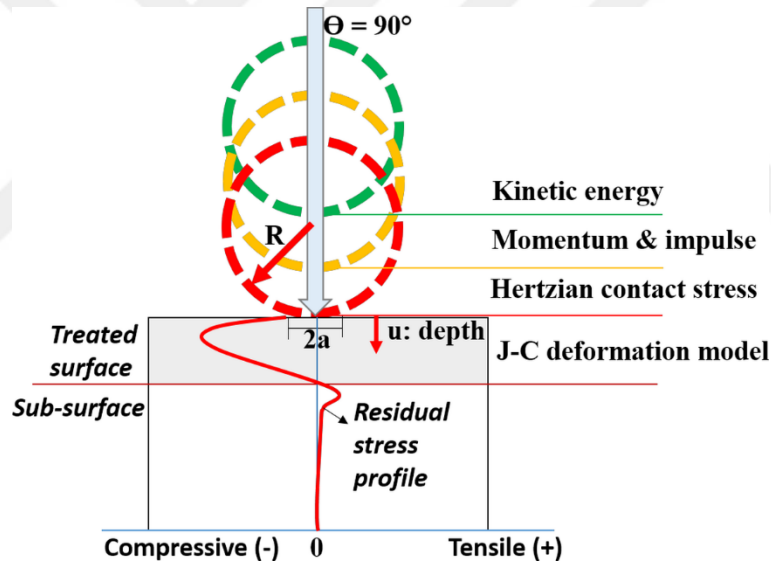
$$F = ma = m \frac{dv}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = \frac{dp}{dt} \quad (4.7)$$

Sürtünme veya yerçekimi gibi diğer kuvvetler impulsif kuvvetten oldukça küçük oldukları için ihmal edilebilir ve böylelikle impuls yaklaşımı geçerlidir. Bu nedenle,

SMAT süreci izole bir sistem olarak düşünülebilir. Bu, bilyanın momentumundaki değişimin sadece impulsif kuvvetten kaynaklandığını varsayar ve Eşitlik (4.8)'de görüldüğü gibi ifade edilir:

$$I = \Delta p = \bar{F} \times \Delta t \quad (4.8)$$

Şekil 4.15 (Yarar ve diğ., 2021), SMAT tarafından kalıntı gerilime profillerinin oluşmasının ardındaki işleyiş mantığının görselleştirilmiş bir şematik temsilini sunmaktadır. Homojen olmayan gerilme (pozitif) plastik deformasyon, yüzey tabakasında kalıntı basma (negatif) gerilmelere neden olur veya bunun tersi de geçerlidir. SMAT işleminde, plastik gerinim tarafından indüklenen işlenmiş yüzey KBG'yi yoğunlaştırır.



Şekil 4.15. Analitik yaklaşımların şematik gösterimi (Yarar ve diğ., 2021)

Hertz temas teorisi, tek atış ve hedef malzeme arasındaki nonadesif temas için analitik bir çözümdür. Hertz temasındaki varsayımlar SMAT ile uyumludur. Temas süresi aşaması ile ilgili bazı temel varsayımlar sürtünmesiz temas halindeki cisimler ve sürekli yüzeylerdir. Şekil 4.15'te gösterildiği gibi, R yarıçapındaki bilya, hedef malzeme yüzeyini u derinliğine kadar deforme eder ve böylece Eşitlik (4.9) elde edilir:

$$a = \left(\frac{3}{2} \frac{RF}{E_*} \right)^{1/3}, u = \left(\frac{2F^2}{E_*^2 R} \right)^{1/3}, \frac{1}{E_*} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \nu_{bilya}^2}{E_{bilya}} + \frac{1 - \nu_{malzeme}^2}{E_{malzeme}} \right) \quad (4.9)$$

burada E , elastisite modülü ve ν Poisson oranıdır. Bu hesaplamalarda, F , yaklaşmanın impuls ve momentum aşamasında hesaplanan impulsif kuvvetten tasvir edilebilir. Ayrıca, bir bilyanın maksimum hızı 1 m/s'yi geçmediği için yarı statik indentasyon koşulları geçerlidir. Böylece, Hertz temas gerilmesi Eşitlik (4.10)'da verildiği gibi hesaplanabilir:

$$\sigma_{Hertzian\ stress} \cong \frac{3}{2} \frac{F}{\pi a^2} \quad (4.10)$$

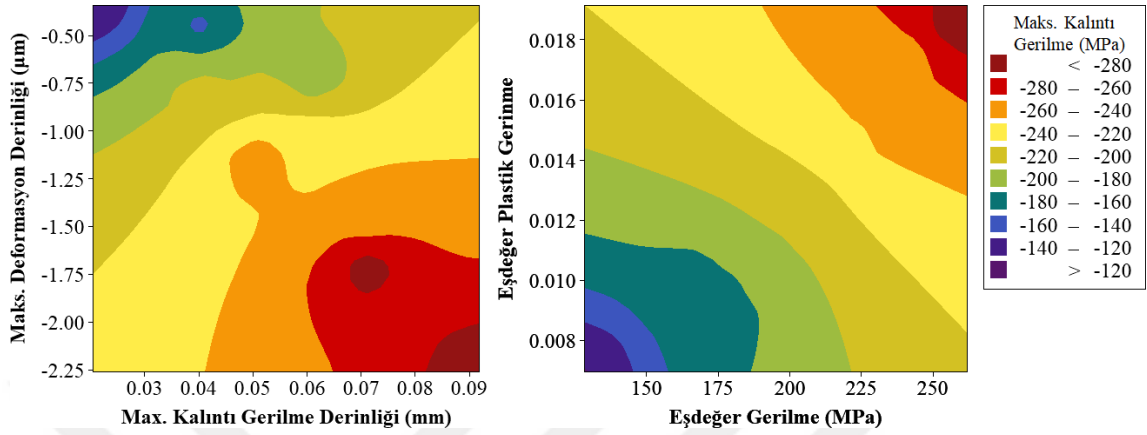
Daha sonra, malzemenin gerilim-gerinim ile ilgili davranışını temsil etmek için JC malzeme modeli benimsenmiştir. Sonuçta, kinetik enerjiden JC modeline dört aşamalı bir hesaplama kullanmak, SMAT prosesindeki plastik deformasyon gerilimini vermektedir.

Bu bölümde, AA7075-T6 için bilya hızı ve boyutunun kalıntı basma gerilmeleri ve plastik deformasyon mekanizmaları üzerindeki etkileri dinamik açık sonlu elemanlar yöntemine göre ve ANSYS/AUTODYN modülü kullanılarak analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları değerlendirildiğinde aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

Maksimum eşdeğer gerilme ortalaması, bilya hızının artmasıyla hızla artmıştır. Seçilen parametreler göz önüne alındığında, maksimum eşdeğer gerilme üzerinde bilya boyutunun bilya hızı kadar etkili olmadığı görülmüştür. Bilya çapı artışı, MKG derinliği ve iz çapı hariç analiz edilen tüm etkiler için hız artışından daha az artışa neden olmuştur. Bilya hızı ve boyutu, MKG derinliği üzerinde yaklaşık olarak aynı etkiye sahiptir. Öte yandan, artan bilya hızı deformasyon derinliğini artırmış ve yüzeyi daha pürüzlü hale getirmiştir. Maksimum plastik gerinim ve çarpışma katsayısı, bilya boyutuna ve hızına bağlı olarak benzer değişiklikler göstermiştir.

Şekil 4.16, eşdeğer plastik gerinim ile eşdeğer gerilim ve maksimum deformasyon derinliğinin MKG derinliği arasındaki değişimi için kontur grafiklerini göstermektedir. 150 MPa'dan 250 MPa'ya eşdeğer gerilimin artan eğilimine paralel olarak, maksimum plastik gerinim değerleri 0.008-0.018 aralığını takip eder. Benzer şekilde, maksimum

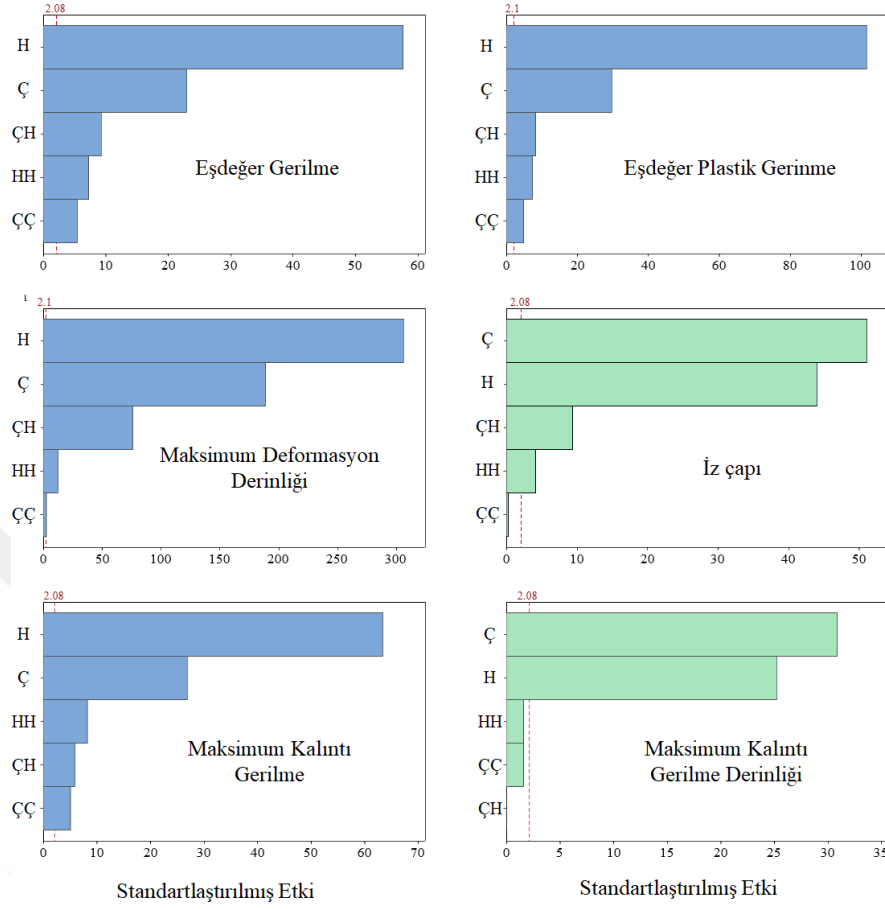
deformasyon derinliği ve MKG derinliği, işlenmiş yüzey üzerinde tutarlı bir değişiklik ve yayılma gösterir. Deformasyon derinliği ve eş değer plastik gerinim arttıkça MKG’de artış göstermiştir.



Şekil 4.16. Maksimum plastik gerinim ile eşdeğer gerilimin değişimi ve maksimum deformasyon derinliği ile maksimum artık gerilim derinliğinin değişimi için dağılım grafikleri

Şekil 4.17’de modelleme sonrası elde edilen Pareto etki grafiği verilmiştir. Burada modelleme de kullanılan parametrelerin cevap fonksiyonlarına olan etkileri, lineer, ikili etkileşim ve kuadratik olarak görselleştirilmiştir. Pareto grafiği istatistiki analiz sonrası cevaplar üzerindeki en önemli faktörleri belirlemek için kullanılmaktadır. Bu grafiğe göre eş değer gerilme ve eş değer plastik gerinme için en önemli etki parametresinin bilya hızı olduğu anlaşılmaktadır. Daha sonra ise bilya çapı değişiminin sonuçlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Etkileşim ve kuadratik terimler olan değişkenler ise sırasıyla bilya çapı – bilya hızı, bilya hızı – bilya hızı ve bilya çapı – bilya çapı çiftleri olarak sıralanmaktadır. Maksimum deformasyon derinliği ve maksimum kalıntı gerilme için oluşturulan Pareto grafiği incelendiğinde ise yine en önemli etkiyi bilya hızının yarattığı görülmektedir. İkinci en önemli etkinin ise yine bilya çapı tarafından oluşturulduğu göze çarpmaktadır. Yine de not etmek gerekir ki, maksimum deformasyon derinliği üzerinde bilya çapının etkisi diğer cevaplara göre daha yüksektir. Bu sonuçlardan farklı olarak darbe sonrası oluşan iz çapı ve maksimum kalıntı gerilme derinliği incelendiğinde ise en önemli etkinin bilya çapı tarafından olduğu görülmektedir. Ancak bilya hızının parametrik değişiminin yarattığı etki de azımsanmayacak bir düzeydedir. Diğer etkileşim ve kuadratik terimlerin etkileri ise oldukça düşük seviyede kaldığı anlaşılmıştır.

PARETO ETKİ GRAFİKLERİ



Şekil 4.17. Pareto etki grafikleri

Sonuç olarak bu bölümde, bu aşamaya kadar elde edilen bulgular ışığında gerçekleştirilen tek darbeli simülasyonların hedef malzeme üzerinde kalıcı şekil değişimine sebep olduğu görülmüştür. Yani 0,5 m/s ve 1 m/s arasında değişen bilya hızlarında, 3, 4 ve 5 mm çapındaki bilyaların hedef malzemeye çarptırılması sonucu kalıcı şekil değişimi ve kalıntı gerilmeler elde edilebilmektedir. Bir sonraki bölümde bu bulgular deneysel olarak değerlendirilecektir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Malzeme ve Yöntem

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar için Ø25 mm çapında ekstrüzyonla üretilmiş çubuk malzemesi olarak tedarik edilen AA7075-T6 alaşımı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılacak olan numuneler hassas kesme makinasında (Microcut, Metkon) 10 mm kalınlığında olacak şekilde kesilmiştir. AA7075'in kimyasal bileşenleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. AA7075'in kimyasal bileşenleri (wt.%).

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
Numune	0,10	0,22	1,70	0,09	2,51	5,75	0,18	0,02	Balans
EN 573-3	≤0,40	≤0,50	1,2-2,0	≤0,30	2,1-2,9	5,1-6,1	0,18-0,28	≤0,20	

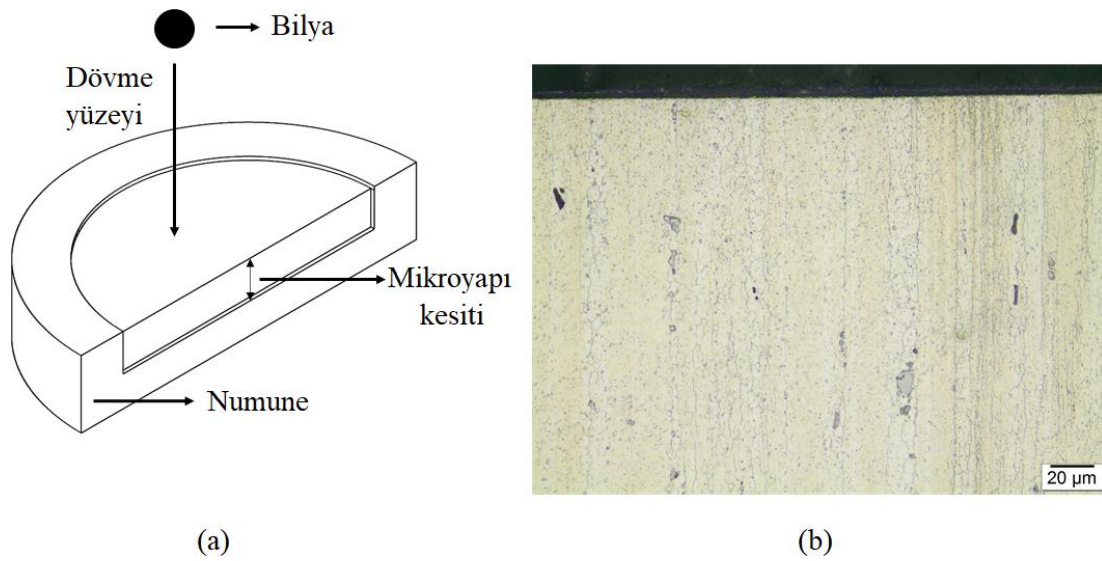
7075 alüminyum alaşımı doğal yaşlanabilen bir malzeme olduğundan deneylerde kullanılacak malzemelerin uniform özellikler gösterebilmesi için alaşıma yeniden T6 ısıtma işlemi uygulanmıştır. Bunun için öncelikle tedarik numunesine 0 kondisyon tavlama işlemi uygulanmıştır. Tavlama işlemi tamamlandıktan sonra ise tüm deney numunelerine yeniden T6 ısıtma işlemi uygulanmıştır. Tablo 5.2'de deney numunelerine uygulanan ısıtma işlem koşulları verilmiştir (Kaufman, 2000).

Tablo 5.2. Isıtma işlemi parametreleri

Temper	Isıtma işlemi parametreleri
0	Tavlama, en düşük dayanım, en yüksek tokluk, 470 °C 3 saat, fırında soğuma.
T6	480 °C 3 saat tutma, oda sıcaklığında suda su verme ve 120 °C 24 saat yapay yaşlandırma.

10 mm kalınlığında kesilen AA7075-T6 deney numuneleri SMAT uygulaması öncesinde metalografik olarak hazırlanmıştır. Kesilen numuneler, SMAT etkilerini daha detaylı olarak inceleyebilmek için sırasıyla 180, 400, 600, 800 ve 1200 meshlik zımparalar ile zımparalanmış ve alkol ile temizlenmiştir. SMAT uygulanan numunelerin yüzey altı

mikroyapılarını inceleyebilmek için ise numuneler hassas kesme makinasında kesilmiş ve ardından 2500 meshe kadar zımparalanmıştır. Parlatma işlemi ise 6 μm ve 1 μm elmas solüsyonlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Parlatılan numuneler mikroyapıları net bir şekilde ortaya çıkarmak için Graff Sergeant solüsyonunda (84 ml su, 15,5 ml HNO_3 , 0,5 ml HF, 3 g CrO_3) 20 s boyunca dağlanmıştır (Koç ve diğ., 2018, Li ve diğ., 2012). SMAT sonrası yüzey altı mikroyapı incelemeleri için Olympus marka optik mikroskop (OM), Jeol JSM6060 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Şekil 5.1a ve 5.2b’de sırasıyla yüzey altı mikroyapı incelemeleri için şematik görünüm ve AA7075-T6 için işlem görmemiş kesit mikroyapısı verilmiştir.



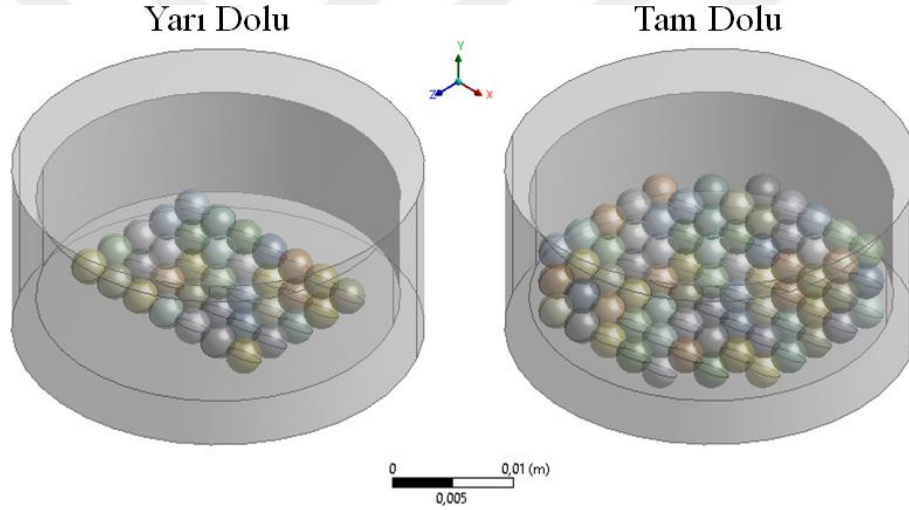
Şekil 5.1. a) Mikroyapı incelemeleri için şematik görünüm b) AA7075-T6 için işlem görmemiş kesit mikroyapısı

Deneylerde kullanmak üzere 3, 4 ve 5 mm çaplarında AISI52100 rulman çeliği tedarik edilmiştir. Tablo 5.3’te deneylerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir. AA7075-T6 ile AISI52100 malzemelerin akma dayanımları arasındaki büyük fark, bilyaların elastik olarak kabul edebilmemizi sağlamaktadır. Bu değerlendirme oldukça önemlidir. Bir önceki bölümde yapılan tek darbe simülasyonlarında hedef malzeme deforme olabilen özellikte tanımlanırken, bilya rijit olarak tanımlanmıştı idi. Tablo 5.3’te verilen mekanik özellikler arasındaki büyük fark simülasyonlarda yapılan bu kabülü doğrular niteliktedir. Yani SMAT deneylerinde bilyaların ihmal edilebilir düzeyde deformasyona uğrayacağı kabul edilmiştir.

Tablo 5.3. Deneylerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	σ_0 (Çekmede Akma Dayanımı) (MPa)
AA7075-T6	2804	71,7	0,3	503
AISI52100	7834	213	0,29	1618

Deneylerin gerçekleştiği SMAT odacığının şematik görünümü Şekil 5.2’de verilmiştir. SMAT odası 28 mm çapında ve 10 mm yükseliğinde olup paslanmaz çelik malzemeden oluşmaktadır.



