Fonksiyonel Derecelendirilmiş Al7xxx/B_4C Köpük Metallerin Üretimi, Darbe Enerjileri Altında Penetrasyon Davranışı, Balistik ve Radyasyon Zırhlama Performansının Belirlenmesi

Program Kodu: 1001

Proje No: 214M112

Proje Yürütücüsü:
Yrd. Doç. Dr. Henifi ÇİNİCİ

Araştırmacı(lar):
Yrd. Doç. Dr. Arif UZUN
Öğr. Gör. Dr. Uğur GÖKMEN

Danışman(lar):
Prof. Dr. Mehmet Atıf ÇETİNER

Bursiyer(ler):
Öğr. Gör. Dr. Halil KARAKOÇ
Esra GÜNEY
Ruziye ÇAMKERTEN

HAZİRAN 2017
ANKAR

ÖNSÖZ

“Fonksiyonel Derecelendirilmiş Al7xxx/B_4C Köpük Metallerin Üretimi, Darbe Enerjileri Altında Penetrasyon Davranışı, Balistik ve Radyasyon Zırhlama Performansının Belirlenmesi” isimli proje 05/09/2014 tarihinde TÜBİTAK’a sunulmuş ve 15/04/2015 tarihinde 304.70,00 TL toplam bütçe ile kabul edilmiştir. 08/06/2015 tarihinde imzalanan sözleşme ile 214M112 nolu proje fiilen başlamış ve bu sonuç raporunda belirtilen hususlar yapılmak sureti ile tamamlanmıştır. Bu proje çerçevesinde şahsım yürütücü ve Yard. Doç. Dr. Arif UZUN ve Öğr. Gör. Dr. Uğur GÖKMEN araştırmacı olarak, Prof. Dr. Atıf ÇETİNER proje danışmanı ve yüksek lisan öğrencisi olan iki doktora öğrencisi olarak bir kişi bursiyer olarak görev almıştır.

Proje çerçevesinde bütçede belirtilen 3 boyutlu karıştırıcı (turbula), çalışmada kullanılan tozlar (Al7075, B_4C, Si ve TiH_2) ve tozların preslenmesi için sıcak presleme kalıbı alınmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında kullanılan hidrolik presin bakım ve onarımı yaptırılmıştır.

Proje kapsamında saf Al7075 ve B_4C’den oluşan fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzeme üretilmiştir. Üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzemelerin makro ve mikro analizleri, üç nokta eğme dayanımı, darbe testleri, radyasyon geçirgenlik testleri ve balistik testler yapılmıştır.

Elde edilen fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzemelerin üretimi, yoğunluk, gözenek yapısı, lineer genişleme, üç nokta eğme dayanımları, XRD ve SEM incelemeleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuarlarında yapılmıştır. Darbe testleri HİTİT Üniversitesi Bilimsel Teknik Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuarlarında yapılmıştır. Radyasyon geçirgenli testleri Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma ve Uygulama Merkezinde yapılmıştır. Balistik testler ise ROKETSAN Balistik Koruma Merkezi’nin Elmadağ tesislerinde yapılmıştır.