Şekil 5.2. SMAT odasının şematik görünümü

Deneylerde bilya sayısının yani doluluk oranının etkilerini gözlemlemek amacıyla Şekil 5.2’de görüldüğü gibi farklı sayı da bilyalar kullanılmıştır. SMAT deneyleri için tasarlanan titreşim tablası 2. Bölüm’de detaylı olarak ele alınmış idi. SMAT için titreşim parametreleri 50 Hz titreşim frekansı ve 1 mm titreşim genliği olarak belirlenmiştir. Deney süresi her durum için 3 saat olarak belirlenmiştir. Bu süre tam örtme oranı sağlayabilmek amacıyla ve yüzeyin homojen bir şekilde dövülebilmesi göz önüne alınarak ön deneyler sonunda belirlenmiştir.

Deneyler sonrası dövülen numunelerin üç boyutlu yüzey topografisi stylus tipi bir optik profilometre (Veeco Dektak 8 Profilometer) ile analiz edilmiştir. Stylus tipi

profilometrelerde bir prob yüzey boyunca fiziksel olarak hareket ettirilerek yüzey topografisi oluşturulur. Deney numuneleri üzerinden 1x1 mm²'lik bir alan optik profilometre yardımı ile taranmış ve her bir numunenin 3 boyutlu yüzey topografisi bir yüzey analiz programı (Vision) aracılığı ile oluşturulmuş ve pürüzlülük analizleri yapılmıştır. R_a , evrensel olarak tanınan pürüzlülük parametresidir. Pürüzlülük ortalaması R_a , pürüzlülük profili koordinatlarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. Örnekleme uzunluğundaki beş en yüksek tepe ile beş en derin çukur arasındaki mesafelerin ortalaması ise R_z olarak tanımlanır. Tez kapsamında yüzey pürüzlülüğü R_a ve R_z değerleri üzerinden değerlendirilmiştir.

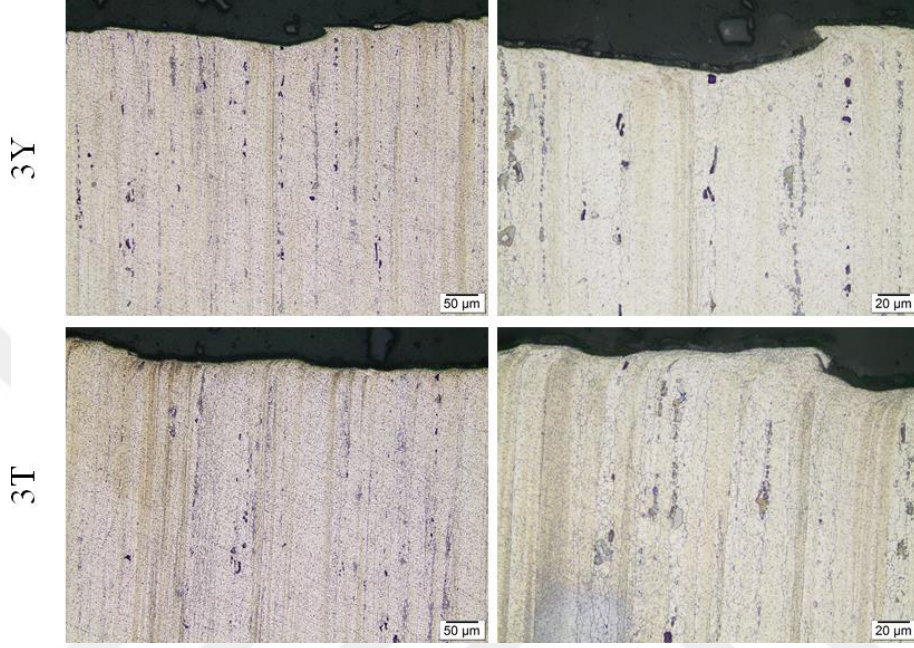
Deneyler sonrası numunelerde oluşan kristalit boyutu, dislokasyon yoğunluğu mikrogerinim ve kalıntı gerilme, X-ışınları kırınım analizi (XRD) yapılarak elde edilmiştir. XRD analizi için Cu-K α radyasyonlu Bruker D8 Advanced marka difraktometre kullanılmıştır. Ölçümler $\sin^2(\psi)$ ($\lambda=0.15406$) yöntemi ve izo-eğim modunda gerçekleştirilmiştir.

SMAT deneyleri sonrasında her bir numuneye aynı koşullar altında abrasif aşınma deneyleri uygulanmıştır. Deneyler CSM Instrument Tribometer marka aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numuneye ball-on-disk tipi aşınma türü ve salınım hareketli (reciprocating) lineer tipte aşınma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde karşıt malzeme olarak 6 mm çapında Al₂O₃ bilya kullanılmış olup 2 N normal yük uygulanmıştır. Salınım hareketi için 8.5 mm yarı genlik ve 20 cm/s lineer kayma hızı seçilmiştir. Her testin süresi toplam da 300 m olacak şekilde uygulanmıştır. Aşınma deneyleri sonrası ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlendirilmiştir. Aşınma oranı, aşınma izinin optik profilometre ile ölçülmesiyle hesaplanmıştır. Ek olarak aşınan yüzeylerde SEM incelemeleri yapılmıştır.

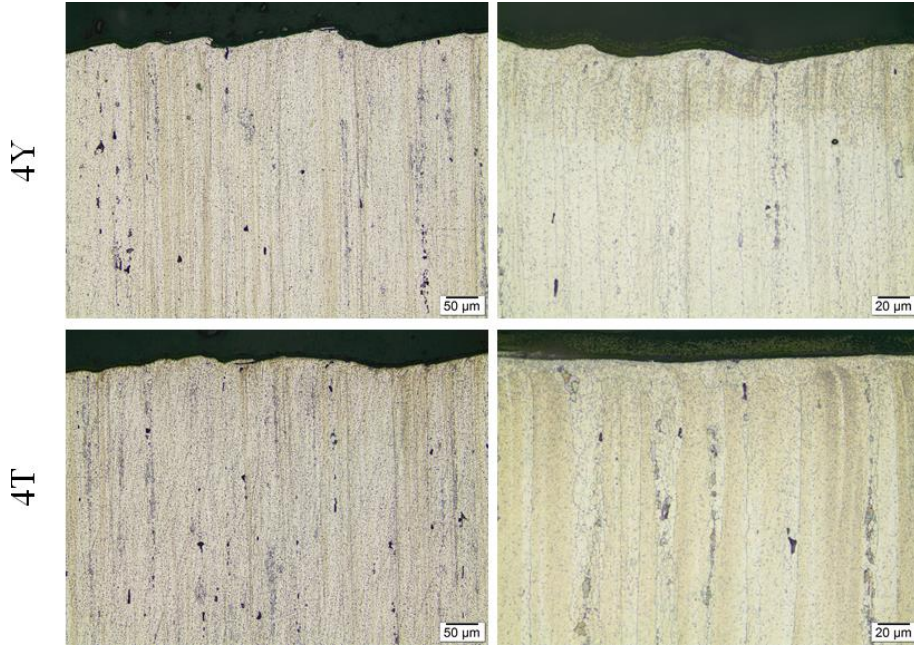
5.2. Mikroyapı İncelemeleri

Şekil 5.3, 5.4 ve 5.5'te SMAT uygulanan deney numunelerinin kesit görüntülerinin optik mikroskop ile görüntülenen mikroyapıları verilmiştir. Bu görüntülerin tamamı Şekil 5.1b'de verilen işlenmemiş malzeme kesiti ile kıyaslandığında bilyaların sebep olduğu çukurlar, tepecikler, iz ve yığılma bölgeleri ayırt edilebilmektedir. Bir başka deyişle SMAT uygulaması malzeme de kalıcı plastik deformasyona sebep olmuştur. Deneylerde

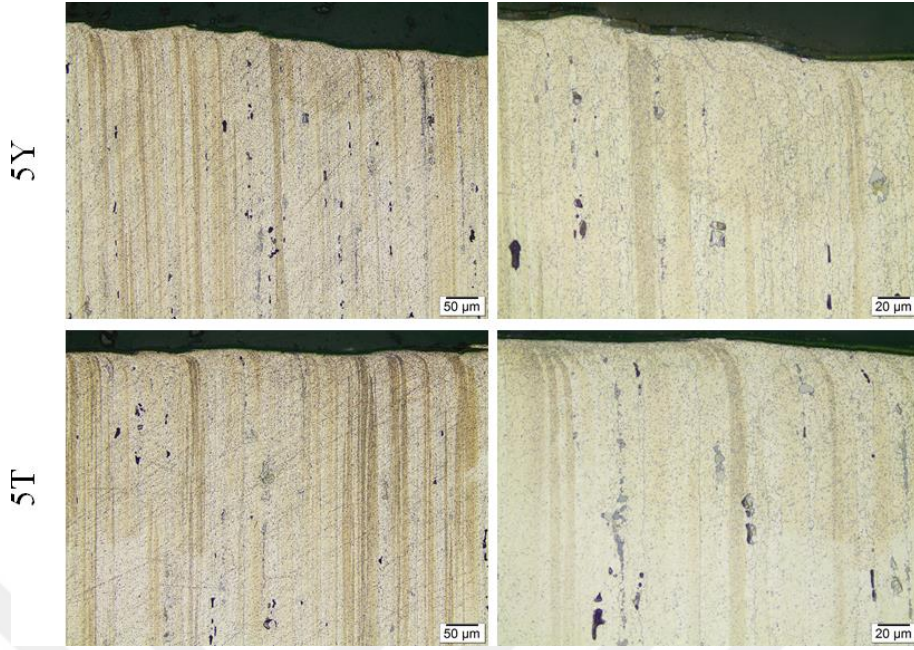
kullanılan AA7075-T6 ekstrüzyonla üretilmiş bir malzeme olduğundan dik yönlenmiş tanelere sahiptir. Bu dik yönlü tane dizilimleri Şekil 5.1b’de açıkça görülmektedir. Ancak SMAT sonrası bu dik yönlenmiş tanelerin belli açılarda yönlenmelerinin değiştiği görülmektedir.



Şekil 5.3. 3Y ve 3T için SMAT sonrası OM mikroyapısı

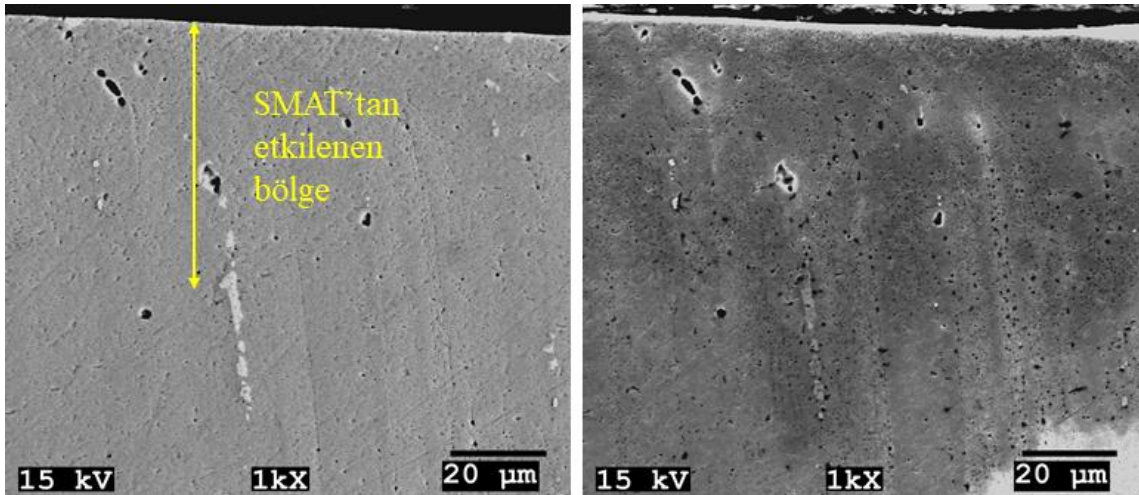


Şekil 5.4. 4Y ve 4T için SMAT sonrası OM mikroyapısı



Şekil 5.5. 5Y ve 5T için SMAT sonrası OM mikroyapısı

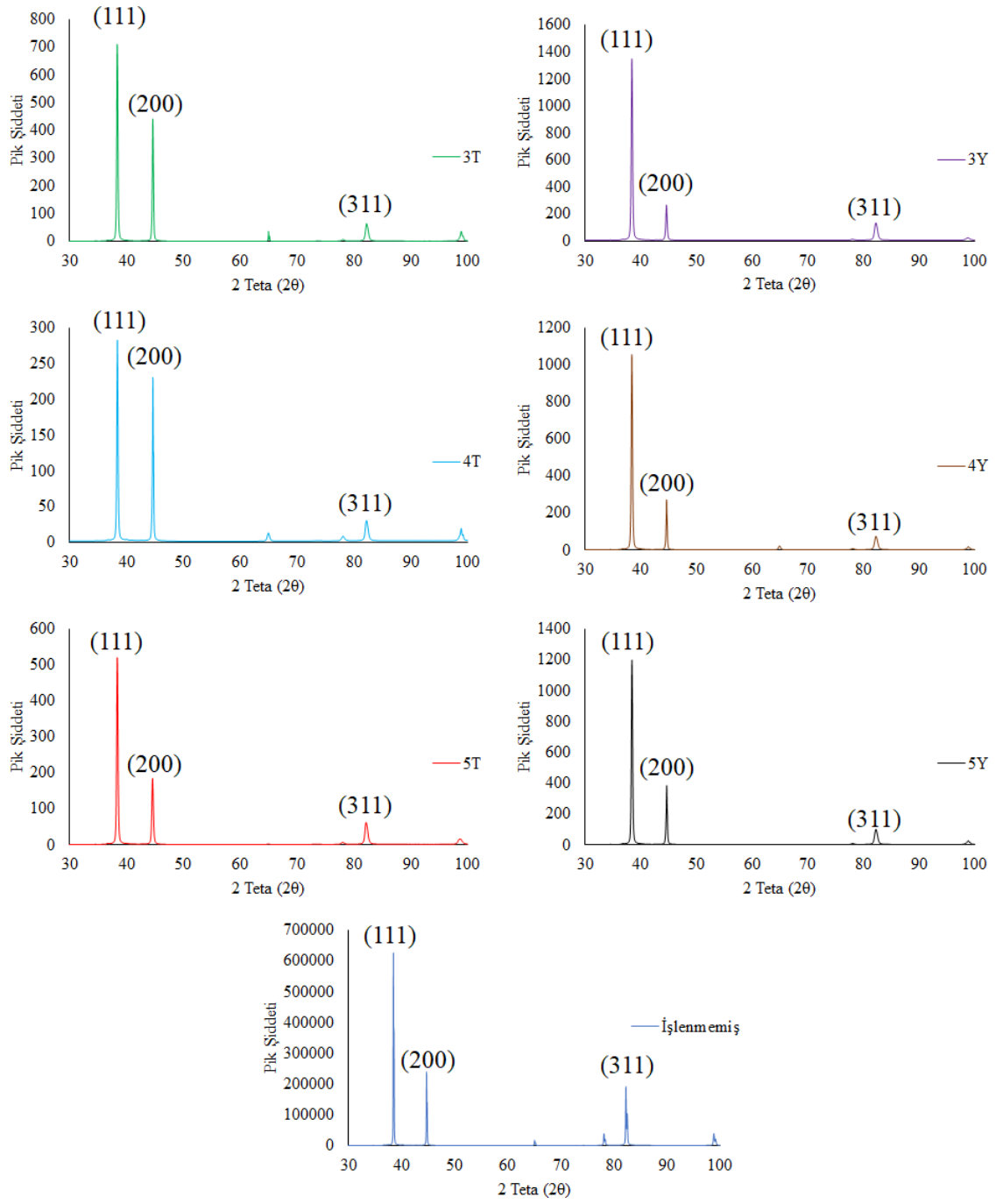
Şekil 5.6'da 5T numunesi için elde edilen SEM mikroyapısı verilmiştir. Burada aşırı plastik deformasyonun etkili olduğu bölgenin daha ince taneli bir yapıya dönüştüğü ve nanokristalin bir tabaka oluştuğu düşünülmektedir. Titreşim etkisiyle tekrarlı olarak bilya darbelerine maruz kalan malzeme yüzeyi, aşırı plastik deformasyona uğramıştır. Bunun sonucunda tane sınırlarının artmasıyla tane incelmesinin gerçekleştiği ve ikincil fazlarda yönelmelerin meydana geldiği düşünülmektedir.



Şekil 5.6. 5T için SMAT sonrası SEM mikroyapısı

5.3. XRD analizi

Numunelerde SMAT öncesi ve sonrası kristalit boyutlarının belirlenmesi için XRD analizi yapılmıştır. Kristal yapıyı oluşturan her tane yönler göre farklılık gösteren kristalitler içerir. Taneler, kafes düzlemleri arasında küçük bir açıyla ayrılan çok sayıda kristalit tarafından oluşturulabilir. Bununla birlikte, XRD analizi sonrası ölçülen kristalit boyutu, kristallerin tutarlı bir şekilde kırınım yapan alanlarının boyutuna karşılık gelir ve malzemeyi oluşturan taneler, küçük bir kristalografik oryantasyonsuzluk ile ayrılan bu alanlardan birkaçını içerebilir. Bu, kristalit boyutunun, esas olarak optik mikroskopi analizine atıfta bulunulan geleneksel tane boyutu olarak kabul edilemeyeceği anlamına gelir. Öte yandan, bu tip bir mikroyapıda, geleneksel bir tane boyutunu ayırt etme imkanı yoktur, ancak tane inceltme işlemi ayrıca kristalit boyutunun incelenmesini de içerir, böylece kristalit boyutu, SMAT'ın nanokristalizasyon etkisinin karşılaştırılması için bir değer olarak kullanılabilir (Trško ve diğ., 2017). XRD analizi ile kristalit boyutunun belirlenmesi için kullanılan farklı formülasyonlar ve değerlendirme yöntemleri mevcuttur. Debye Scherrer yöntemi de araştırmacıların sıklıkla tercih ettiği yöntemlerden bir tanesidir. Bu yöntem, A7075-T6'in kristalit boyutunu, kristalit boyutundaki azalmayla birlikte pik genişliğinin arttığı XRD tepe noktaları kullanılarak ölçmek için kullanılmaktadır (Abeens ve diğ., 2020, Altuntaş ve diğ., 2021, Ding ve diğ., 2019, Hao ve diğ., 2019). SMAT sırasında yüksek frekansta titreşen bilyalar malzeme yüzeyini aşırı deformasyona maruz bırakır ve taneler, radyan cinsinden maksimum yükseklikte yarı genişlik (FWHM) değerlerinde uyumlu olarak kırınım yapan birkaç alana bölünür (Hao ve diğ., 2019). Şekil 5.7'de SMAT öncesi ve sonrası deney numunelerinde elde edilen XRD patern grafikleri verilmiştir. Grafikteki piklerden maksimum yükseklikte olanının, genişliği malzemenin mukavemeti ve sertliği ile ilişkilidir. Patern grafiklerine göre en yoğun α -Al düzlemi olan (111) için FWHM ve Bragg açıları ölçülmüştür. Bu düzlem, alüminyum alaşımları için önerilen en yoğun XRD ölçümündeki tepe düzlemine karşılık gelir. Daha sonra bu değerler Eşitlik (5.1)'de verilen Debye Scherrer eşitliği kullanılarak ortalama kristalit boyutları SMAT uygulanan numuneler için hesaplanmıştır.



Şekil 5.7. Deney numuneleri için elde edilen XRD paternleri

Debye Scherrer eşitliği:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (5.1)$$

şeklindedir ve burada, D ; kristalit tane boyutunu, k ; Scherrer sabitini (0,9), λ ; X ışını dalga boyunu 0,154 nm, β ; FWHM değerini ve θ ; incelenen düzlemin Bragg açısını ifade eder (Scherrer, 1912). Ayrıca, dislokasyon yoğunluğu ve mikrogerinim, Williamson–Hall grafiği kullanılarak XRD'den hesaplanabilmektedir (Williamson ve Hall, 1953). Dislokasyon yoğunluğu:

$$\delta = \frac{1}{D^2} (\text{lines} / \text{m}^2) \quad (5.2)$$

Eşitlik (5.2) kullanılarak hesaplanır. Tanedeki mikrogerinim hesabı ise:

$$\varepsilon = \frac{\beta \cos \theta}{4} \quad (5.3)$$

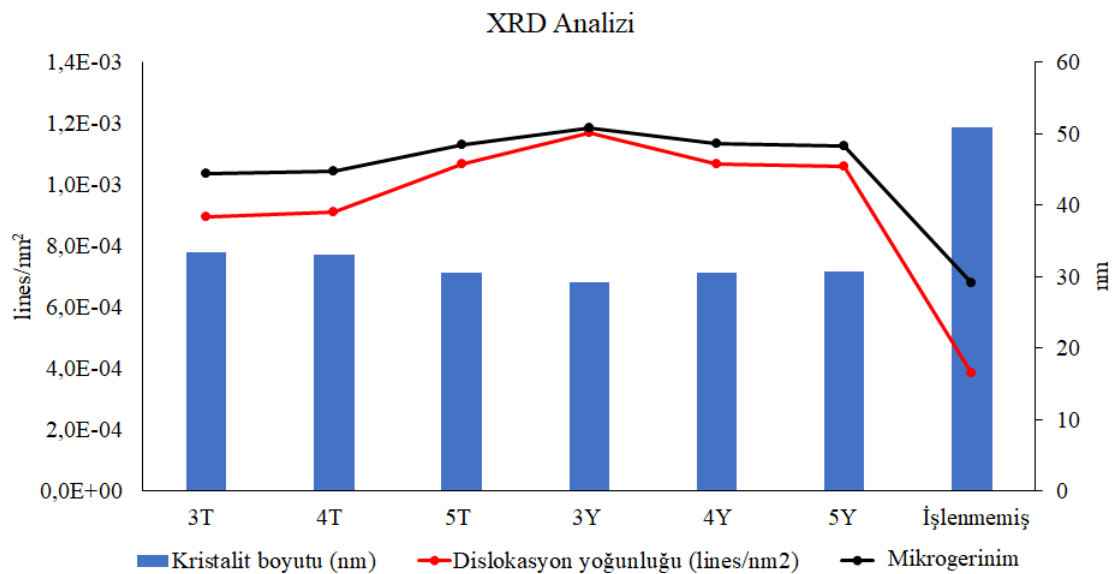
Eşitlik (5.3)'ten hesaplanabilmektedir. Tablo 5.4'te XRD analizi sonuçlarına göre hesaplanan ortalama kristalit boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve mikrogerinim değerleri verilmiştir.

Tablo 5.4. XRD analizi tablosu

Numune	Pik açısı (Bragg, 2θ)	FWHM (β)	Kristalit boyutu (nm)	Dislokasyon yoğunluğu (lines/nm ²)	Mikrogerinim
3T	38,401	0,252	33,3819	8,9738E-04	0,0010
4T	38,442	0,254	33,1232	9,1146E-04	0,0010
5T	38,421	0,275	30,5918	1,0685E-03	0,0011
3Y	38,421	0,288	29,2109	1,1720E-03	0,0012
4Y	38,401	0,275	30,5899	1,0687E-03	0,0011
5Y	38,442	0,274	30,7054	1,0606E-03	0,0011
İşlenmemiş	38,421	0,165	50,9863	3,8467E-04	0,0007

Şekil 5.8'de ise kristalit boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve mikrogerinim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre işlenmemiş numune için kristalit boyutu 50,92 nm iken, SMAT

deneyleri sonrası bu değerin 29 – 33 nm aralığına kadar azaldığı görülmektedir. Tane boyutunda yaklaşık 43%’lük bir inceltme olduğu kaydedilmiştir. Benzer şekilde SMAT sonrası dislokasyon yoğunluğu yaklaşık 3 kat, mikrogerinim ise 2 kat artmış durumdadır. SMAT sonrası tane boyutundaki azalmanın, şiddetli plastik deformasyon ve artan dislokasyon yoğunluğu nedeniyle dövülmüş numunede ince tanelerin oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Artan dislokasyon yoğunluğu malzemenin pekleşmesine yol açmıştır. Tekrarlı bilya darbeleri dislokasyon yoğunluğunu artırırken tanelerin de incelmeye yol açarak malzeme yüzeyinde işlenmemiş duruma göre daha mukavim bir tabaka elde edilmesini sağlamıştır. Bilya çapı ve bilya sayısının kristalit boyutu üzerinde işlenmemiş numuneye oranla az da olsa etkisinin olduğu açıktır. Bilya sayısının azalması genel olarak tane boyutunu daha da inceltirken dislokasyon yoğunluğunu artırmıştır. Bu durum bilya hızının yarı dolu durum da daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek bilya hızı daha yüksek darbe enerjisi oluşmasına sebep olmuştur. En ince tane yapısı ve en yüksek dislokasyon yoğunluğu 3Y nolu numunede elde edilmiştir. Bilya hızı için yapılan simülasyon çalışması da en yüksek ortalama bilya hızının 3Y koşulunda ve 0,9 m/s olarak bulunduğunu göstermiş idi. XRD analizi bilya hızının tane yapısında doğrudan etkili bir faktör olduğunu açığa çıkarmıştır. AA7075-T6 alaşımının SMAT sonrası elde edilen kristalit boyut değişimlerinin literatürde bulunan muadil çalışmalarla mukayese edilebilir olduğu kaydedilmiştir (Abeens ve diğ., 2019, Efe ve diğ., 2020, Pandey ve diğ., 2017, Trško ve diğ., 2017, Wu ve diğ., 2002).



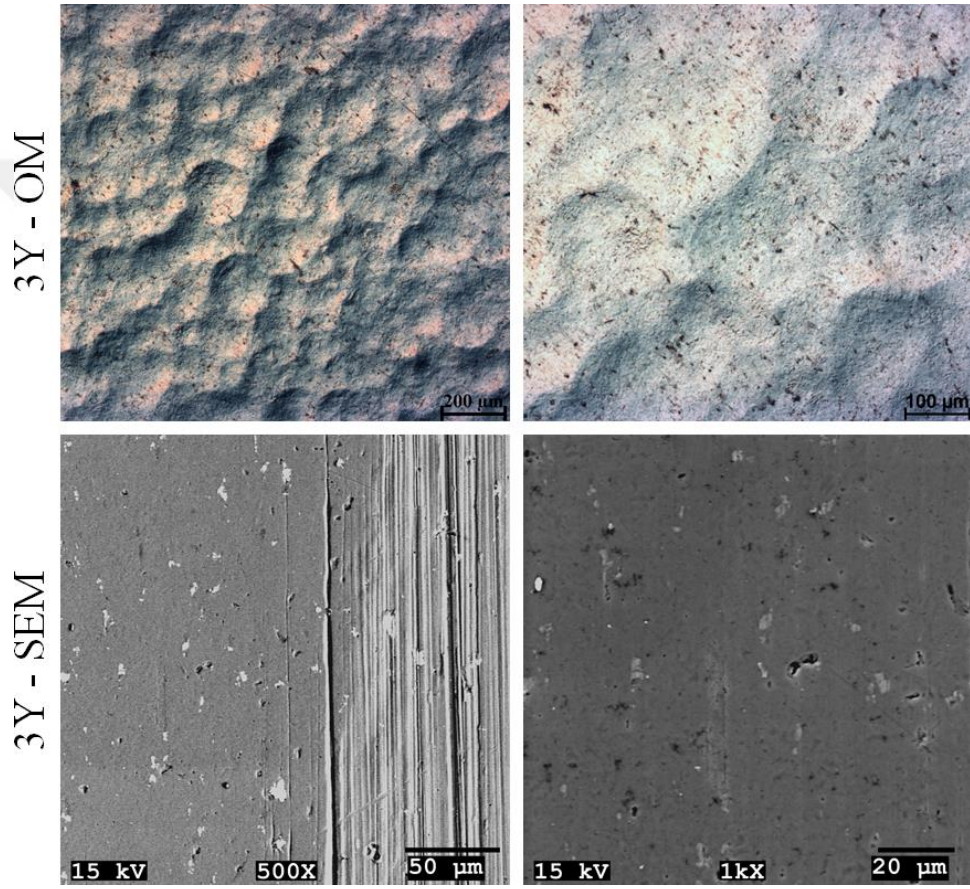
Şekil 5.8. XRD analizi sonrası elde edilen kristalit boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve mikrogerinim grafiği

5.4. Yüzey Topografisi ve Pürüzlülük İncelemeleri

Yüzey pürüzlülüğü malzemelerin kullanım ömrünü belirleyen en önemli parametrelerden bir tanesidir. Mekanik yüzey işleme teknikleri ile işlenen numunelerin yorulma ömrü ve buna karşılık gelen hasar sürecinin, yüzey durumuna, kalıntı gerilmelere ve pekleşmeye bağlı olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, yorulma çatlaklarının numune yüzeyinden başladığı bilindiğinden, numunenin yüzey pürüzlülüğü de yorulma ömrü üzerinde önemli bir rol oynamaktadır (Bag ve diğ., 2019). Yorulma davranışı açısından pürüzlülük, çatlakların başlamaya daha yatkın olduğu her bir oluktaki gerilme yoğunlukları ile çok sayıda küçük çentik görevi görür. Bu nedenle, pürüzlülük arttıkça yorulma mukavemeti azalır. Özellikle mekanik yüzey işlemlerinin malzeme yüzeyinde meydana getirdiği deformasyonla beraber yüzey pürüzlülüğünü artırdığı bilinmektedir. Aşırı bilyalı dövme gibi prosesler yüzey pürüzlülüğünü aşırı limitlere kadar arttırdığından (Mylonas ve Labeas, 2011, Unal, 2016) ve yüzey çatlakları oluşturduğundan, uygulanan proses zararlı hale gelebilmektedir. Bazı çalışmalar bilyalı dövmenin neden olduğu artan yüzey pürüzlülüğü nedeniyle yeni çatlakların oluşabileceğini ortaya koymuştur (Benedetti ve diğ., 2015, Trško ve diğ., 2014). Benzer şekilde artan yüzey pürüzlülüğünün korozyon direncini de zayıflatabileceğini belirten pek çok çalışma vardır (Bagherifard ve diğ., 2018, Wang ve diğ., 2018). Bazı araştırmacılar bu zararlı etkileri elimine edebilmek ve yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için tekrar dövme veya taşlama gibi ikincil prosesler uygulamıştır (Heredia ve diğ., 2011, Maleki ve diğ., 2018). Ancak bu tür ek prosesler hem zaman alıcı hem de ek maliyetler oluşturabilmektedir. SMAT prosesini bilyalı dövme gibi diğer mekanik yüzey işlemlerinden ayıran en önemli fark prosesin görece daha düşük hızlarda gerçekleşmesidir. Ancak literatür araştırması AA7075 için SMAT proseslerinde de yüzey pürüzlülüğünün önemli ölçü de artabileceğini göstermiştir. Farklı mekanik yüzey işlemleri uygulanan AA7075 çalışmalarında, işlenmemiş numuneler göz önüne alındığında kat ve kat yüksek pürüzlülük değerleri ortaya çıkabilmektedir (Abeens ve diğ., 2019, Avcu, 2017, Efe ve diğ., 2020, Gao ve diğ., 2020, Martín ve diğ., 2020, Maurel ve diğ., 2020, Pandey ve diğ., 2017, Pandey ve diğ., 2019, Trško ve diğ., 2017, Zhang ve diğ., 2019, Zhu ve diğ., 2020, Zupanc ve Grum, 2011).

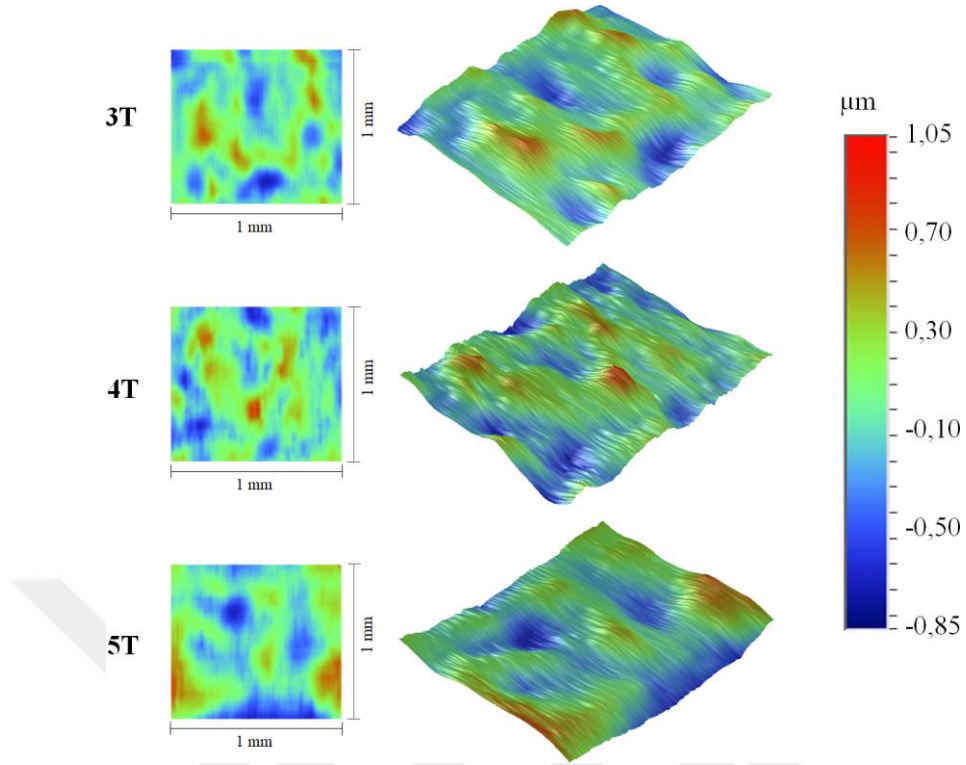
Şekil 5.9’da 3Y için SMAT sonrası yüzey morfolojisi gösterilmiştir. Görüntüler optik mikroskop ve SEM ile elde edilmiştir. Yüzeyde homojen bir dövme gerçekleştiği ve tepe

ve çukurların oluştuğu açıktır. Titreşim etkisiyle yüzeye rastgele çarpan bilyaların oluşturduğu deformasyon izleri seçilebilmektedir. Özellikle bilyalı dövme proseslerinde görülen yüzeye bilya gömülmesi veya yüzeyden malzeme kaldırma gibi aşırı plastik deformasyonun sebep olduğu kusurlar söz konusu değildir. SEM ile elde edilen görüntülerde SMAT uygulanmayan yüzey ile SMAT uygulanan yüzey arasındaki fark seçilebilmektedir. Ancak bu görüntüleme biçimi yüzeyde oluşan pürüzlülük seviyesini anlayabilmemiz için yeterli değildir.

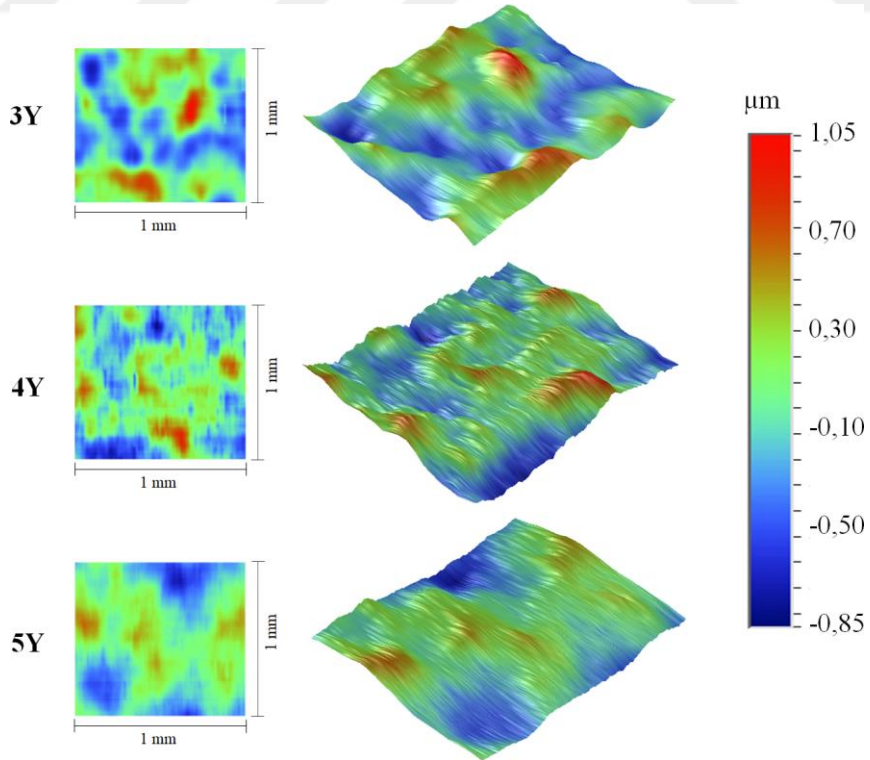


Şekil 5.9. 3Y için SMAT sonrası yüzey morfolojisi

Şekil 5.10 ve 5.11’de SMAT sonrası optik profilometre ile elde edilen yüzey topografileri verilmiştir. Şekillerde yüzey taraması sonrası elde edilen topografi görüntüleri hem iki boyutlu hem de üç boyutlu olarak verilmiştir. Her iki şekilde de pürüzlülük ölçeği aynı tutulmuştur. Buna göre en yüksek tepe ve çukur bölgelerinin 1,05 ile-0,85 µm arasında değiştiği görülmektedir. Bu değişim ölçeği yapılan SMAT uygulamasının muadil proseslere oranla oldukça düşük seviyelerde bir pürüzlülük oluşturduğunu söylememize olanak sağlamaktadır.



Şekil 5.10. SMAT sonrası 3T, 4T ve 5T numuneleri için elde edilen 3 boyutlu yüzey topografisi



Şekil 5.11. SMAT sonrası 3Y, 4Y ve 5Y numuneleri için elde edilen 3 boyutlu yüzey topografisi

Tablo 5.5’te bu görüntülere göre elde edilen R_a ve R_z değerleri verilmiştir. SMAT sonrası ölçülen ortalama pürüzlülük değerinin, tüm koşullar için beraber değerlendirildiğinde 0,16 ile 0,24 μm arasında değiştiği görülmektedir. Bu sonuçlar oldukça çarpıcıdır. SMAT öncesi işlenmemiş numune de ölçülen R_a değeri 0,14 iken, SMAT sonrası bu değer maksimum 0,24 μm mertebesine ulaşmıştır. Literatürde, AA7075-T6 için muadil proseslere göre yapılan yüzey pürüzlülüğü analizlerinde ulaşılan en optimum R_a ve R_z değerinin sırasıyla 1,77 ve 7,48 μm olduğu kaydedilmiştir (Gao ve diğ., 2020). Tez kapsamında SMAT sonrası R_a ve R_z için ulaşılan 0,24 ve 1,74 μm değerleri bu değerlerle kıyaslandığında 7,4 ve 4,3 katlık bir iyileşme sağlandığı görülmüştür. Bu kıyaslama her iki çalışmada da ulaşılan en yüksek pürüzlülük değerleri üzerinden yapılmıştır. Ortaya çıkan bu sonuçlar geliştirilen titreşim tablasının yüzey pürüzlülüğünü neredeyse hiç artırmadığını kanıtlar niteliktedir. Titreşen bilyaların ulaştığı ortalama hız değerleri malzeme yüzeyini aşırı deforme etmeden ve yüzey morfolojisini bozmadan malzeme yüzeyine çarpmıştır. Sayısız defa tekrarlı çarpmanın etkisiyle malzeme yüzeyi pürüzleşmeden nanokristalin tabaka ve kalıntı gerilmeler elde edilebilmiştir. Deney parametrelerinin pürüzlülük değerlerini nasıl etkilediğini anlayabilmek için ise sonuçlar istatistiki olarak modellenmiş ve CYM’ye göre değerlendirilmiştir.

Tablo 5.5. Pürüzlülük analizi

Numune	R_a	R_z
3Y	0,241	1,74
4Y	0,210	1,68
5Y	0,196	1,34
3T	0,169	1,35
4T	0,184	1,49
5T	0,200	1,39
İşlenmemiş	0,14	1,12

Tablo 5.6 ve 5.7’de R_a ve R_z için varyans analizi ile oluşturulan ANOVA tabloları verilmiştir. Sonuçlar P-değeri üzerinden 95% güven aralığında değerlendirilmiştir. Burada bilya çapı ve doluluk oranı etkisi ayrı ayrı irdelenecek olursa, her iki değişkeninde pürüzlülük değerleri üzerindeki etkisinin anlamlı olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. R_a ve R_z için oluşturulan istatistiki model sonuçları yüksek oranlarda içermektedir.