Proje çıktıları ROKETSAN Balistik Koruma Merkezi, FNSS AR-GE birimi ve BARIŞ Savunma Endüstri A.Ş. şirketlerinde ilgili personellerin katılımlarıyla gerçekleştirilen toplantılarda paylaşılmıştır. Projeden üretilen yayınlar 12-14 Ekim 2016 tarihlerinde Denizli’de düzenlenen 16. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, 11-13 Temmuz 2016 tarihlerinde Ukrayna’da düzenlenen 2. Uluslararası Multidisipliner Avrasya Kongresi ve 26-29 Nisan 2017 tarihlerinde İspanya’da düzenlenen International Congress on New Trends in Science, Engineering and Technology konferanslarında sunulmuştur.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ii
İÇİNDEKİLER iii
TABLOLAR LİSTESİ v
ŞEKİLLER LİSTESİ vi
ÖZET x
ABSTRACT xi
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ÖZETİ 3
2.1. Metalik Köpükler 3
2.2. Metalik Köpük Üretim Yöntemleri 4
2.2.1. Katı-gaz ötektik katılaşma yöntemi 4
2.2.2. İnfiltrasyon yöntemi 5
2.2.3. Boşluk tutucu malzemelerin etrafına hassas döküm 6
2.2.4. Erğiyik metal içerisine gaz enjektesi 7
2.2.5. Erğiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi 8
2.2.6. Sıvı metal yoluyla köpük üretimi (FORMGRIP) 9
2.2.7. Toz metalurjisi yöntemi 9
2.3. Fonksiyonel Derecelendirilmiş (FDM) Metalik Köpükler 12
2.4. Balistik 15
2.4.1. Balistik koruma testleri 19
2.4.2. Balistik zırh malzemeleri 20
2.4.3. Zırh uygulama alanları ve zırh sistemlerinde aranan özellikler 26
2.4.4. Balistik koruyucu ölçüm standarttı 28
2.5. Radyasyon Zırhlama 29
2.5.1. Radyasyon zırhlayıcı malzemeler 33
2.6. Darbe Testi 36
3. GEREÇ VE YÖNTEM 37
3.1. Malzeme 37
3.2. Al7075 Köpük Metallerin Üretimi 37
3.2.1. Tozların karıştırılması 37
3.2.2. Sıcak presleme işlemi 38
3.2.3. Köpürtme işlemi 39
3.2.4. Makroyapısal Analizler 39
3.2.5. Yoğunluk Ölçümü ve Genleşme Oranının Belirlenmesi 40

3.3. B_4C takviyeli Al7075 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin (FDM) Üretimi 41
3.3.1. Sertlik ölçümleri 42
3.4. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Köpük Malzemelerin (FDKM) Üretimi 42
3.5. Darbe Testi 43
3.6. Balistik Test 44
3.6.1. Balistik deney düzeneği 45
3.6.2. Balistik test numunelerinin hazırlanması 46
3.7. Gama Işını Geçirgenlik Testi 47
3.8. Mikroyapı Karakterizasyonu 48
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 49
4.1. Al7075 Preform Malzemelerin Köpürme Davranışı 49
4.2. FDM'lerin SEM Analizleri 53
4.3. FDM'lerin XRD Analizleri 69
4.4. FDM'lerin Sertlik Değerleri 70
4.5. FDKM'lerin Düşük Hızlı Darbe Enerjileri Altında Penetrasyon Davranışı 74
4.6. Al7075 köpük metaller, FDM ve FDKM'lerin Gama Işını Sönümleme Özellikleri 82
4.7. FDM ve FDKM'lerin Balistik Performansı 85
4.7.1. Makro hasar analizi 85
4.7.2. V50 Hız Limitleri 95
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 99
6. KAYNAKLAR 101

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Mermi ve hedef bakımından balistik performans parametreleri 26
Tablo 2.2. Zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri 27
Tablo 2.2. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri 28
Tablo 2.3. Uluslararası balistik standartları 29
Tablo 2.4. Soğurma katsayıları 31
Tablo 2.5. Yarı değer kalınlıkları 32
Tablo 2.6. Alüminyum için yığılma faktörleri 32
Tablo 2.7. Kurşun için yığılma faktörleri 33
Tablo 2.8. Su için yığılma faktörleri 33
Tablo 3.1. Başlangıç tozlarına ait fiziksel özellikler 37
Tablo 3.2. Balistik test parametreleri 46
Tablo 4.1. XRD grafiklerinden elde edilen pik şiddetleri 71
Tablo 4.2. Al7075 köpükler, FDM ve FDKM'lerin Cs-137 (662 keV) kaynağına ilişkin deneysel sonuçlar 82
Tablo 4.3. Al7075 köpükler, FDM ve FDKM'lerin Co-60 (1173 keV) kaynağına ilişkin deneysel sonuçlar 82
Tablo 4.4. Al7075 köpükler, FDM ve FDKM'lerin Na-22 (1275 keV) kaynağına ilişkin deneysel sonuçlar 83
Tablo 4.5. Balistik test malzeme ve atış parametreleri (0 derece açılarda) 96
Tablo 4.6. Balistik test malzeme ve atış parametreleri (30 derece açıda) 98