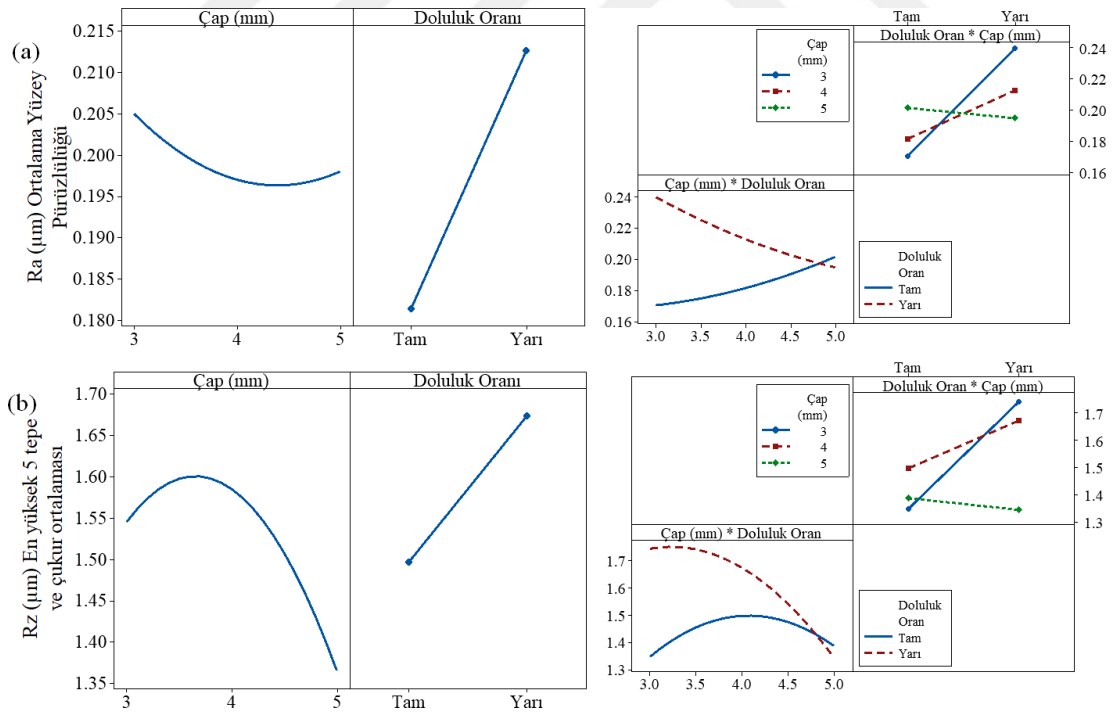
Tablo 5.6. R_a için ANOVA tablosu

Kaynak	SD	Katılım (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Model	4	99,29%	0,008978	0,002244	455,91	0,000
Lineer	2	50,49%	0,004565	0,002282	463,63	0,000
Ç	1	1,63%	0,000147	0,000147	29,86	0,000
DO	1	48,86%	0,004418	0,004418	897,41	0,000
Kare	1	0,90%	0,000081	0,000081	16,45	0,001
Ç*Ç	1	0,90%	0,000081	0,000081	16,45	0,001
2'li etkileşim	1	47,91%	0,004332	0,004332	879,94	0,000
Ç*DO	1	47,91%	0,004332	0,004332	879,94	0,000
Hata	13	0,71%	0,000064	0,000005		
Uyum eksikliği	1	0,71%	0,000064	0,000064	*	*
Saf Hata	12	0,00%	0,000000	0,000000		
Total	17	100,00%				
R ² = 99,29% R ² (adj) = 99,07% R ² (tah.) = 98,73%						

Tablo 5.7. R_z için ANOVA tablosu

Kaynak	SD	Katılım (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Model	4	99,91%	0,450450	0,112612	3659,91	0,000
Lineer	2	52,71%	0,237650	0,118825	3861,81	0,000
Ç	1	21,56%	0,097200	0,097200	3159,00	0,000
DO	1	31,15%	0,140450	0,140450	4564,63	0,000
Kare	1	14,99%	0,067600	0,067600	2197,00	0,000
Ç*Ç	1	14,99%	0,067600	0,067600	2197,00	0,000
2'li etkileşim	1	32,21%	0,145200	0,145200	4719,00	0,000
Ç*DO	1	32,21%	0,145200	0,145200	4719,00	0,000
Hata	13	0,09%	0,000400	0,000031		
Uyum eksikliği	1	0,09%	0,000400	0,000400	*	*
Saf Hata	12	0,00%	0,000000	0,000000		
Total	17	100,00%				
R ² = 99,91% R ² (adj) = 99,88% R ² (tah.) = 99,84%						

Şekil 5.12a ve 5.12b’de sırasıyla R_a ve R_z için CYM’ye göre oluşturulan ana etki ve ikili etkileşim grafikleri verilmiştir. R_a için oluşturulan ana etki grafiği incelendiğinde doluluk oranının yüzey pürüzlülüğünü azalttığı görülmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur. 3. Bölümde yapılan dinamik bilya hızı analizi bilya sayısı artışının ortalama bilya hızını azaltacağını ortaya koymuş idi. Şekil 5.12a’da da bu sonucu destekler nitelikte yarı dolum durumunda daha yüksek pürüzlülük değerine ulaştığı sonucuna varılmıştır. Ancak bu pürüzlülük değeri bile $0,21 \mu m$ seviyesindedir ve alüminyumun sahip olması gereken yüzey özellikleri göz önüne alındığında limitler içerisinde kaldığı görülmüştür. Bilya çapına göre elde edilen ikili etkileşim grafikleri incelendiğinde ise bilya hızı için elde edilen grafiklerle benzer grafiklere ulaşıldığı görülmektedir. Yani, bilya hızı yüzey pürüzlülüğü üzerinde doğrudan etkili bir faktördür. Yüksek bilya hızı yüksek darbe enerjisi ve kinetik enerji üreteceğinden malzeme yüzeyinde de daha yüksek deformasyona sebep olmaktadır. Sonuç olarak daha pürüzlü yüzeyler ortaya çıkmaktadır. R_z için oluşturulan ana etki ve ikili etkileşim grafiklerinde ise R_a ’ya benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bilya çapı artışı ve doluluk oranı ortalama R_z ’yi azaltmıştır.



Şekil 5.12. SMAT sonrası pürüzlülük için ana etki ve ikili etkileşim grafikleri a) R_a b) R_z

5.5. Aşınma İncelemeleri

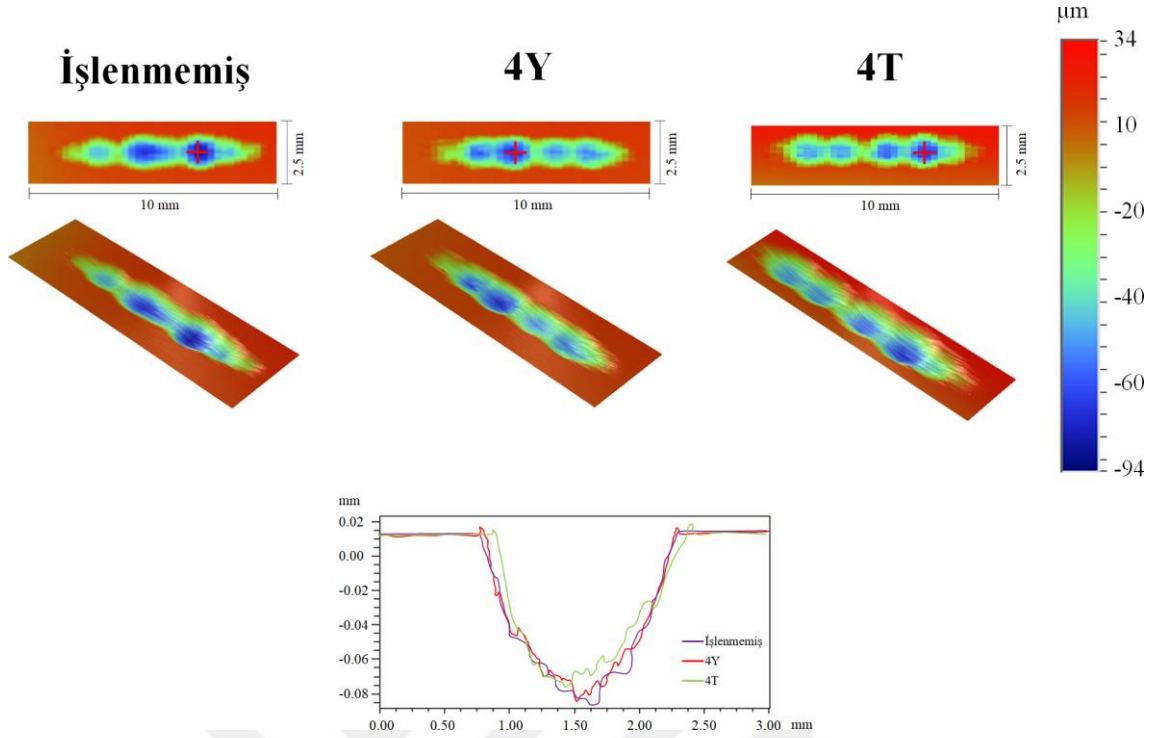
Bu kısımda SMAT uygulanan deney numuneleri için yapılan aşınma testleri detaylı olarak incelenecektir. Öncelikle belirtmek gerekir ki, mekanik yüzey işlemi uygulanan malzemelerin aşınma davranışlarına ilişkin literatürde birbirinden farklı sonuçlar mevcuttur. SMAT prosesinin malzeme yüzeyi ve yüzey altında oluşturduğu ince taneli tabakanın derinliği ve tane boyutu aşınma davranışını doğrudan etkilemektedir. Malzemelerin aşınma davranışlarını inceleyen pek çok araştırmacıya göre sertlik artışı aşınma performansını olumlu yönde etkilemektedir. Ancak mekanik yüzey işlemlerinde, işleme tabi tutulan malzeme yüzeyi pürüzlü hale gelmektedir. Bu durum da malzemenin aşınma davranışı, sertlikle beraber pürüzlülük tarafından da kontrol edilmeye başlamaktadır. İşte bu komplike durum, araştırmacıları BD prosesleri sonrası aşınma davranışları konusunda yeni araştırmalar yapmaya itmiştir. Buna rağmen, mekanik yüzey işlemleri sonrası aşınma davranışı üzerine yapılan çalışmalar yorulma, korozyon, ıslanabilirlik gibi performans kriterlerine göre daha sınırlı kalmıştır. Buradan hareketle tez kapsamında yapılan SMAT deneylerinin performansı aşınma davranışı üzerinden değerlendirilmiştir.

Literatürde yer alan SMAT sonrası aşınma davranışı çalışmaları birbirinden farklı sonuçlar içerebilmektedir. Örneğin düşük karbonlu bir çelik için yapılan çalışmada, BD'nin sürtünme ve aşınma özelliklerinin elde edilen nanokristalin tabaka sayesinde işlenmemiş numunelere göre daha iyi hale geldiği bildirilmiştir (Wang ve diğ., 2003). AA2024 için yapılan bir SMAT işleminde ise aşınma direncinin tane inceltme, sertlik gibi mekanizmalar sayesinde arttığı kaydedilmiştir (Wen ve diğ., 2015). Başka bir araştırmada ise ticari saf titanyumun SMAT prosesinde, sürtünme katsayısı ve aşınma oranının %60 seviyelerine kadar azaltılabileceği belirtilmiştir (Chamgordani ve diğ., 2018). Benzer şekilde AZ91D magnezyum alaşımı içinde SMAT proseslerinin aşınma performansını olumlu etkileyebileceği aktarılmıştır (Sun ve diğ., 2008). Öte yandan AA6063 için yapılan bir çalışmada farklı mekanik yüzey işlemlerinin aşınma performanslarını farklı etkilediği ve bu farklılığın sebebinin pürüzlülük olduğu kaydedilmiştir (Palacios ve diğ., 2014). Benzer şekilde, AA7075 için yapılan bir çalışmada pürüzlülüğün aşınma performansını olumsuz anlamda etkilediği belirtilmiştir (Efe ve diğ., 2020). Aynı araştırmacılar, 7075'in aşırı BD uygulamasında yüzey

pürüzlülüğünün önemli derecede arttığını ve aşınma dayanımının ciddi anlamda azaldığını kaydetmişlerdir. Aşırı BD uygulaması ile beraber uyguladıkları ultrasonik nanokristal yüzey modifikasyonu sonrasında yüzey pürüzlülüğünün azalmasıyla beraber, aşınma dayanımının arttığını bildirmişlerdir (Efe ve diğ., 2020). Diğer taraftan AA7075 için yapılan başka bir çalışmada pürüzlülük ile sürtünme katsayısının arttığı, ancak aşınma oranının azaldığı iddia edilmiştir (Abeens ve diğ., 2019). Son olarak yine AA7075 alaşımının yüksek pürüzlülüğe rağmen aşınma dayanımının arttığı, üstelik pürüzlü yüzeylerin aşınma dayanımının pürüzsüz yüzeye oranla daha yüksek olabileceği iddia edilmiştir (Zhang ve diğ., 2019).

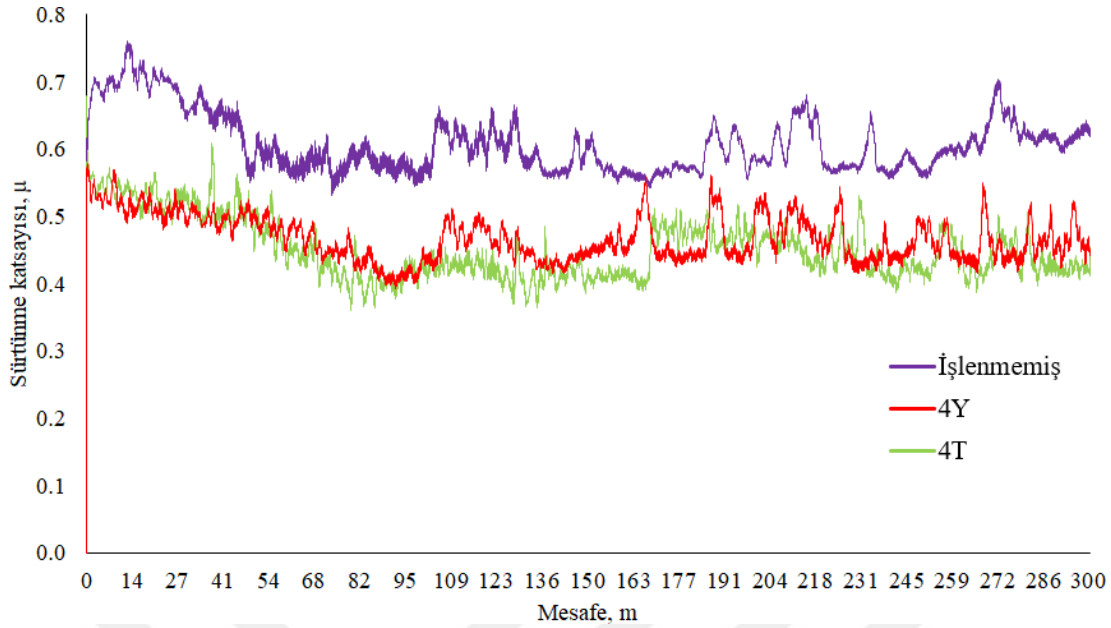
Görüldüğü üzere SMAT vb. işlemler sonrası yapılan aşınma performansı çalışmaları birbirinden farklı sonuçlar içermektedir. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar, AA7075-T6'nın düşük hızlarda gerçekleşen SMAT sonrası aşınma performansının nasıl etkilendiğini araştırmaktadır.

Şekil 5.13'te işlem görmemiş AA7075-T6, 4Y ve 4T numuneleri için aşınma testleri sonrası elde edilen üç boyutlu yüzey topografisi verilmiştir. Aşınma derinliğini ve genişliğini daha iyi anlayabilmek için, derinlik ölçeği her üç görsel için de aynı tutulmuştur. Şekil 5.13'te aynı zamanda aşınma sonrası ortaya çıkan en derin bölgenin kesit profil grafiği de verilmiştir. Aşınma izi topografilerine göre en derin nokta kırmızı artı işareti ile belirlenmiş ve bu noktada ölçülen derinlik profili grafikte verilmiştir. Buna göre, işlenmemiş numunedeki koyu mavi bölgelerin alanı ve renk derinliği SMAT uygulanan numunelere göre daha fazladır. Yani işlenmemiş numunelerin SMAT numunelerine göre daha fazla aşındığı ortadadır. Öte yandan 4Y ve 4T numunelerin birbirine benzer şekilde aşınma izleri oluşturduğu görülmektedir. Ancak izler daha dikkatli incelendiğinde 4Y numunesinin 4T'ye göre daha fazla aşındığı görülebilmektedir. Aynı şekilde verilen aşınma izindeki en derin yerin kesit profili incelendiğinde gerçekten de 4T numunesinin aşınma izinin en derin yerindeki kesiti diğer iki numuneye göre daha düşüktür. Bu bulgu da 4T numunesinin 4Y'ye göre daha az aşındığı iddiasını güçlendirmektedir. Ancak aşınma performanslarını sadece aşınma izlerinin üç boyutlu topografisi üzerinden değerlendirmek tek başına yeterli değildir.



Şekil 5.13. Aşınma testleri sonrası aşınma izinin üç boyutlu topografisi ve en derin profil kesiti

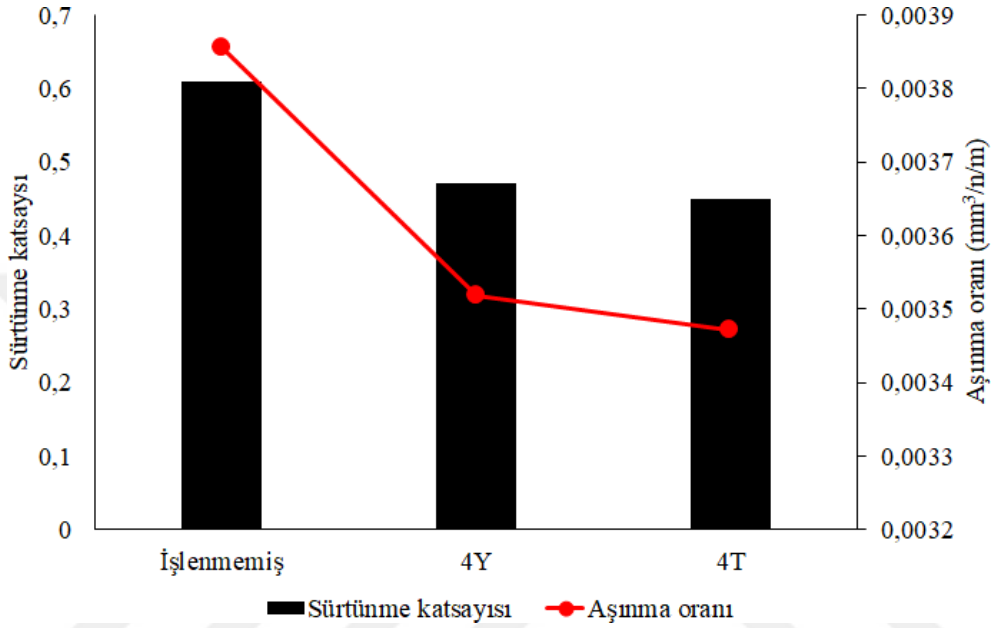
Şekil 5.14’te aşınma testleri sırasında ölçülen mesafeye bağlı sürtünme katsayısı grafiği verilmiştir. Bu grafik 300 metre mesafe aşınma sonrası elde edilmiştir. Buna göre, tüm numunelerde Hertz temasından dolayı (Asl ve diğ., 2021) başlangıçta ani bir artış görülürken, ardından belirgin bir düşüş trendi oluşmaya başlamıştır. Her üç numune için de Hertz temasının sürtünme teması ile beraber etkin olduğunu görülmektedir. Ancak işlenmemiş numune için sürtünme katsayısı 0,7 mertebelerinden itibaren düşmeye başlarken, SMAT numuneleri için 0,55 mertebesinde düşmeye başlamıştır. Daha sonra ise işlenmemiş numune, mesafeye bağlı olarak dalgalı bir seyir izlemiştir. Öte yandan 4T ve 4Y numuneleri birbirlerine oldukça yakın olarak seyretmiştir. Ancak grafik daha detaylı incelendiğinde 4Y’nin daha dalgalı bir sürtünme grafiği oluşturduğu görülebilmektedir. SMAT sonrası hedef malzeme yüzeyinde ve altyüzeyinde elde edilen nanokristalin tabakanın aşınma dayanımını artırdığı söylenebilmektedir. İşlem görmemiş numunede elde edilen başlangıçta ölçülen sürtünme katsayısı değeri SMAT sonrası yaklaşık olarak %22 mertebesinde azalmıştır. Aşınma devam ettikçe yaklaşık olarak 100 metreden itibaren sürtünme katsayısının azalma eğilimi sona ermiştir.



Şekil 5.14. Aşınma testleri sonrası mesafeye bağlı sürtünme katsayıları grafiği

Şekil 5.15'te ise, test numuneleri için Şekil 5.13 ve 5.14'e göre hesaplanan ortalama sürtünme katsayı ve aşınma oranı değişim grafiği verilmiştir. Buna göre işlem görmemiş numune için ortalama sürtünme katsayısı 0,61 olarak bulunurken, 4Y ve 4T için sırasıyla 0,48 ve 0,45 olarak bulunmuştur. Bu iki değer birbirine oldukça yakındır ancak aradaki farkın sebebinin kristalit boyutu ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde aşınma oranlarında da işlenmemiş numuneye göre bir azalma söz konusudur. Bu sonuçlar SMAT prosesinin malzemenin aşınma dayanımını olumlu etkilediğini ortaya koymaktadır. İlk olarak 4Y ve 4T numunesinin yüzeyde hesaplanan kristalit boyutlarının işlenmemiş numuneye oranla neredeyse yarı yarıya daha düşük olduğu hatırlanmalıdır. Bu durum aşınma başlar başlamaz kendini göstermiştir. Öte yandan 4Y numunesi 4T'ye göre az da olsa daha düşük kristalit boyutuna ve daha yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip olmasına rağmen ortalama pürüzlülüğü daha yüksektir. 4Y'nin yüzey pürüzlülüğü 0,21 mikron iken, 4T'nin yüzey pürüzlülüğü 0,185 μm idi. Bu değerler aslında ihmal edilebilecek kadar düşük seviyededir. Ancak yine de 4Y için elde edilen sürtünme katsayısı grafiğindeki dalgalı durumun bu pürüzlülük farkından kaynaklandığı düşünülmektedir. Hesaplanan ortalama sürtünme katsayısı değerleride bu sonucu desteklemektedir. 4Y numunesinde ortalama bilya hızlarının 4T'ye göre daha yüksek olduğu bulunmuş idi. Bu durum 4Y'nin daha mukavim olmasını sağlarken, beraberinde de daha pürüzlü bir yüzey ortaya çıkmasına sebebiyet vermiştir.

Genelleyecek olursak, kristalit boyutunun azalması sürtünme katsayısını doğrudan düşürmektedir. Ancak kristalit boyutu sürtünme katsayısının belirlenmesinde tek başına yeterli değildir. Pürüzlülüğünde aşınma performansı üzerinde önemli etkisi vardır. Böylesine mikron mertebesinde pürüzsüz olduğu düşünülen yüzeylerde bile bu fark kendini göstermektedir.

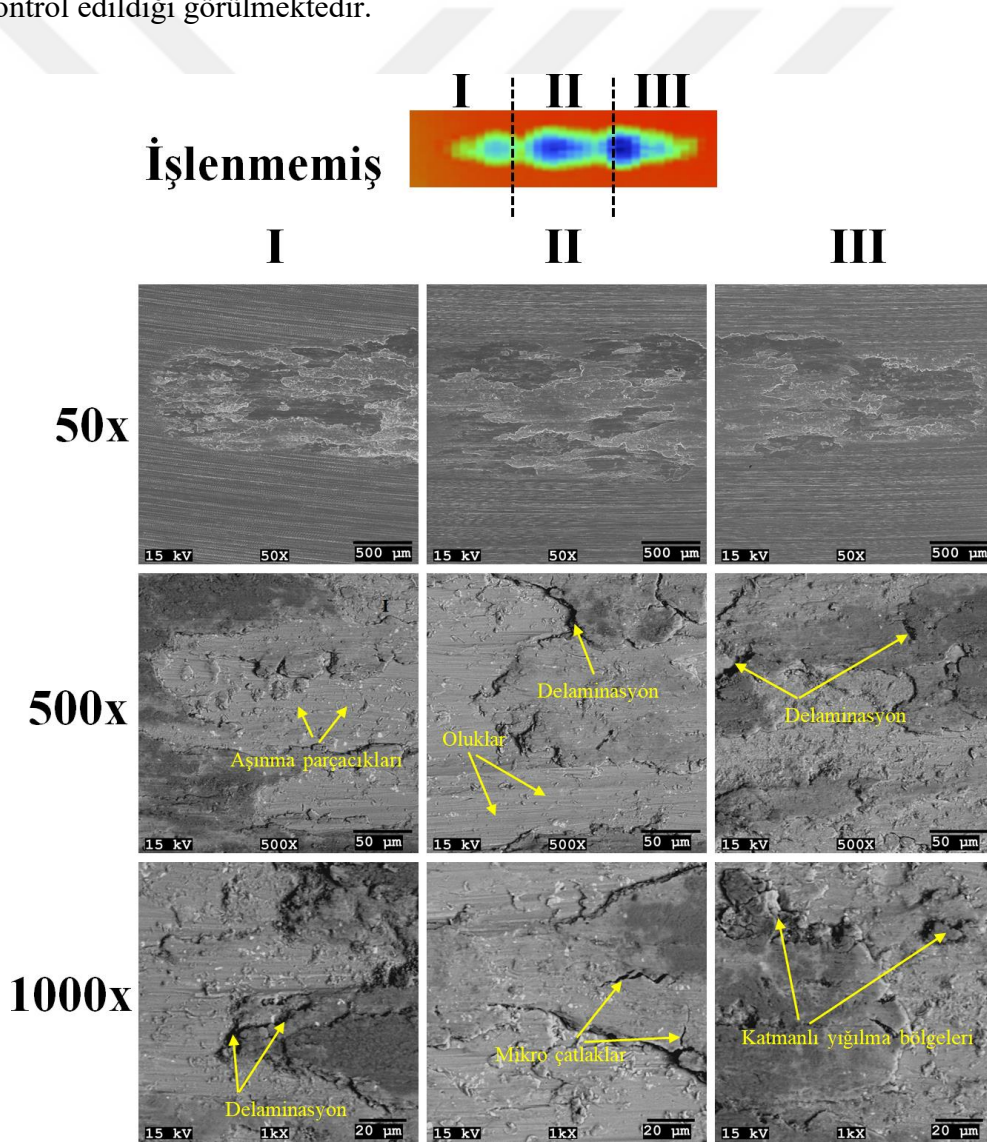


Şekil 5.15. Aşınma testleri sonrası ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranı

Bu aşamaya kadar aşınma test performansları üç boyutlu yüzey topografisi ve sürtünme katsayısı üzerinden değerlendirilmiştir. Aşınma incelemelerinin en önemli değerlendirme ölçütlerinden bir tanesi de yüzey morfolojisi için mikroskopik ölçekte inceleme yapmaktır. Aşınma tipinin ve işleyiş mekanizmasının tartışılması önem arz etmektedir. Bunun için Şekil 5.16, 5.17 ve 5.18’de sırasıyla işlenmemiş, 4Y ve 4T numuneleri için elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir. Her bir görüntü seti aşınma izinin 3 farklı bölgesinden alınmış ve farklı büyütme oranlarında verilmiştir.

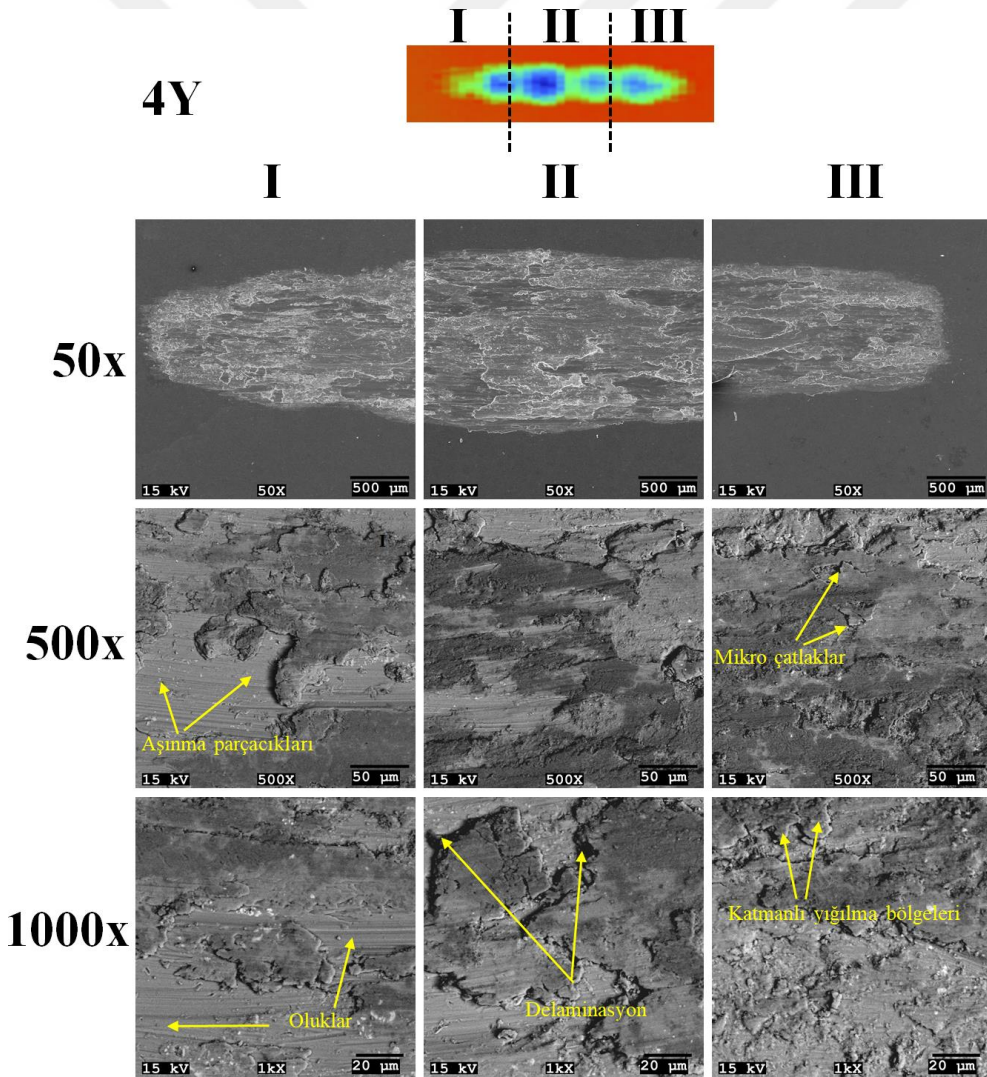
Şekil 5.16’de verilen SEM görüntü seti incelendiğinde aşınma izinin yüzeyinde, şiddetli aşınmaya neden olabilen delaminasyon ve plastik deformasyon bölgelerinin yoğunluğu görülmektedir. Kayma hareketinin başlamasıyla yüzeyden soğuk kaynaklanma ile ayrılmaya başlayan parçalar çoklu yığılma bölgelerinin oluşmasına sebep olmuştur. Daha sonra salınımlı kayma hareketiyle beraber belirli bölgelerde katmanlar oluşturacak şekilde adhesif aşınma yüzeylerinin oluşmasını sağlamıştır (Baydoğan ve diğ., 2004, Haq

ve Anand, 2019). Bu yüzey katmanları içindeki çok küçük parçaların plastik deformasyonu olarak tanımlanabilir. Aşınan parçalar ayrılarak her yüzeyde bulunan pürüzlü bölgeler, mikroskobik ölçekte yüksek noktalar veya yüzey pürüzlülüğünün olduğu noktalarda yığılmaya başlar. Öte yandan mikro çatlaklar ve aşınma yüzeyinde pul pul görünen aşınma parçacıkları da vardır. Mikro çatlaklar aşınan yüzeyden malzeme kesme prosesi şeklinde ayrılır ve yüzeyde yerel kırılmalar oluşturur. Bu bölgelerden çekirdeklenen çukurcuklar mikro çatlaklar oluşturarak ilerler ve malzeme parçalanarak yüzeyden ayrılır. Bu tip aşınma mekanizması da abrasif aşınma olarak tanımlanmaktadır. Benzer şekilde aşınma parçacıklarının varlığı da abrasif aşınma mekanizmasının aktif olduğunu kanıtlamaktadır. Ancak aşınma mekanizmasının yüksek oranda adhesif aşınma ile kontrol edildiği görülmektedir.



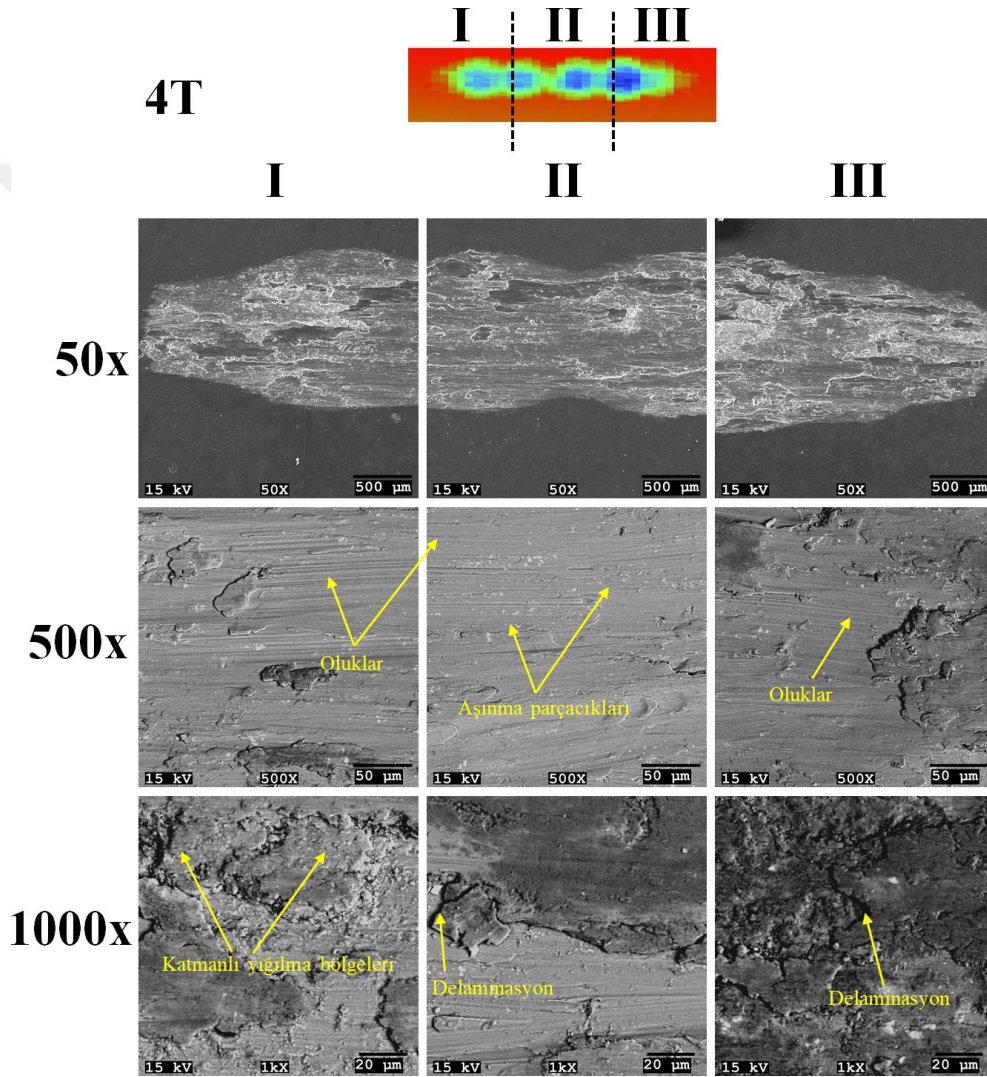
Şekil 5.16. Aşınma testleri sonrası işlenmemiş numune için SEM görüntüleri

Şekil 5.17’de ise 4Y numunesi için elde edilen SEM görüntü seti verilmiştir. Burada da benzer şekilde delaminasyon ve plastik deformasyon bölgelerinin varlığı göze çarpmaktadır. Kayma hareketi ile başlayan plastik akış, katmanlı yığılma bölgeleri oluşturarak adhesif aşınma yüzeylerinin oluştuğunu göstermektedir. Ancak burada abrasif aşınmaya neden olan mikro çatlakların daha yoğun olduğu gözlenmektedir. İşlenmemiş numuneye göre azalan kristalit boyutu, kayma hareketi sırasında aşınma parçacıklarının oluşmasına sebep olmuştur. Ek olarak, aşınma izinin üç boyutlu topografisinde 4 farklı noktadan aşınma derinliğinin oluştuğu görülmektedir. SMAT sonrası yüzeyde bulunan tepe ve çukurların sebep olduğu dalgalı yapı, aşınma sırasında farklı noktalardan çekirdeklenmeye sebep olmuştur. Sonuç olarak 4Y için de aşınma mekanizmasının daha çok adhesif aşınma ile kontrol edildiği görülmüştür.



Şekil 5.17. Aşınma testleri sonrası 4Y için SEM görüntüleri

4T numunesi için elde edilen aşınma izleri SEM görüntü seti Şekil 5.18’de verilmiştir. Burada da diğer iki aşınma tipine benzer şekilde plastik yığılma bölgelerinin sebep olduğu delaminasyon bölgeleri görülmektedir. Plastik akışın sebep olduğu oluklar yoğun olarak göze çarpmaktadır. Aşınma parçacıklarının bu oluklar üzerinde olduğu gözlemlenebilmektedir. Genel olarak aşınma yüzeyinde hem adhesif hem de abrasif aşınma mekanizmasının aktif olduğu anlaşılmaktadır. Ancak diğer işlenmemiş numune ve 4Y’ye kıyasla daha az çoklu yığılma bölgelerinin olduğu görülmektedir.



Şekil 5.18. Aşınma testleri sonrası 4Y için SEM görüntüleri

Her üç şekil birlikte değerlendirildiğinde birbirine benzeyen aşınma mekanizmalarının olduğu gözlemlenebilmektedir. Sonuç olarak SMAT prosesi malzemenin kimyasal özelliklerini değiştirmemektedir. Bu sebeple birbirine benzeyen aşınma

mekanizmalarının oluşması beklenen bir durumdur. Literatürde bazı çalışmalar tamamen farklı işleyişlerin oluştuğunu ortaya koymaktadır (Abeens ve diğ., 2019). Ancak bir birine benzeyen aşınma işleyiş mekanizmaları olsa da her bir görüntü setinde daha baskın olan işleyişler mevcuttur.

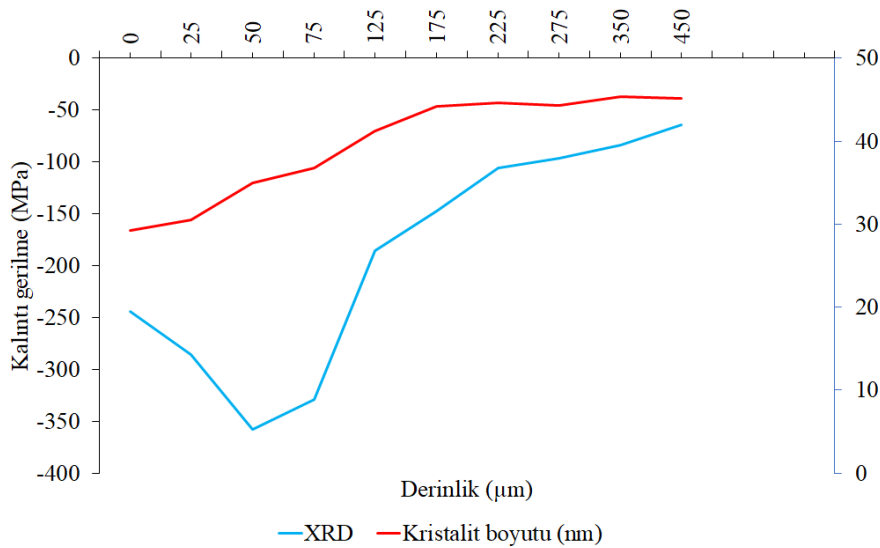
5.6. Kalıntı Gerilme İncelemeleri

Yapısal bileşenlerin çoğu, kullanımları sırasında döngüsel yüklemelere maruz kalırlar ve yüzeyden yorulma çatlaklarının başlamasıyla ve kritik uzunluğa yayılmasıyla beraber kullanılamaz hale gelirler. SMAT ve BD gibi proseslerde hedef malzeme yüzeyine tekrarlı olarak çarpan bilyalar, malzemede kalıntı gerilme oluşum mekanizmasını tetikler ve kırılma direnci ve yorulma ömrü gibi önemli performans kriterlerinde artışa sebep olduğu bilinmektedir. SMAT'ın BD'ye göre daha büyük derinliklerde kalıntı gerilmeleri indükleyebileceği literatürde yerini almıştır (Pandey ve diğ., 2017). 4. Bölümde bu bulgular tekli darbe modellemesi üzerinden detaylı olarak tartışılmış idi. Hatırlanacak olursa, büyük çaplı bilyalar, malzeme yüzeyiyle temas ettiğinde daha fazla bir alan üzerinde gerilmelere sebep olmakta ve kalıntı gerilmenin yayıldığı alanı artırmakta idi. Literatürde SMAT'ın kalıntı gerilmeye olan etkileri üzerine farklı çalışmalar mevcuttur. Örneğin bir araştırma da AA2014'nin kısa ömürlü yorulma (LCF) ömrünün SMAT işleminden sonra 4 kat artırıldığı kaydedilmiştir (Pandey ve diğ., 2015). Aynı araştırmacılar AA7075 için yine LCF ömrünün SMAT'ın farklı sürelerde uygulanmasından sonra LCF ömrünün artabileceğini, ancak daha uzun proses zamanlarında olumsuz etkilenebileceğini kaydetmişlerdir. LCF ömür artışını doğrudan malzemede indüklenen kalıntı basma gerilmeleri ve yüzey hataları ile ilişkilendirmişlerdir. En yüksek kalıntı gerilmeyi yüzeyde -264 MPa, ve 10 µm derinlikte -410 MPa olarak ölçmüşlerdir. Ancak bu numune için LCF ömründe azalma olduğunu belirtmişlerdir. Öte yandan en yüksek LCF ömrüne sahip numune de en yüksek kalıntı gerilme değerini -315 MPa olarak ölçmüşlerdir (Pandey ve diğ., 2017). Başka bir çalışmada ise 7075 alaşımı için yapılan SMAT'ın farklı kombinasyonlarında kalıntı gerilmelerin 20 µm derinlikte -250 ile -500 MPa arasında ölçüldüğü bildirilmiştir (Maurel ve diğ., 2020). AA7075 için SMAT uygulanan bir başka çalışmada ise kalıntı gerilmelerin 50 µm derinlikte ve -320 MPa seviyelerinde olduğu aktarılmıştır. Ek olarak kalıntı gerilmeler sayesinde HCF ömrünün artabileceğini, ancak şiddetli yüzey

pürüzlülüğünün yorulma ömürleri üzerinde olumsuz etkilerinin olduğunu kaydetmişlerdir (Gao ve diğ., 2020). AA7075 alaşımı için yapılan kalıntı gerilme çalışmaları sadece SMAT ile sınırlı değildir. Örneğin, bir BD uygulamasında (Abeens ve diğ., 2019), 50 μm derinlikte -180 MPa kalıntı gerilme ölçüldüğü kaydedilerken, bir diğ. 20 μm derinlikte -350 MPa kalıntı gerilme olduğu not edilmiştir (Martín ve diğ., 2020). Bu proseslere ek olarak aşırı BD uygulanan AA7075 için 50 μm derinlikte -120 MPa kalıntı gerilme değerine ulaşıldığı aktarılmıştır (Efe ve diğ., 2020).

AA7075 için yapılan literatür araştırması mekanik yüzey işlemleri sonrası kalıntı gerilme ölçümlerinin -120 MPa ile -500 MPa arasında değiştiği sonucuna ulaşılmıştır. Öte yandan, çoğu araştırmacı yüksek kalıntı gerilme olsa bile, yüksek yüzey pürüzlülüğünün çatlak başlangıcını hızlandırabileceğini ve böylelikle yorulma ömrünün azalabileceğini bildirmişlerdir.