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. a) Kapalı gözenekli b) Açık gözenekli metalik köpük 3
Şekil 1.2. Açık gözenekli metalik köpüğün GASAR yöntemi ile üretimi 5
Şekil 2.2. GASAR yöntemi ile üretilmiş köpüğün gözenek yapısı 5
Şekil 2.3. Hassas döküm yöntemi (*DUOCEL* yöntemi) 6
Şekil 2.4. a) *DUACEL* köpüğün SEM görüntüsü,
b) Hassas döküm ile yapılmış bazı parçalar 6
Şekil 2.5. Boşluk tutucu kullanılan üretim yöntemi 7
Şekil 2.6. Gaz enjeksiyonla doğrudan köpürtme işlemi 7
Şekil 2.7. Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile köpürtme 8
Şekil 2.8. FORMGRIP yönteminin şematik gösterimi 9
Şekil 2.9. Toz metalurjisi ile köpük üretiminin şeması 10
Şekil 2.10. TM yöntemi ile üretilmiş Al köpüğün gözenek yapısı 12
Şekil 2.11. FDM yapının insan vücudunda kullanımı 13
Şekil 2.12. Derecelendirilmiş sandviç yapıların modeli 14
Şekil 2.13. Deney numunesine ait görüntü 14
Şekil 2.15. Namlu boyunca basınç değişimi....16
Şekil 2.14. Barutun yanmasıyla oluşan basıncın etkisiyle merminin namludan çıkışı 17
Şekil 2.17. Merminin havadayken hareketine etkiyen kuvvetler 18
Şekil 2.18. V50 hız gösterimi 19
Şekil 2.19. Darbe sonrası kopan parçalar ve koruyucu katmanın şematik görünümü 21
Şekil 2.20. Metal köpüklerin gerilim-birim şekil değişim miktarı grafiği 22
Şekil 2.21. Zırh malzemesinin tarihi gelişimi boyunca ağırlık değişimi 23
Şekil 2.15. Al köpük kullanılarak yapılan çeşitli zırh tasarımları 25
Şekil 2.16. Al köpüğün integral zırh malzemesi olarak tasarımı 25
Şekil 2.17. Kompozit yapıda balistik darbe hasar şekilleri....28
Şekil 2.25. Radyasyon çeşitlerine göre zırhlama 29
Şekil 2.26. Gama spektrometre sisteminin şematik diyagramı ve test edilen açık gözenekli
Al Köpük numuneler (a) gama ışın kaynağı, (b) kaynak kolimatorü,
(c) numune kolimatorü, (d) numune, (e) dedektör olimatorü ve (f) NaI dedektör ..35
Şekil 3.1. Turbula T2 F tipi üç boyutlu toz karıştırıcı 38
Şekil 3.2. Tozların sıkıştırılmasında kullanılan deney seti, a)hidrolik pres,
b) sıkıştırma kalıp seti, c) kalıp ısıtıcı rezistans ve
d) Al7075 köpürebilir preform malzeme 38
Şekil 3.3. Köpürtme işlemlerinin gerçekleştirildiği özel tasarım fırın 39
Şekil 3.4. Al7075 köpüğün gözenek yapısı 40