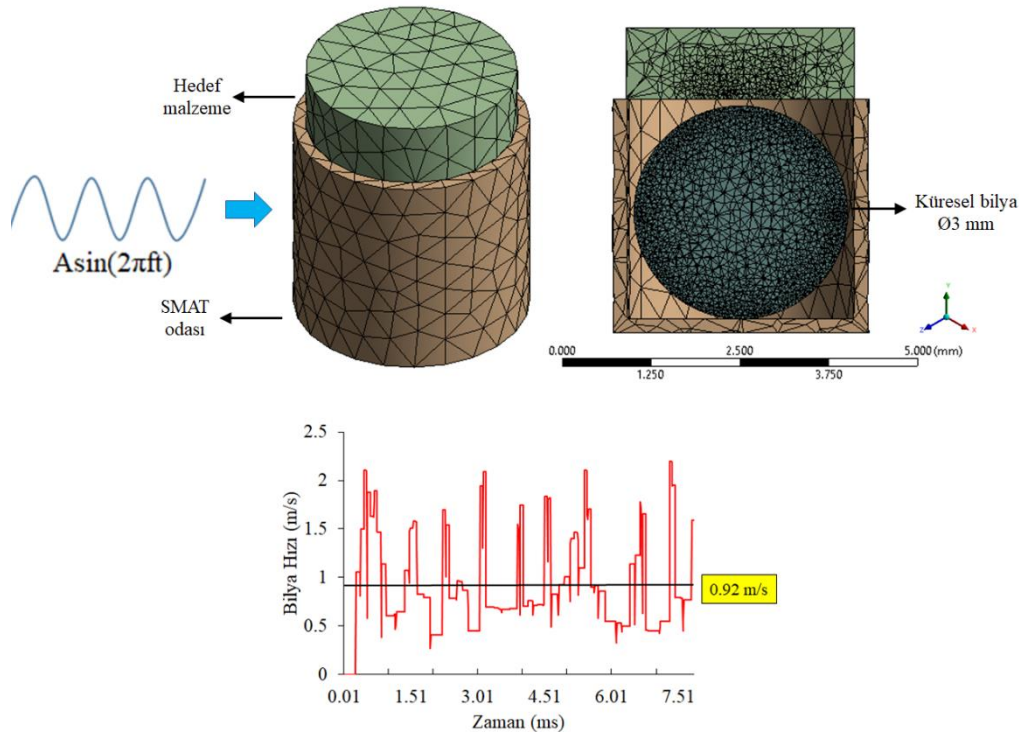
Şekil 5.19’da tez kapsamında en küçük kristalit boyutu elde edilen 3Y numunesi için derinliğe bağlı kalıntı gerilme grafiği verilmiştir. Grafik aynı zamanda derinliğe bağlı kristalit boyutunu da vermektedir. Kristalit boyutu yüzeyden itibaren beklendiği gibi azalma eğilimindedir. Öte yandan yüzeyde yaklaşık -245 MPa kalıntı gerilme ölçülürken, 50 μm derinlikte bu değer -360 MPa seviyesine ulaşmıştır. Bu sonuç oldukça çarpıcıdır. Hatırlanacak olursa, 3Y için yüzey pürüzlülüğü 0.24 μm idi. Böylesine pürüzsüz sayılabilecek bir yüzeyde, literatürle rekabetçi derinlikte ve büyüklükte kalıntı gerilme ölçülmesinin önemli olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.19. 3Y için derinliğe bağlı kalıntı gerilme ve kristalit boyutu

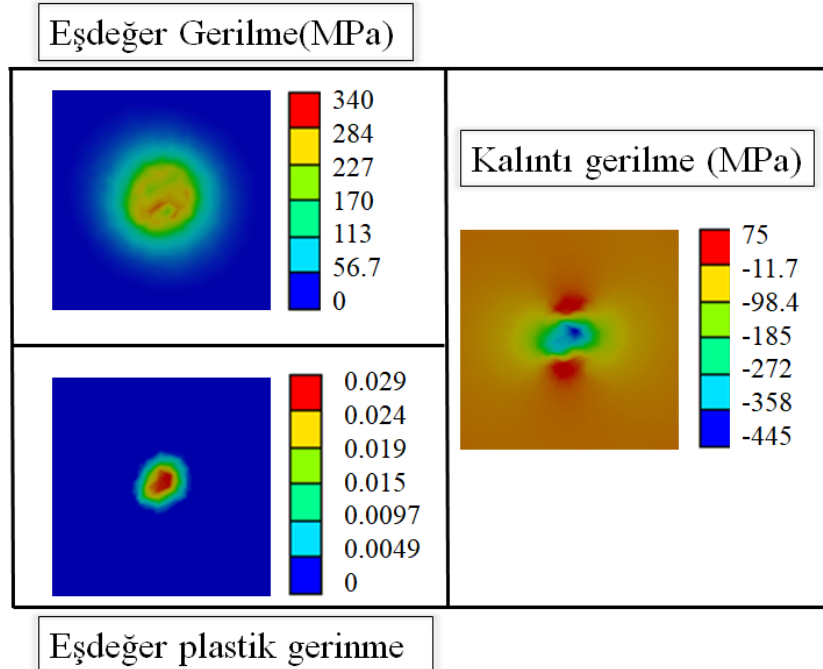
5.7. SMAT için Çoklu Darbe Modeli ve Genel Değerlendirme

Şekil 5.20’de çoklu darbe için geliştirilen modelin şematik gösterimi ve ağ yapısı verilmiştir. Üç boyutlu çoklu darbe modeli 3Y kodlu deney koşullarını tahmin etmek üzere geliştirilmiştir. Geliştirilen model küresel bilya, SMAT odası ve hedef malzemeden oluşmaktadır. Hedef malzemenin bilya ile temas alanı için daha ince ağ yapısı seçilmiştir. Burada seçilen ağ yapısı özellikleri 4. Bölümde geliştirilen tekli darbe modeli baz alınarak oluşturulmuştur. Modele göre 3 mm çapında bir bilya, titreşim odasının sinüs dalgası formunda titreşim hareketi ile uyarılması ile hedef malzeme yüzeyine zamana bağlı olarak rastgele çarpmaktadır. Buna dayanarak, SMAT için geliştirilen çoklu darbe simülasyonları ANSYS/Explicit Dynamics kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen modelin daha önce geliştirilen çoklu darbe modellerinden farkı bilya hızının titreşim karakteristiğine göre rastgele oluşmasıdır. Yani gerçek zamanlı bilya hareketine en yakın bilya hızı tahminini içermektedir. Geliştirilen modele göre bilya hızı yaklaşık 0,92 m/s olarak tahmin edilmiş ve Şekil 5.20’de gösterilmiştir. Bu hız değeri 3. Bölümde verilen bilya dinamiği analizi sonuçları ile de uyum içerisindedir. Hatırlanacak olursa 3Y için ortalama bilya hızı 0,9 m/s olarak tahmin edilmiş idi.



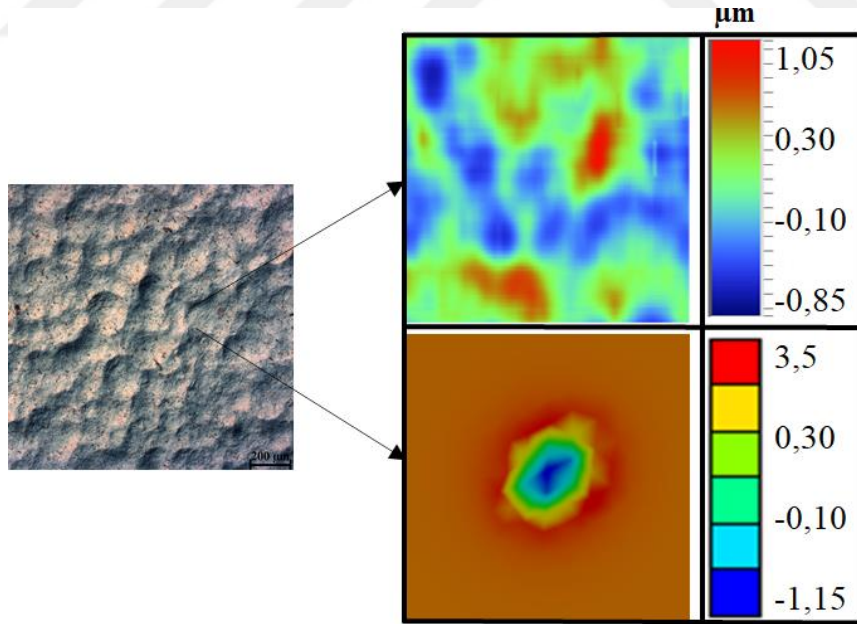
Şekil 5.20. Çoklu darbe üç boyutlu sonlu eleman modeli ve bilya hızı grafiği

Şekil 5.21’de çoklu darbe simülasyonları sonrası hedef malzeme yüzeyinde meydana gelen eş değer gerilme, eşdeğer plastik gerinme ve kalıntı gerilme dağılımları verilmiştir. Bu görseller toplam da 25 farklı bilya darbesi sonrasında elde edilmiştir. AA7075-T6 için yapılan çoklu darbe simülasyonları için yaklaşık 25 adet bilya darbesinden sonra gerilim ve gerinim değerlerinde önemli bir değişim olmadığı kaydedilmiştir. Başka bir deyişle hedef malzemede ulaşabilecek en yüksek akma dayanımına ulaşılmıştır. Bundan sonraki bilya darbelerinin mekanik kazanımlardan ziyade aşırı plastik deformasyona, yüzey çatlaklarına ve kusurlarına sebep olması beklenmektedir. Bu sebeple çoklu darbe simülasyonu 25. bilya darbesinden sonra sonlandırılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirmeye alınmıştır. Şekil 5.21’e göre 25 darbe sonunda maksimum eşdeğer gerilme değerinin 340 MPa değerlerine kadar çıktığı, öte yandan maksimum kalıntı gerilmenin ise -445 MPa değerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerler 4. Bölümde kaydedilen tekli darbe simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında eş değer plastik gerilmenin 0,017’den 0,029 mertebesine, eş değer gerilmenin ise 241,1 MPa’dan 340 MPa değerine kadar ulaştığı görülmüştür. Benzer şekilde maksimum kalıntı gerilmenin tekli darbe simülasyonlarında elde edilen -250,6 MPa değerinden -445 MPa seviyesine kadar arttığı kaydedilmiştir.



Şekil 5.21. Çoklu darbe sonrası eşdeğer gerilme, eşdeğer gerinim ve kalıntı gerilme dağılımları

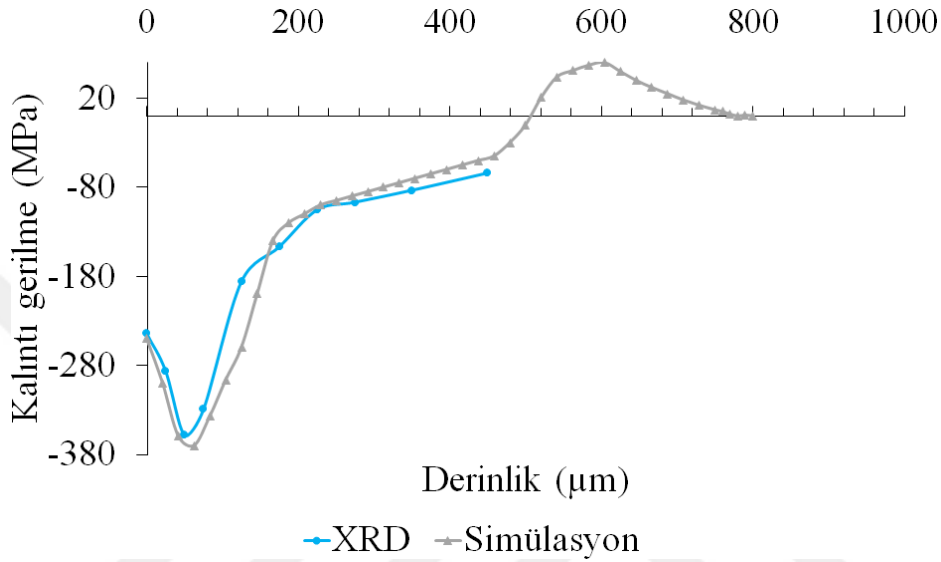
Şekil 5.22’de 3Y için deneysel koşullarla elde edilen yüzey topografisi ve çoklu darbe simülasyonu sonrası malzeme yüzeyinde oluşan deformasyon dağılımı verilmiştir. Buna göre, her iki görüntü karşılaştırıldığında en derin yüzey çukurunun deneysel olarak $-0,85 \mu\text{m}$ ölçüldüğü, simülasyonlarda ise $-1,15 \mu\text{m}$ olarak bulunduğu görülmüştür. Ortaya çıkan darbe izleri görsel olarak karşılaştırıldığında ise deneysel sonuçların simülasyon görselleriyle uyum içerisinde olduğu sonucuna varılabilmektedir. Çoklu darbe simülasyonları deneysel şartlara göre çok daha küçük bir temas alanını temsil ettiğinden yüzeyde meydana gelen tepe noktalarının yüksekliği arasında $1,05 \mu\text{m}$ ’dan, $3,5 \mu\text{m}$ ’a kadar bir farklılık olduğu göze çarpmaktadır. Bu aslında beklenen bir sonuçtur. Çoklu darbe modelinde tek bir bilya aynı noktaya toplamda 25 kere çarpmış ve bu görüntü elde edilmiştir. Yani aynı noktaya yapılan tekrarlı atışlar darbe izinin etrafında malzeme yığılmasına neden olmuştur. Deneysel olarak elde edilen optik profilometre görüntüsünde ise bilyalar tarafından malzeme yüzeyinin tamamı tekrarlı darbelere maruz kalmakta ve yüzey tepe ve çukurları devamlı olarak değişim göstermektedir. Çoklu darbe için önerilen modelin deformasyon özellikleri bakımından en derin çukur bölgesini tahmin edebilmesinin önemli olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.22. 3Y için çoklu darbe sonrası deformasyon dağılımı

Şekil 5.23’te ise deneysel ve simülasyon sonrası elde edilen kalıntı gerilme grafikleri verilmiştir. Tez kapsamında önerilen çoklu darbe modelinin esas amacı da aslında derinliğe bağlı kalıntı gerilme profilinin tahmin edilmesidir. Buna göre XRD ölçümü ve

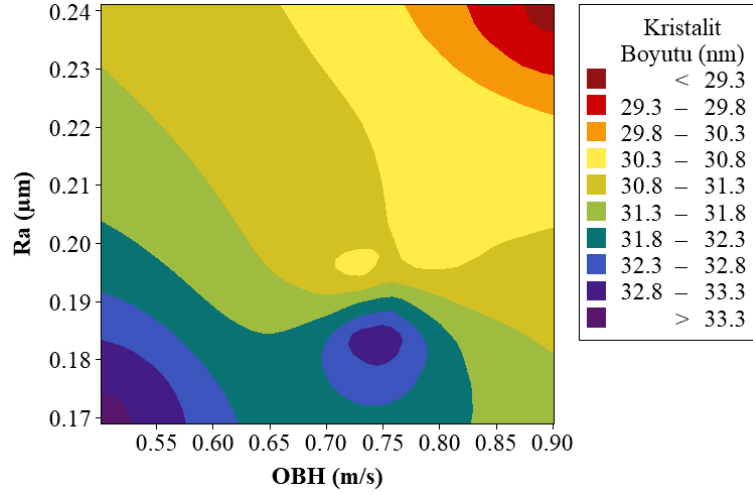
simülasyon sonrası elde edilen derinliğe bağlı kalıntı gerilme profillerinin uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Deneysel olarak elde edilen ölçümlere göre maksimum kalıntı gerilme 50 μm derinlikte ve -360 MPa idi. Çoklu darbe simülasyonları sonrası ise maksimum kalıntı gerilmenin darbe yüzeyinden itibaren 62 μm derinlikte ve -370 MPa olarak bulunduğu görülmektedir.



Şekil 5.23. 3Y için XRD ve simülasyon sonrası kalıntı gerilme dağılımı

Bu bölümde SMAT için tasarlanan titreşim platformunun 3 saate varan deney sürelerinde sorunsuz bir şekilde çalıştığı görülmüştür. SEM ve OM incelemeleri yüzey altı bölge de tane diziliminde işlenmemiş numuneye göre değişim olduğunu göstermiştir. XRD analizleri sonrası işlenmemiş numune için kristalit boyutu 50 nm mertebesinde 30 nm mertebesine kadar azalmıştır. AA7075-T6 için yapılan SMAT uygulaması nanokristal ölçekte tabaka elde edilebileceğine göstermiştir.

İşlenmemiş numune için yüzeydeki ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 0,14 μm olarak ölçülürken, bu değer SMAT sonrası en fazla 0,24 μm 'a çıkmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri 3. Bölümde bilya hızı için yapılan dinamik analizlerle uyum içerisinde. Bilya hızı artışı yüzey pürüzlülüğünü artırmıştır. Öte yandan en küçük kristalit boyutu da yine en pürüzlü yüzeyde elde edilebilmiştir. Şekil 5.24'te OBH ve yüzey pürüzlülüğüne göre yüzeyde ölçülen kristalit boyutunun dağılım grafiği verilmiştir. Bu görsel de bilya hızı artışının kristalit boyutunu küçülttüğünü kanıtlar niteliktedir.



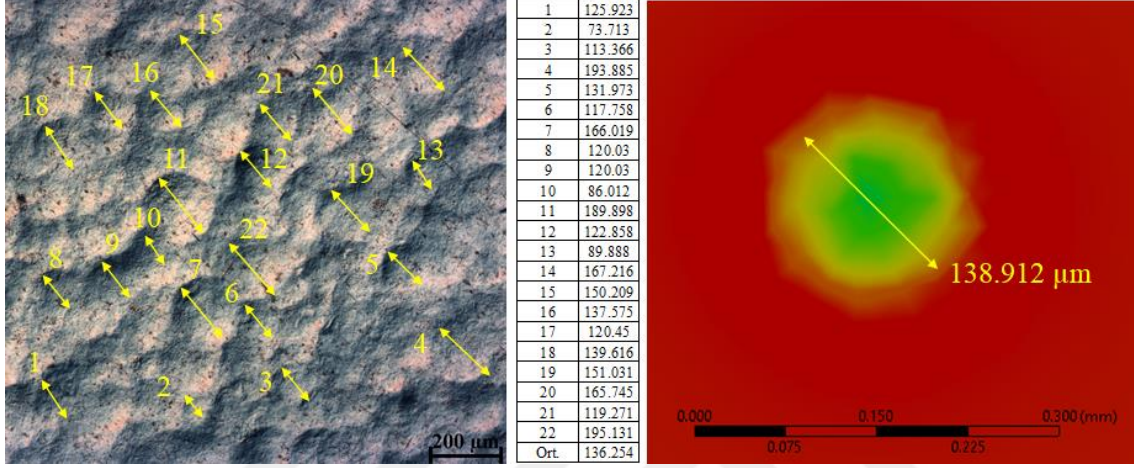
Şekil 5.24. 3Y numunesi kalıntı gerilme

SMAT sonrası yapılan aşınma deneyleri ortalama sürtünme katsayısının işlem görmemiş numuneye göre yaklaşık olarak %26 oranında azalabileceğini göstermiştir. Bu bulgu aşınma oranı ve SEM incelemeleri ile de desteklenmektedir. Ayrıca SEM görüntüleri aşınma testleri sonrası SMAT numunelerinin adhesif aşınmayla beraber abrasif aşınma mekanizmalarıyla kontrol edildiğini, işlenmemiş numune için ise adhesif aşınma mekanizmasının daha yoğun olduğunu göstermiştir. SMAT sonrası nanokristal tabaka aşınma dayanımını artırmış ve abrasif aşınma mekanizmalarını da aktifleştirmiştir. SMAT sonrası numunelerde yüzey pürüzlülüğü önemli bir artışa uğramadığından bu çalışma kapsamında aşınma mekanizmasının daha çok tane yapısı tarafından kontrol edildiği düşünülmektedir. Ancak yine de çok az da olsa 4Y ve 4T arasındaki pürüzlülük farkı aşınma performansını etkilemiştir.

SMAT uygulanan numunelerde en yüksek kalıntı gerilme değeri 50 µm derinlikte ve -360 MPa olarak ölçülmüştür. SMAT öncesi numune de kalıntı gerilme olmadığı düşünüldüğünde, bu artışın çok önemli olduğu düşünülmektedir. Üstelik bu değer 0,24 mikron gibi düşük bir yüzey pürüzlülüğü değerinde elde edilebilmiştir.

Şekil 5.25'te 3Y için SMAT sonrası oluşan yüzey morfolojisi ve tek atış simülasyonlarında elde edilen Ø3 mm ve 1 m/s koşullarında elde edilen iz çapı görseli sunulmuştur. Buna göre 3Y için toplamda 22 adet farklı çukur geometrisinin çapı ölçülmüş ve ortalaması 136,254 µm olarak bulunmuştur. Simülasyonlarda ise bu değer yaklaşık olarak 138,912 µm olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlara göre 4. Bölümde verilen

tek atış sonrası plastik deformasyon davranışının deneysel sonuçları %1,95'lik bir hata payı ile tahmin edebileceği görülmüştür. Ayrıca 4. Bölüm de iz çapı için modelleme sonrası geliştirilen iz çapı denklemi kullanılarak da bu değer daha da yakın olarak hesaplanabilir. 3. Bölümde 3Y koşulu için OBH 0,9 m/s bulunmuş idi. Denklemden gerekli işlemlerden sonra iz çapı 0.134 μm bulunmaktadır. Bu değer deneysel olarak ölçülen iz çapı değerini %1,65 hata payı ile tahmin edebilmektedir.



Şekil 5.25. Tek atış modeli için elde edilen iz çapının deney verileri ile karşılaştırılması

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında öncelikle SMAT için tasarlanan titreşim tablasının sağlıklı ve verimli olarak çalışabilmesi için modal analiz sonrası rezonans genlikleri analitik, nümerik ve deneysel olarak tespit edilmiştir. Buradan edinilen bilgiler ışığında titreşim motorlarının maksimum çalışma frekansı olan 50 Hz için maksimum yük altında titreşim genlikleri frekans cevap analizi ile yine analitik, nümerik ve deneysel olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak titreşim tablasının 50 Hz’de titreşim genliği 1 mm olarak bulunmuştur. Bu değerin bilinmesi kapalı bir odada birbirine rastgele ve sayısız kere çarpan bilya hızlarının belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Çünkü titreşim parametreleri bilya hızını doğrudan etkilemektedir. Daha sonra ise, bilya hızı tespiti için geliştirilen dinamik sonlu elemanlar modelinde SMAT prosesi analiz edilmiş ve bilya hızları tespit edilmiştir. Bilya hızlarının mekanik yüzey işlemleri için bilinmesi oldukça önemlidir. Buna göre yapılması planlanan deneyler öncesi oluşabilecek ortalama bilya hızlarının 0,5 m/s ve 1 m/s arasında değiştiği görülmüştür. Ancak böylesine düşük hızların malzeme yüzeyinde kalıcı plastik şekil değişimine uğrayıp uğramayacağını bilmesi oldukça önemli hale gelmiştir. Zira, SMAT prosesi 1 m/s üzerinde tanımlanan bir işlemdir. Buradan hareketle 0,5 m/s, 0,75 m/s ve 1 m/s hızları ve SMAT için sıklıkla kullanılan bilya çapları olan 3, 4 ve 5 mm için plastik deformasyon mekanizması simüle edilmiştir. Sonuçlar plastik deformasyonun kalıcı olduğunu göstermiştir. Bilya hızının bilya çapına oranla maksimum kalıntı gerilme üzerinde daha etkili olduğu, öte yandan daha fazla yüzey deformasyonuna sebep olacağı bulunmuştur. Öte yandan, bilya çapının ise, kalıntı gerilme derinliği üzerinde bilya hızına oranla daha fazla etkisi olduğu bilgisine ulaşılmıştır.

Deneysel çalışma bölümünde tasarlanan titreşim platformu test edilmiş ve SMAT uygulamasının başarıyla gerçekleştiği görülmüştür. AA7075-T6 için yapılan deney tasarımı, 3. ve 4. Bölümde edinilen bilgiler ışığında planlanmıştır. Yani bilya hızını kontrol eden bilya miktarı ve bilya çapı parametreleri deneysel aşamada uygulanmıştır. Titreşim parametreleri deneysel aşamada sabit tutulmuştur. Sonuç olarak 3, 4 ve 5 mm çapında bilyalar tam dolu ve yarı dolu olmak üzere 6 farklı deney yapılmıştır. Deney sonuçları mikroyapı incelemeleri, yüzey pürüzlülüğü, XRD analizi, aşınma testi ve kalıntı gerilmeler üzerinden değerlendirilmiştir.

3. Bölümde bulunan ortalama bilya hızlarının, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Yani yüksek bilya hızının pürüzlülüğü artırdığı kaydedilmiştir. SMAT odasında tam dolu durumdaki ortalama bilya hızı, yarı dolu duruma oranla daha düşük bulunmuştur. Bu durum yarı dolu durumda daha yüksek bilya hızlarının oluşacağını göstermiştir. Sonuçlar 3Y koşulunda ortalama bilya hızının ve pürüzlülüğün en yüksek seviyede olacağını göstermiştir. Öte yandan 4. Bölümde yapılan deformasyon davranışı modeli, mikroskobik ölçekte deneysel verilerle iz çapı üzerinden karşılaştırılmış ve simülasyon sonuçları deneysel verilerle desteklenmiştir.

Deneyler sonrası, SMAT uygulamasının en önemli özelliklerinden birisi olan nanokristal tabaka XRD analizi ile araştırılmıştır. Sonuçlar kristalit boyutunun %42 oranında azalabileceğini göstermiştir. Bu aşamaya kadar elde edilen bilgiler, SMAT aşamasının dinamik olarak kontrol edilebildiğini ve nanokristal tabakanın varlığını kanıtlamıştır. Ancak mühendislikte performans ve uygulama aşaması çok önemlidir. Bu tez çalışmasının en önemli bulgularından bir tanesi, uygulama sonrası muadil proseslere göre pürüzsüz sayılabilecek bir yüzey ortaya çıkmasıdır. İşlenmemiş numune için yüzeydeki ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri optik profilometre ile 0,14 μm olarak ölçülürken, bu değer SMAT sonrası en fazla 0,24 μm 'a çıkmıştır. Bu değerler literatürde bulunan pürüzlülük sonuçları ile mukayese edildiğinde geliştirilen titreşim platformunun oldukça başarılı olduğu söylenebilmektedir. Ek olarak uygulamaya yönelik aşınma testleri yapılmış ve burada da AA7075-T6 için sürtünme katsayısının %26 oranında azalabileceği bildirilmiştir.

Son olarak ise, ek işlem olmaksızın görece pürüzsüz bir yüzey ortaya çıkaran SMAT prosesinde kalıntı gerilmelerin ne ölçekte oluştuğu araştırılmıştır. Sonuç olarak 50 μm derinlikte -360 MPa kalıntı gerilme değerlerine ulaşılmıştır. Ek olarak geliştirilen çoklu darbe modeli maksimum kalıntı gerilmenin darbe yüzeyinden itibaren 62 μm derinlikte ve -370 MPa değerinde olacağını göstermiştir. Önerilen çoklu darbe modeli XRD ile elde edilen maksimum kalıntı gerilme değerini %2,7'lik bir hata payı ile tahmin edebilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında çok sayıda SCI indeks, ulusal ve uluslararası dergilerde yayın ve bildiriler hedeflenmiş ve tez çalışması sürecinde bu çalışmaların bazıları literatüre kazandırılmıştır. İlerleyen dönemde ise, yayın ve proje çalışmalarına devam edilmesi, burada kurulan modellerin daha da geliştirilerek farklı mühendislik

malzemelerine uygulanması hedeflenmektedir. Ayrıca burada tanıtılan titreşim platformu beraberinde getirdiği düşük bilya hızları sayesinde literatür için yenilikçi bir tasarımıdır. Dolayısıyla, çatlak başlangıcı, korozyon, yorulma, aşınma, gibi mühendislik malzemelerinin performans kriterlerinin araştırılması önem arz etmektedir.



KAYNAKLAR

- Abeens, M., Muruganandhan, R., Thirumavalavan, K. (2020). Effect of Low Energy Laser Shock Peening on Plastic Deformation, Wettability and Corrosion Resistance of Aluminum Alloy 7075-T651. *Optik*, 219, 165045.
- Abeens, M., Muruganatham, R., Arulvel, S. (2019). Friction-Wear Behavior of Shot Peened Aluminium 7075-T651 Alloy. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 26(1), 20–26.
- Alikhani Chamgordani, S., Miresmaeili, R., Aliofkhazraei, M. (2018). Improvement in Tribological Behavior of Commercial Pure Titanium (CP-Ti) by Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT). *Tribology International*, 119, 744–752.
- Altuntaş, G., Altuntaş, O., Bostan, B. (2021). Characterization of Al-7075/T651 Alloy by RRA Heat Treatment and Different Pre-deformation Effects. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74(12), 3025–3033.
- Anand Kumar, S., Ganesh Sundara Raman, S., Sankara Narayanan, T. S. N. (2012). Effect of Surface Mechanical Attrition Treatment on Fatigue Lives of Alloy 718. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 65(5), 473–477.
- Arifvianto, B., Suyitno, Mahardika, M., Dewo, P., Iswanto, P. T., Salim, U. A. (2011). Effect of Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT) on Microhardness, Surface Roughness and Wettability of AISI 316L. *Materials Chemistry and Physics*, 125(3), 418–426.
- Asl, H. G., Sert, Y., Bayrak, Ö., Küçükömeroğlu, T. (2021). Nitrürlenmiş 7075-T6 Alüminyum Alaşımının Vakum ve Atmosfer Şartlarında Sürtünme ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 63–71.
- Avcu, E. (2017). Surface Properties of AA7075 Aluminium Alloy Shot Peened Under Different Peening Parameters. *Acta Materialia Turcica*, 1, 3–10.
- Azadmanjiri, J., Berndt, C. C., Kapoor, A., Wen, C. (2015). Development of Surface Nano-Crystallization in Alloys by Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT). *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 40(3), 164–181.
- Azimian, M., Bart, H. J. (2017). Numerical Investigation of Particle Rebound Characteristics with Finite Element Method. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 7, 310–329.
- Badreddine, J., Rouhaud, E., Micoulaut, M., Remy, S. (2014). Simulation of Shot Dynamics for Ultrasonic Shot Peening: Effects of Process Parameters. *International Journal of Mechanical Sciences*, 82, 179–190.
- Bag, A., Delbergue, D., Bocher, P., Lévesque, M., Brochu, M. (2019). Statistical Analysis of High Cycle Fatigue Life and Inclusion Size Distribution in Shot Peened 300M Steel. *International Journal of Fatigue*, 118, 126–138.
- Bagheri, S., Guagliano, M. (2009). Review of Shot Peening Processes to Obtain Nanocrystalline Surfaces in Metal Alloys. *Surface Engineering*, 25(1), 3–14.

- Bagherifard, S., Hickey, D. J., Fintová, S., Pastorek, F., Fernandez-Pariente, I., Bandini, M., Webster, T. J., Guagliano, M. (2018). Effects of Nanofeatures Induced by Severe Shot Peening (SSP) on Mechanical, Corrosion and Cytocompatibility Properties of Magnesium Alloy AZ31. *Acta Biomaterialia*, 66, 93–108.
- Bahl, S., Suwas, S., Ungàr, T., Chatterjee, K. (2017). Elucidating Microstructural Evolution and Strengthening Mechanisms in Nanocrystalline Surface Induced by Surface Mechanical Attrition Treatment of Stainless Steel. *Acta Materialia*, 122, 138–151.
- Baydoğan, M., Çimenoglu, H., Kayali, E. S. (2004). A Study on Sliding Wear of a 7075 Aluminum Alloy. *Wear*, 257, 852–861.
- Benedetti, M., Fontanari, V., Bandini, M., Savio, E. (2015). High and very High-Cycle Plain Fatigue Resistance of Shot Peened High-Strength Aluminum Alloys: The Role of Surface Morphology. *International Journal of Fatigue*, 70, 451–462.
- Cao, L. J., Li, S. J., Shangguan, Z. C. (2013). Numerical Simulation of Residual Stresses Induced from Shot Peening with Finite Element Method. *Applied Mechanics and Materials*, 433–435, 1898–1901.
- Cecchin, D., Azanza Ricardo, C. L., D’Incau, M., Bandini, M., Scardi, P. (2014). Influence of Shot-Peening Parameters on the Sub-Surface Residual Stress Profiles in Al-7075 Alloy Components. *Materials Science Forum*, 768–769, 66–71.
- Çeçen, F., Aktas, B. (2021). Modal and Harmonic Response Analysis of New CFRP Laminate Reinforced Concrete Railway Sleepers. *Engineering Failure Analysis*, 127.
- Chaise, T., Li, J., Nélías, D., Kubler, R., Taheri, S., Douchet, G., Robin, V., Gilles, P. (2012). Modelling of Multiple Impacts for the Prediction of Distortions and Residual Stresses Induced by Ultrasonic Shot Peening (USP). *Journal of Materials Processing Technology*, 212(10), 2080–2090.
- Chan, H. L., Ruan, H. H., Chen, A. Y., Lu, J. (2010). Optimization of the Strain Rate to Achieve Exceptional Mechanical Properties of 304 Stainless Steel Using High Speed Ultrasonic Surface Mechanical Attrition Treatment. *Acta Materialia*, 58(15), 5086–5096.
- Chen, G., Gao, J., Cui, Y., Gao, H., Guo, X., Wu, S. (2018). Effects of Strain Rate on the Low Cycle Fatigue Behavior of AZ31B Magnesium Alloy Processed by SMAT. *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 536–546.
- De Domenico, D., Ricciardi, G. (2019). Dynamic Response of Non-Classically Damped Structures via Reduced-Order Complex Modal Analysis: Two Novel Truncation Measures. *Journal of Sound and Vibration*, 452, 169–190.
- De Silva, C. W. (2006). *Vibration* (Second Ed.). Taylor Francis. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Ding, H., Li, Y., Zhang, Z., Yuan, D. (2019). Analysis of Microstructural Evolution Properties Based on Laser Shock Peening. *Optik*, 179, 361–366.
- Du, H., Wei, Y., Zhang, H., Lin, W., Hou, L., Liu, Z., Liu, G. (2009). Effect of Velocity of Balls on the Strain and Stress of Low Carbon Steel Surface Layer During SMAT.

International Journal of Modern Physics B, 23, 1924–1930.

- Efe, Y., Karademir, I., Husem, F., Maleki, E., Karimbaev, R., Amanov, A., Unal, O. (2020). Enhancement in Microstructural and Mechanical Performance of AA7075 Aluminum Alloy via Severe Shot Peening and Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification. *Applied Surface Science*, 528, 146922.
- Efe, Y., Karademir, I., Husem, F., Maleki, E., Unal, O. (2020). Surface Severe Plastically Deformed Nanostructured AA7075 Alloy: Assessment on Tribological and Axial Fatigue Behaviors. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(6), 3774–3783.
- Erturk, A. Tamer, Vatansever, F., Yazar, E., Guven, E. A., Sinmazcelik, T. (2021). Effects of Cutting Temperature and Process Optimization in Drilling of GFRP Composites. *Journal of Composite Materials*, 55(2), 235–249.
- Erturk, Alpay Tamer, Vatansever, F., Yazar, E., Karabay, S. (2019). Machining Behavior of Multiple Layer Polymer Composite Bearing with Using Different Drill Bits. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107318.
- Gallitelli, D., Retraint, D., Rouhaud, E. (2014). Comparison Between Conventional Shot Peening (SP) and Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT) on a Titanium Alloy. *Advanced Materials Research*, 996, 964–968.
- Gao, T., Sun, Z., Xue, H., Retraint, D. (2020). Effect of Surface Mechanical Attrition Treatment on High Cycle and Very High Cycle Fatigue of a 7075-T6 Aluminium Alloy. *International Journal of Fatigue*, 139, 105798.
- Geradin, M., Rixen, D. J. (2015). *Mechanical Vibrations: Theory And Application to Structural Dynamics* (Third Ed.). New Jersey: Wiley.
- Gontier, C., George, D., Raffy, M. (2006). Energetic Mode Contributions in Stochastic Modal Analysis: An Application to Mode Classification. *Journal of Sound and Vibration*, 294, 944–965.
- Gopalakannan, S., Senthilvelan, T., Kalaichelvan, K. (2012). Modeling and Optimization of EDM of Al 7075/10wt% Al₂O₃ metal matrix composites by Response Surface Method. *Advanced Materials Research*, 488–489, 856–860.
- Gorham, D. A., Kharaz, A. H. (2000). The Measurement of Particle Rebound Characteristics. *Powder Technology*, 112(3), 193–202.
- Guagliano, M. (2001). Relating Almen Intensity to Residual Stresses Induced by Shot Peening: a Numerical Approach. *Journal of Materials Processing Technology*, 110, 277–286.
- Curve, H. K., Satankar, R. K. (2022). Materials Today: Proceedings Modal and Harmonic Analysis of Stiffened Plate Using First-Order Shear Deformation Theory. *Materials Today: Proceedings*, 51, 325–331.
- Hao, Y., Jibin, Z., Tianran, W. (2019). Research on a Different Method to Reach the Saturate Limit of Titanium Aluminide Alloy Surface Mechanical and Fatigue Properties by Laser Shock Process. *Optik*, 193, 162989.
- Hatch, M. R. (2001). *Vibration Simulation Using MATLAB and ANSYS* (1st Ed.).

Chapman Hall: CRC.

- He, J., Fu, Z.-F. (2001). *Modal Analysis* (1st Ed.). Oxford: Butterworth Heinemann.
- Heredia, S., Fouvry, S., Berthel, B., Panter, J. (2011). A Non-Local Fatigue Approach to Quantify Ti10V2Fe3Al Fretting Cracking Process: Application to Grinding and Shot Peening. *Tribology International*, 44(11), 1518–1525.
- Heydari Astaraee, A., Miresmaeili, R., Bagherifard, S., Guagliano, M., Aliofkhazraei, M. (2017). Incorporating the Principles of Shot Peening for a Better Understanding of Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT) by Simulations and Experiments. *Materials and Design*, 116, 365–373.
- Hong, T., Ooi, J. Y., Shaw, B. (2008). A Numerical Simulation to Relate the Shot Peening Parameters to the Induced Residual Stresses. *Engineering Failure Analysis*, 15(8), 1097–1110.
- Hughes, D. A., Hansen, N. (2003). Deformation Structures Developing on Fine Scales. *Philosophical Magazine*, 83(31–34), 3871–3893.
- Jackson, R. L., Green, I., Marghitu, D. B. (2010). Predicting the Coefficient of Restitution of Impacting Elastic-Perfectly Plastic Spheres. *Nonlinear Dynamics*, 60(3), 217–229.
- Johnson, G.R. and Cook, W.H. (1983). A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures. *Proceedings 7th International Symposium on Ballistics*, The Hague, 19-21 April 1983.
- Kang, X., Wang, T., Platts, J. (2010). Multiple Impact Modelling for Shot Peening and Peen Forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 224(5), 689–697.
- Karabay, S. (2017). *Mekanik Titreşimler Cilt 2* (Birinci Ba). İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Kaufman, J. G. (2000). *Introduction to Aluminium Alloys and Tempers* (1st Ed.). Materials Park, OH: ASM International.
- Khot, S. M., Yelve, N. P. (2011). Modeling and Response Analysis of Dynamic Systems by Using ANSYS© and MATLAB©. *Journal of Vibration and Control*, 17(6), 953–958.
- Kilickap, E. (2010). Modeling and Optimization of Burr Height in Drilling of Al-7075 Using Taguchi Method and Response Surface Methodology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49, 911–923.
- Koç, F. G., Çöl, M., Çeliker, T. (2018). Effect of Cooling Rate on Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stress of 7075 Aluminum Alloy. *Materials Testing*, 60(10), 989–996.
- Kumar, S., Chattopadhyay, K., Singh, V. (2017). Effect of Ultrasonic Shot Peening on LCF Behavior of the Ti–6Al–4V Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 724, 187–197.
- Laleh, M., Kargar, F. (2011). Effect of Surface Nanocrystallization on the Microstructural and Corrosion Characteristics of AZ91D Magnesium Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(37), 9150–9156.

- Lee, W., Sue, W., Lin, C., Wu, C. (2000). The Strain Rate and Temperature Dependence of the Dynamic Impact Properties of 7075 Aluminum Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 100, 116–122.
- Li, K., Spartacus, G., Dong, J., Cao, P., Shin, K. (2017). Effect of Ultrasonic Shot Peening on Microstructure and Properties of 301SS. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(16), 1851–1855.
- Li, N., Li, Y. D., Li, Y. X., Wu, Y. H., Zheng, Y. F., Han, Y. (2014). Effect of Surface Mechanical Attrition Treatment on Biodegradable Mg-1Ca alloy. *Materials Science and Engineering C*, 35(1), 314–321.
- Li, P. Y., Xiong, B. Q., Zhang, Y. A., Li, Z. H. (2012). Temperature Variation and Solution Treatment of High Strength AA7050. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(3), 546–554.
- Lin, Q. hua, Li, B. ming. (2020). Numerical Simulation of Dynamic Large Deformation and Fracture Damage for Solid Armature in Electromagnetic Railgun. *Defence Technology*, 16(2), 348–353.
- Liu, G., Lu, J., Lu, K. (2000). Surface Nanocrystallization of 316L Stainless Steel Induced by Ultrasonic Shot Peening. *Materials Science and Engineering A*, 286(1), 91–95.
- Liu, Y., Jin, B., Li, D. J., Zeng, X. Q., Lu, J. (2015). Wear Behavior of Nanocrystalline Structured Magnesium Alloy Induced by Surface Mechanical Attrition Treatment. *Surface and Coatings Technology*, 261, 219–226.
- Liu, Y., Lv, S. L., Zhang, W. (2018). Shot Peening Numerical Simulation of Aircraft Aluminum Alloy Structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 322(3), 032003.
- Lu, K., Lu, J. (2004). Nanostructured Surface Layer on Metallic Materials Induced by Surface Mechanical Attrition Treatment. *Materials Science and Engineering A*, 375–377, 38–45.
- Lu, Ke, Lu, J. (1999). Surface Nanocrystallization (SNC) of Metallic Materials-Presentation of the Concept Behind a New Approach. *Journal of Materials Science and Technology*, 15(3), 193–197.
- Majzoobi, G. H., Azizi, R., Alavi Nia, A. (2005). A three-dimensional simulation of Shot Peening Process Using Multiple Shot Impacts. *Journal of Materials Processing Technology*, 164–165, 1226–1234.
- Maleki, E., Unal, O., Kashyzadeh, K. R. (2018). Effects of Conventional, Severe, Over, and Re-Shot Peening Processes on the Fatigue Behavior of Mild Carbon Steel. *Surface and Coatings Technology*, 344(2017), 62–74.
- Manchoul, S., Seddik, R., Ben Sghaeir, R., Fathallah, R. (2019). Finite Element Modeling of Ultrasonic and Conventional Shot Peening: A comparison of the effect of Both Processes on Surface Conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 233(5), 930–941.
- Manchoul, S., Seddik, R., Grissa, R., Sghaier, R. Ben, Fathallah, R. (2018). A Predictive Approach to Investigate the Effect of Ultrasonic Shot Peening on a High-Cycle Fatigue Performance of an AISI 316L Target. *International Journal of Advanced*

Manufacturing Technology, 95(9–12), 3437–3451.