Şekil 3.5. a) FDM'nin makro resmi, b) Kademeleri gösteren kesit görüntüsü 41
Şekil 3.6. FDM kademelerinin ve geçiş bölgelerinin şematik olarak gösterimi 42
Şekil 3.7. Sertlik ölçüm cihazı 42
Şekil 3.8. Üretilen FDKM ve FDKM'nin şematik görünümü 43
Şekil 3.9. Darbe test cihazı, test başlangıcında FDKM ve test sonrası FDKM 44
Şekil 3.10. Balistik test deney düzeneği 46
Şekil 3.11. Üç farklı şekilde atış yapılan balistik test numunelerin ve kurşunun ilk temas ettiği kesit yüzeylerin şematik görünümü (a) kurşunun %10 B_4C içeren FDM ile teması, (b) kurşunun FDKM'nin %60 B_4C içeren yüzüyi ile teması, (c) kurşunun FDKM'nin köpük yüzeyi ile teması 47
Şekil 3.12. Yüksek Saflıkta Germanyum Dedektörlü Gama Ölçüm Sistemi 48
Şekil 3.13. Deneysel çalışmalarda kullanılan SEM 48
Şekil 4.1. Farklı sıcaklıklarda (250^{o}C, 350^{o}C ve 450^{o}C) ve basınçlarında (200, 300 ve 400 MPa) sıkıştırılmış köpürebilir Al7075 ve Al7075+%7 Si malzemelere ait bağıl yoğunluk değerleri 50
Şekil 4.2. Al7075 köpürebilir malzemelere ait hacimsel genleşme değerleri 51
Şekil 4.3. 700°C sıcaklıkta Al viskozitesi üzerine alaşım elementinin etkisi 51
Şekil 4.4. Al7075+%7Si köpürebilir malzemelere ait hacimsel genleşme değerleri 52
Şekil 4.5 Maksimum oranda hacimsel genleşme sergileyen numunelere ait makro yapı görüntüleri 53
Şekil 4.6. FDM'ye ait kademelerin şematik gösterimi 53
Şekil 4.7. 250^{o}C sıcaklıkta ve farklı basınçlarda üretilen numunelere ait SEM görüntüleri 55
Şekil 4.8. 350^{o}C sıcaklıkta ve farklı basınçlarda üretilen numunelere ait SEM görüntüleri 56
Şekil 4.9. 450^{o}C sıcaklıkta ve farklı basınçlarda üretilen numunelere ait SEM görüntüleri 57
Şekil 4.10. 250^{o}C sıcaklıkta 400 MPa presleme basıncında üretilmiş numune için EDX analizi 58
Şekil 4.11. 350^{o}C sıcaklıkta 400 MPa presleme basıncında üretilmiş numune için EDX analizi 58
Şekil 4.12. 450^{o}C sıcaklıkta 400 MPa presleme basıncında üretilmiş numune için EDX analizi 58
Şekil 4.13. 250^{o}C sıcaklıkta ve 200 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri 60
Şekil 4.14. 250^{o}C sıcaklıkta ve 300 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri 61
Şekil 4.15. 250^{o}C sıcaklıkta ve 400 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri 62

Şekil 4.16. 350^{o}C sıcaklıkta ve 200 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri 63
Şekil 4.17. 350^{o}C sıcaklıkta ve 300 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri 64
Şekil 4.18. 350^{o}C sıcaklıkta ve 400 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri 65
Şekil 4.19. 450^{o}C sıcaklıkta ve 200 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri 66
Şekil 4.20. 450^{o}C sıcaklıkta ve 300 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri 67
Şekil 4.21. 450^{o}C sıcaklıkta ve 400 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri 68
Şekil 4.22. 200 MPa presleme basıncında ve farklı sıcaklık değerlerinde üretilen FDM'lerin XRD grafikleri 69
Şekil 4.23. 300 MPa presleme basıncında ve farklı sıcaklık değerlerinde üretilen FDM'lerin XRD grafikleri 69
Şekil 4.24. 400 MPa presleme basıncında ve farklı sıcaklık değerlerinde üretilen FDM'lerin XRD grafikleri 70
Şekil 4.25. XRD grafiklerinin pik şiddetleri 70
Şekil 4.26. Farklı sıcaklık ve basınçlarda üretilen FDM'lerin kademelerinin sertlik değişimi 72
Şekil 4.27. Farklı sıcaklık ve basınçlarda üretilen FDM'lerin geçiş bölgelerinin sertlik değişimi 73
Şekil 4.28. FDKM'nin artan darbe enerjisi ile darbe hızı ilişkisi 74
Şekil 4.29. FDKM'nin artan darbe enerjisi ile toplam çökme miktarı ilişkisi 75
Şekil 4.30. FDKM'nin max. temas kuvveti ile darbe hızı ilişkisi 75
Şekil 4.31. Farklı darbe enerjilerine bağlı kuvvet-yer değiştirme grafikleri 77
Şekil 4.32. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri 78
Şekil 4.33. farklı darbe hızlarında temas kuvveti-zaman grafikleri 80
Şekil 4.34. Darbe testi uygulanmış numunelerin makro görünütünleri 81
Şekil 4.35. Farklı radyoizotop kaynakları için iletim/kalınlık grafikleri 84
Şekil 4.36. Numunelere ait kütlesel zayıflatma katsayısı - enerji grafiği 85
Şekil 4.37. Farklı darbe durumlarında muhtemel kırılma şekilleri 85
Şekil 4.38. FDM delinmeyen numunelerin ön ve arka kısmından alınan makro resimler (a) PP1 ve (b) PP2 87
Şekil 4.39. FDM delinen numunelerin ön ve arka kısmından alınan makro resimler (a) CP1 ve (b) CP2 88