- Marini, M., Fontanari, V., Bandini, M., Benedetti, M. (2017). Surface Layer Modifications of Micro-Shot-Peened Al-7075-T651: Experiments and Stochastic Numerical Simulations. *Surface and Coatings Technology*, 321, 265–278.
- Martín, V., Vázquez, J., Navarro, C., Domínguez, J. (2020). Effect of Shot Peening Residual Stresses and Surface Roughness on Fretting Fatigue Strength of Al 7075-T651. *Tribology International*, 142, 106004.
- Maurel, P., Weiss, L., Grosdidier, T., Bocher, P. (2020). How Does Surface Integrity of Nanostructured Surfaces Induced by Severe Plastic Deformation Influence Fatigue Behaviors of Al Alloys with Enhanced Precipitation? *International Journal of Fatigue*, 140, 105792.
- Meguid, S. A., Shagal, G., Stranart, J. C., Daly, J. (1999). Three-Dimensional Dynamic Finite Element Analysis of Shot-Peening Induced Residual Stresses. *Finite Elements in Analysis and Design*, 31(3), 179–191.
- Meng, X., Liu, B., Luo, L., Ding, Y., Rao, X. X., Hu, B., Liu, Y., Lu, J. (2018). The Portevin-Le Châtelier Effect of Gradient Nanostructured 5182 Aluminum Alloy by Surface Mechanical Attrition Treatment. *Journal of Materials Science and Technology*, 34(12), 2307–2315.
- Micoulaut, M., Mechkov, S., Retraint, D., Viot, P., François, M. (2007). Granular Gases in Mechanical Engineering: On the Origin of Heterogeneous Ultrasonic Shot Peening. *Granular Matter*, 9, 25–33.
- Mohanty, P., Rixen, D. J. (2004). Operational Modal Analysis in the Presence of Harmonic Excitation. *Journal of Sound and Vibration*, 270, 93–109.
- Mylonas, G. I., Labeas, G. (2011). Numerical Modelling of Shot Peening Process and Corresponding Products: Residual Stress, Surface Roughness and Cold Work Prediction. *Surface and Coatings Technology*, 205(19), 4480–4494.
- Nam, Y. S., Jeong, Y. I., Shin, B. C., Byun, J. H. (2015). Enhancing Surface Layer Properties of an aircraft aluminum alloy by Shot Peening Using Response Surface Methodology. *Materials and Design*, 83, 566–576.
- Nieto, M., Elsayed, M., Walch, D. (2018). Modal Participation Factors And Their Potential Applications in Aerospace: A Review, *Proceedings of The Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress*, Toronto, Canada, May 27-30 2018.
- Olugbade, T., Liu, C., Lu, J. (2019). Enhanced Passivation Layer by Cr Diffusion of 301 Stainless Steel Facilitated by SMAT. *Advanced Engineering Materials*, 21(8), 1–11.
- Olugbade, T., Lu, J. (2019a). Characterization of the Corrosion of Nanostructured 17-4 PH Stainless Steel by Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT). *Analytical Letters*, 52(16), 2454–2471.
- Olugbade, T., Lu, J. (2019b). Enhanced Corrosion Properties of Nanostructured 316 Stainless Steel in 0.6 M NaCl Solution. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 5(38), 1–11.

- Olugbade, T. O. (2020). Electrochemical Characterization of the Corrosion of Mild Steel in Saline Following Mechanical Deformation. *Analytical Letters*, 54(6), 1055–1067.
- Olugbade, T. O., Lu, J. (2020). Literature Review on the Mechanical Properties of Materials After Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT). *Nano Materials Science*, 2(1), 3–31.
- Palacios, M., Bagherifard, S., Guagliano, M., Fernández Pariente, I. (2014). Influence of Severe Shot Peening on Wear Behaviour of an Aluminium Alloy. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 37(7), 821–829.
- Pandey, V., Chattopadhyay, K., Santhi Srinivas, N. C., Singh, V. (2017). Role of Ultrasonic Shot Peening on Low Cycle Fatigue Behavior of 7075 Aluminium Alloy. *International Journal of Fatigue*, 103, 426–435.
- Pandey, V., Rao, G. S., Chattopadhyay, K., Santhi Srinivas, N. C., Singh, V. (2015). Effect of Surface Nanostructuring on LCF Behavior of Aluminum Alloy 2014. *Materials Science and Engineering A*, 647, 201–211.
- Pandey, V., Singh, J. K., Chattopadhyay, K., Srinivas, N. C. S., Singh, V. (2019). Optimization of USSP Duration for Enhanced Corrosion Resistance of AA7075. *Ultrasonics*, 91, 180–192.
- Park, H. S., Oh, B. K. (2018). Damage detection of Building Structures Under Ambient Excitation Through the Analysis of the relationship between the Modal Participation Ratio and Story Stiffness. *Journal of Sound and Vibration*, 418, 122–143.
- Peng, J., Zhang, Z., Guo, P., Liu, Z., Li, Y., Zhou, W., Wu, Y. (2019). The Effect of Surface Mechanical Attrition Treatment on texture evolution and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy. *Materials Characterization*, 148, 26–34.
- Pilé, C., François, M., Retraint, D., Rouhaud, E., Lu, J. (2005). Modelling of the Ultrasonic Shot Peening Process. *Materials Science Forum*, 490–491, 67–72.
- Rakita, M., Wang, M., Han, Q., Liu, Y., Yin, F. (2013). Ultrasonic Shot Peening. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*, 5(3), 189.
- Rao, C. L., Narayanamurthy, V., Simha, K. R. Y. (2016). *Applied Impact Mechanics* (1st Ed.). West Sussex: John Wiley Sons Ltd.
- Rida, A., Rouhaud, E., Micoulaut, M., Makke, A., Retraint, (2017). Molecular Dynamics Investigations for Surface Mechanical Attrition Treatment. *13th International Conference on Shot Peening*, Montreal, Canada, 18-21 September.
- Rousseau, T., Hoc, T., Gilles, P., Nougier-Lehon, C. (2015). Effect of Bead Quantity in Ultrasonic Shot Peening: Surface Analysis and Numerical Simulations. *Journal of Materials Processing Technology*, 225, 413–420.
- Samih, Y., Beausir, B., Bolle, B., Grosdidier, T. (2013). In-Depth Quantitative Analysis of the Microstructures Produced by Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT). *Materials Characterization*, 83, 129–138.
- Scherrer, P. (1912). Bestimmung der inneren Struktur und der Größe von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen. *Kolloidchemie Ein Lehrbuch*, 277(1916), 387–409.

- Seifried, R., Minamoto, H., Eberhard, P. (2010). Viscoplastic Effects Occurring in Impacts of Aluminum and Steel Bodies and Their Influence on the Coefficient of Restitution. *Journal of Applied Mechanics*, 77(4), 1–7.
- Senkova, S. V., Senkov, O. N., Miracle, D. B. (2006). Cryogenic and Elevated Temperature Strengths of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy Modified with Sc and Zr. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 37(12), 3569–3575.
- Sheng, X. F., Xia, Q. X., Cheng, X. Q., Lin, L. S. (2012). Residual Stress Field Induced by Shot Peening Based on Random-Shots for 7075 Aluminum Alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22, s261–s267.
- Sun, H. Q., Shi, Y. N., Zhang, M. X. (2008). Wear behaviour of AZ91D Magnesium Alloy with a Nanocrystalline Surface Layer. *Surface and Coatings Technology*, 202(13), 2859–2864.
- Sun, J., Zhang, Y. (2015). Three-Dimensional Finite Element Simulation of Residual Stress Field for Shot-Peening and Grinding. *International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation*, Zhuhai City, China, October 31–November 1 2015.
- Sun, Q., Han, Q., Liu, X., Xu, W., Li, J. (2017). The Effect of Surface Contamination on Corrosion Performance of Ultrasonic Shot Peened 7150 Al alloy. *Surface and Coatings Technology*, 328, 469–479.
- Sun, Q., Han, Q., Xu, R., Zhao, K., Li, J. (2018). Localized Corrosion Behaviour of AA7150 After Ultrasonic Shot Peening: Corrosion Depth vs. Impact Energy. *Corrosion Science*, 130, 218–230.
- Sun, Q., Liu, X., Han, Q., Li, J., Xu, R., Zhao, K. (2018). A Comparison of AA2024 and AA7150 Subjected to Ultrasonic Shot Peening: Microstructure, Surface Segregation and Corrosion. *Surface and Coatings Technology*, 337, 552–560.
- Sun, Z., Retraint, D., Baudin, T., Helbert, A. L., Brisset, F., Chemkhi, M., Zhou, J., Kanouté, P. (2017). Experimental Study of Microstructure Changes due to Low Cycle Fatigue of a Steel Nanocrystallised by Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT). *Materials Characterization*, 124, 117–121.
- Tao, N. R., Lu, J., Lu, K. (2008). Surface Nanocrystallization by Surface Mechanical Attrition Treatment. *Materials Science Forum*, 579, 91–108.
- Thorby, D. (2008). *Structural Dynamics and Vibration in Practice* (1st Ed.). Oxford: Elsevier.
- Todaka, Y., Umemoto, M., Tsuchiya, K. (2004). Comparison of Nanocrystalline Surface Layer in Steels Formed by Air Blast and Ultrasonic Shot Peening. *Materials Transactions*, 45(2), 376–379.
- Trško, L., Bokůvka, O., Nový, F., Guagliano, M. (2014). Effect of Severe Shot Peening on Ultra-High-Cycle Fatigue of a Low-Alloy Steel. *Materials and Design*, 57, 103–113.
- Trško, L., Guagliano, M., Bokůvka, O., Nový, F., Jambor, M., Florková, Z. (2017). Influence of Severe Shot Peening on the Surface State and Ultra-High-Cycle Fatigue

- Behavior of an AW 7075 Aluminum Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(6), 2784–2797.
- Tsai, M. T., Huang, J. C., Tsai, W. Y., Chou, T. H., Chen, C. F., Li, T. H., Jang, J. S. C. (2018). Effects of Ultrasonic Surface Mechanical Attrition Treatment on Microstructures and Mechanical Properties of High Entropy Alloys. *Intermetallics*, 93, 113–121.
- Tsai, W. Y., Huang, J. C., Gao, Y. J., Chung, Y. L., Huang, G. R. (2015). Relationship Between Microstructure and Properties for Ultrasonic Surface Mechanical Attrition Treatment. *Scripta Materialia*, 103, 45–48.
- Ul Haq, M. I., Anand, A. (2019). Friction and Wear Behavior of AA7075-Si₃N₄ Composites Under Dry Conditions: Effect of Sliding Speed. *Silicon*, 11(2), 1047–1053.
- Ullah, H., Ullah, B., Rauf, A., Muhammad, R. (2019). Dynamic Finite Element Analysis of Shot Peening Process of 2618-T61 Aluminium Alloy. *Scientia Iranica*, 26(3B), 1378–1387.
- Unal, O. (2016). Optimization of Shot Peening Parameters by Response Surface Methodology. *Surface and Coatings Technology*, 305, 99–109.
- Wang, R., Zhou, Q., Zheng, Z., Gao, Y. (2018). The Negative Effect of High-Intensity Shot-Peening on the Intergranular Corrosion Behavior of the Super304H Austenitic Stainless Steel. *Corrosion Science*, 143, 390–402.
- Wang, X. R., Jin, J. Q., Li, Y. Z. (2014). The Harmonic Response Analysis of Workover Rig Platform Base on ANSYS Workbench. *Advanced Materials Research*, 945–949, 766–769.
- Wang, Z. B., Tao, N. R., Li, S., Wang, W., Liu, G., Lu, J., Lu, K. (2003). Effect of Surface Nanocrystallization on Friction and Wear Properties in Low Carbon Steel. *Materials Science and Engineering A*, A352, 144–149.
- Wen, L., Yuan, Y., Wang, Y., Jin, Y. (2015). Effect of Nanocrystalline Surface and Iron-Containing Layer Obtained by SMAT on Tribological Properties of 2024 Al Alloy. *Rare Metal Materials and Engineering*, 44(6), 1320–1325.
- Williamson, G. K., Hall, W. H. (1953). X-ray Line Broadening from Filed Aluminium and Wolfram. *Acta Metallurgica*, 1(1), 22–31.
- Wu, X., Tao, N., Hong, Y., Xu, B., Lu, J., Lu, K. (2002). Microstructure and Evolution of Mechanically-Induced Ultrafine Grain in Surface Layer of Al-Alloy Subjected to USSP. *Acta Materialia*, 50(8), 2075–2084.
- Xiao, X., Tong, X., Liu, Y., Zhao, R., Gao, G., Li, Y. (2018). Prediction of Shot Peen Forming Effects with Single and Repeated Impacts. *International Journal of Mechanical Sciences*, 137, 182–194.
- Xie, L., Wang, Z., Wang, C., Wen, Y., Wang, L., Jiang, C., Lu, W., Zhang, L., Hua, L. (2018). Finite Element Dynamic Analysis on Residual Stress Distribution of Titanium Alloy and Titanium Matrix Composite after Shot Peening Treatment. P. Razvan (Ed.), *Finite Element Method* içinde (23–48). London: IntechOpen.

- Yarar, E., Erturk, A. T. (2021). A Numerical Investigation of a Single-Shot Impact Effects on Plastic Deformation of Titanium Alloys. *Advances in Science and Technology*, 105, 119–124.
- Yarar, E., Erturk, A. T., Karabay, S. (2021). Dynamic Finite Element Analysis on Single Impact Plastic Deformation Behavior Induced by SMAT Process in 7075-T6 Aluminum Alloy. *Metals and Materials International*, 27(8), 2600–2613.
- Yarar, E., Karabay, S. (2020). Investigation of the Effects of Ultrasonic Assisted Drilling on Tool Wear and Optimization of Drilling Parameters. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 265–280.
- Yin, F., Hua, L., Wang, X., Rakita, M., Han, Q. (2014). Numerical Modelling and Experimental Approach for Surface Morphology Evaluation During Ultrasonic Shot Peening. *Computational Materials Science*, 92, 28–35.
- Yin, F., Liu, Y., Xu, R., Zhao, K., Partin, A., Han, Q. (2018). Nanograined Surface Fabricated on the Pure Copper by Ultrasonic Shot Peening and an Energy-Density Based Criterion for Peening Intensity Quantification. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 656–663.
- Žagar, S., Grum, J. (2014). Surface Modification Analysis After Shot Peening of AA7075 in Different States. *Materials Science Forum*, 768–769, 519–525.
- Zhang, D. N., Shangguan, Q. Q., Xie, C. J., Liu, F. (2015). A Modified Johnson-Cook Model of Dynamic Tensile Behaviors for 7075-T6 Aluminum Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 619, 186–194.
- Zhang, H., Qiu, X., Zhao, X., Xu, D. (2019). Effect of Surface Self-Nanocrystallization on Friction and Wear Behavior of Al7075-T6511 Alloy. *Materials Research Express*, 6, 115031.
- Zhang, H. W., Hei, Z. K., Liu, G., Lu, J., Lu, K. (2003). Formation of Nanostructured Surface Layer on AISI 304 Stainless Steel by Means of Surface Mechanical Attrition Treatment. *Acta Materialia*, 51(7), 1871–1881.
- Zhang, Y., Proust, G., Retraint, D., Wang, H., Gan, Y. (2021). Predicting Mechanical Properties of 316L Stainless Steel Subjected to SMAT: A Sequential DEM-FEM Investigation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 193, 106173.
- Zhou, J., Retraint, D., Sun, Z., Kanouté, P. (2018). Comparative Study of the Effects of surface mechanical attrition treatment and conventional shot peening on Low Cycle Fatigue of a 316L Stainless Steel. *Surface and Coatings Technology*, 349, 556–566.
- Zhu, L., Guan, Y., Wang, Z., Zheng, H., Lin, J., Zhai, J., Xie, Z. (2020). Influence of Surface Nanocrystallization and Partial Amorphization Induced by Ultrasonic Shot Peening on Surface Properties of 7075 Aluminum Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(11), 7693–7709.
- Zupanc, U., Grum, J. (2011). Surface Integrity of Shot Peened Aluminium Alloy 7075-T651. *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 57(5), 379–384.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- Çöl M., Koç F. G., **Yarar, E.**, Angigün F., Türkan A., Makas T. (2017). Dövme Çeliklerde Üretim Parametrelerinin İşlenebilirliğe Etkisi, *2nd International Mediterranean Science and Engineering Congress*, Adana, Türkiye, 25-27 Ekim 2017.
- Dereoglu F., **Yarar, E.**, Karabay S. (2020). Kâğıt İşletmelerinde Kestirimci Bakım Uygulamaları ve Titreşim Analizi. *International Marmara Sciences Congress (Bahar) 2020*, Kocaeli, Türkiye, 19-20 Haziran 2020.
- Erturk, Alpay Tamer, Vatansever, F., **Yarar, E.**, Karabay, S. (2019). Machining Behavior of Multiple Layer Polymer Composite Bearing with Using Different Drill Bits. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107318. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107318
- Erturk, A. Tamer, Vatansever, F., **Yarar, E.**, Guven, E. A., Sinmazcelik, T. (2021). Effects of Cutting Temperature and Process Optimization in Drilling of GFRP Composites. *Journal of Composite Materials*, 55(2), 235-249. doi: 10.1177/0021998320947143
- Erturk, A. T., **Yarar, E.**, Vatansever, F., Sahin, A. E., Kiliçel, M., Alpay, Y. O. (2021). A Comparative Study of Mechanical and Machining Performance of Polymer Hybrid and Carbon Fiber Epoxy Composite Materials. *Polymers and Polymer Composites*, 29(9S), S655-S666. doi: 10.1177/09673911211020620
- Erturk, A. T., Bulduk, M. E., Tarakçi, G., Özer, G., **Yarar, E.** (2022). Investigation of the Microstructure and Mechanical Characteristics of Lattice Structures Produced by Laser Powder Bed Fusion Method. *Metals and Materials International*, 28, 155-167. doi: 10.1007/s12540-021-01038-y
- Güven E. A., **Yarar, E.**, Karabay S. (2017). Forging Analysis Of AA2014 Alloy Under Different Conditions By Using Finite Elements Method, *III International Conference on Engineering and Natural Science*, Budapest, Hungary, 3-7 Mayıs 2017.
- Peçe, F., **Yarar, E.**, Karabay, S. (2020). PID ve Bulanık Mantık Kontrol Sistemleri ile İki Tekerlekli Kendini Dengeleyebilen Robotik Sistem Tasarımı. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 99-108.
- Yarar, E.**, Karabay S. (2016). Ultrasonic Assisted Drilling of Aluminium 7075-T6, *International Conference on Engineering and Natural Sciences*, Sarajevo, Bosna Hersek, 24-28 Mayıs 2016.
- Yarar, E.**, Karabay S. (2017). Experimental Study on Ultrasonic Assisted Drilling of AA6061-T6, *II. International Academic Research Congress*, Antalya, Türkiye, 18-21 Ekim 2017.
- Yarar, E.**, Güven E. A., Balcı E., Karabay S., Elut S. B. (2017). Forgability of Aluminum 7075 Alloy in Closed Die, *II. International Academic Research Congress*, Antalya, Türkiye, 18-21 Ekim 2017.

- Yarar E.,** Karabay S. (2017). The Effects of Ultrasonic Assisted Drilling on Tool Wear, *II. International Academic Research Congress*, Budapest, Hungary, 18-21 Ekim 2017.
- Yarar E.,** Karabay S., Güven E. A. (2017). The Effects on the Surface Roughness of Tool Coating in Drilling of AA6061-T6, *III International Conference on Engineering an Natural Science*, Budapest, Hungary, 3-7 Mayıs 2017.
- Yarar E.,** Vatansever F., Ertürk A. T., Karabay S. (2018). Optimization of Cutting Parameters with Taguchi Method for Drilling of Composites *IV. International Academic Research Congress*, Antalya, Türkiye, 30 Ekim-03 Kasım 2018.
- Yarar, E.,** Karabay, S. (2020). Investigation of the Effects of Ultrasonic Assisted Drilling on Tool Wear and Optimization of Drilling Parameters. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 265–280. doi: 10.1016/j.cirpj.2020.06.002
- Yarar, E.,** Erturk, A. T. (2021). A Numerical Investigation of a Single-Shot Impact Effects on Plastic Deformation of Titanium Alloys. *Advances in Science and Technology*, 105, 119–124. doi: 10.4028/www.scientific.net/ast.105.119
- Yarar, E.,** Erturk, A. T., Karabay, S. (2021). Dynamic Finite Element Analysis on Single Impact Plastic Deformation Behavior Induced by SMAT Process in 7075-T6 Aluminum Alloy. *Metals and Materials International*, 27(8), 2600–2613. doi: 10.1007/s12540-020-00951-y

ÖZGEÇMİŞ

İlköğretim ve lise öğrenimini Aksaray’da tamamladı. 2007 yılında girdiği İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2012 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2014-2016 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2014 yılından beri Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