Şekil 4.40. FDM numunelerin balistik testlerinde kullanılan Al arka plaka 89
Şekil 4.41. FDKM (FK*) delinmeyen numunelerin ön ve arka kısmından alınan
makro resimler (a) PP1 ve (b) PP2 90
Şekil 4.42. FDKM (FK*) delinen numunelerin ön ve arka kısmından alınan
makro resimler (a) CP1 ve (b) CP2.....91
Şekil 4.43. FDKM (FK*) numunelerin balistik testlerinde kullanılan Al arka plaka.....92
Şekil 4.44. FDKM (FK) delinmeyen numunelerin ön ve arka kısmından alınan
makro resimler (a) CP1 ve (b) CP2.....93
Şekil 4.45. FDKM (FK) delinen numunelerin ön ve arka kısmından alınan
makro resimler (a) CP1 ve (b) CP2.....94
Şekil 4.46. FDKM (FK) numunelerin balistik testlerinde kullanılan Al arka plaka.....95

ÖZET

Bu proje çerçevesinde yapılan çalışmada zırh malzemesi olarak kullanmak amacıyla, toz metalurjisi yöntemiyle altı kademesi Al7075 ve B_4C'den ve bir kademesi Al7075 köpükten oluşan yedi kademeli fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzeme (FDKM) üretilerek mekanik, radyasyon geçirgenlik ve balistik özellikleri incelenmiştir. Üretilen FDKM'lerin bir yüzeyi %100 alüminyum köpük, diğer yüzeyi ise fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve %10 -%60 arasında değişen B_4C içerikli altı kademeli kompozit yapıdan oluşmuştur. Matris malzemesi olarak Al7075 serisi Al tozu, köpürtücü madde olarak TiH_2 ve takviye elemanı olarakta B_4C tozları kullanılmıştır. Karıştırılan tozlar farklı sıcaklıklarda (250, 350 ve 450°C) ve farklı basınçlarda (200,300 ve 400 MPa) sıcak presleme yöntemiyle sıkıştırılarak blok numuneler elde edilmiştir. Elde edilen toz metal blok numuneler 750^0C sıcaklıkta köpürtme işlemine tabi tutularak FDKM'ler üretilmiştir. Üretilen FDKM'lerin kademeleri ve kademeler arasındaki arayüzeyin sertlik ölçümleri yapılmıştır. Üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden (FDM) çapraz kırılma (TRS) numuneleri hazırlanarak ASTM B528 standardına göre çapraz kırılma testleri yapılmıştır. Ayrıca düşük hızda darbe enerjilerini belirlemek için FDKM'lerin köpük yüzeylerine ISO 7765 standardına uygun olarak 1.6-6.4 m/s arasında değişen darbe hızlarında darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Uygulanan darbe enerjisi değerleri 10-125 Joule aralığındadır. Deneyler esnasında çapı 25.7 mm olan yarı küresel darbe ucu kullanılmıştır. Numunelerin balistik performansını belirlemek amacıyla MIL-DTL-46063H standardına göre farklı hızlarda 7,62 mm'lik zırh delici mermiler ile hedef üzerine atışlar yapılmıştır. Balistik testler için öncelikle 12,7 mm kalınlığında Al7075/B_4C'den oluşan FDM'lere atışlar yapılmıştır. Daha sonra ise 25,4 mm kalınlığındaki FDKM'lere atışlar yapılarak V_{50} balistik sınır değerleri belirlenmiştir. Al7075 köpükler, FDM ve FDKM'lerin gama ışını geçirgenlik deneyleri Ge dedektörlü gama ölçüm sistemiyle yapılmıştır. Deneylerde gama radyoizotop kaynakları olarak Cs-137 (662 keV), Co-60 (1173 keV) ve Na-22 (1275 keV) radyoizotopları kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların sonucu olarak artan presleme sıcaklığına ve basıncına paralel olarak FDM'lerin kademelerinin sertliğinde artış gözlenmiştir. En yüksek sertlik değerine 450°C sıcaklıkta yapılan deneylerde ulaşılmıştır. 100 J'e kadar olan denemelerde artan darbe enerjisine bağlı olarak absorbe edilen enerjide artış tespit edilmiştir. 125 J darbe enerjisinde 6.4 ms^{-1} darbe hızında FDKM'lerde delinme meydana gelmiştir. FDKM'ler, FDM ve Al7075 köpüğe kıyasla yaklaşık 3.2 kat daha fazla gama ışını zayıflatmıştır. 0 derecelik atışlarda V50 hız limitleri açısından en yüksek balistik performans FDKM'lerin %60 B_4C yüzeyinden yapılan atışlarda elde edilmiştir. 30 derecelik atışlarda ise FDKM'lerin V50 hız limiti MIL-DTL-46063 standardında belirtilen değerden yaklaşık %7 daha yüksek değer elde edilmiştir.

ABSTRACT

In the study of this project, seven stage functional graded foam material (six stage of it consist of Al7075 and B_4C, and one stage of it consists of Al7075 foam) was produced with the method of powder metallurgy to use as armour material and mechanics, radiation permeability and ballistic features of it was analyzed. One surface of produced FDKMs consists of %100 aluminium foam and the other surface consists of seven stage composite form containing B_4C which is graded functionally and changes between %10 -%60. Al7075 group Al powder as matrix material, TiH_2 as foaming material and B_4C powder as reinforcing elements were used. Mixed powder was pressed with hot pressing method at different temperatures (250, 350 and 450°C) and different pressures (200,300 and 400 MPa) and block samples were obtained. Produced powder metal block samples were foamed at 750^0C and FDKMs were produced. The stages of produced FDKM and hardness measurements of interface between stages were conducted. Cross-breaking samples (TRS) were made of produced functional graded materials (FDM) and cross-breaking tests were done according to the standards of ASTM B528. Moreover, in order to identify impact energy at low speed, impact tests changing between 1.6-6.4 m/s were performed to foam surfaces of FDKM according to the standards of ISO 7765. Performed impact energy values is between 10-125 Joule. During the experiments, 25.7 mm diameter of hemispherical impact point was used. With the aim of identifying ballistic performances of blocks, shootings were carried out with 7,62 mm armour piercing shell at different speed according to the standards of MIL-DTL-46063H. Principally shootings were done to 12,7 mm-thick FDM consisting of Al7075/B_4C for ballistic tests. Then, shootings were done to 25,4 mm-thick FDKM and V_{50} ballistic limit values were determined. Gamma ray permeability experiments of Al7075 foam, FDM and FDKM were done with Ge detectored gamma measuring system. As gamma radioisotope resources, Cs-137 (662 keV), Co-60 (1173 keV) ve Na-22 (1275 keV) radioisotopes were used in the experiments. As a result of experimental studies, an increase in the hardness of the stages of FDMs was observed with increasing pressing temperature and pressing pressure. The highest hardness value was reached in experiments at 450°C temperature. An increase in the absorbed energy due to the increase in impact energy was detected in the low velocity impact tests applied to FDKMs up to 100 J., FDKMs were perforated at 125 J impact energy and 6.4 ms -1 impact rate. In experiments with Cs-137 (662 keV) radioisotope source, FDKMs attenuated about 3.2 times more gamma rays than FDM and Al7075 foam. The highest ballistic performance in terms of V50 speed limits was obtained at shoots (0 degree) made from 60% B4C surface of FDKMs. At 30 degree shoots, the V50 speed limit of the FDKMs was about 7% higher than the value specified in the MIL-DTL-46063 standard.

1. GİRİŞ

Savunma sanayisindeki teknolojilerin ülkeler arası değişen politik ortamlarda para karşılığında bile temini güç olduğu dikkate alındığında ülkemizin zırh malzemesi üretim teknolojisine sahip olması ve sürekli olarak iyileştirme AR-GE çalışmalarının yapılması büyük önem taşımaktadır. Vizyon 2023 Projesi Savunma, Havacılık ve Uzay Sanayii Panel raporunda, küreselleşme akımıyla şekillenen dünya ekonomik düzeninin etkin bir oyuncusu olabilmek için ürün ve hizmetlerde küresel ölçekte rekabetçi olabilmek; bunun için de; yenilikler yapma, yeni ürünler ve yeni teknolojiler üretme yeteneğine sahip olma gerekliliği, yurtiçinde özgün teknoloji ve ürün geliştirme hedefinin desteklenmesi, savunma sanayisinde kendi ulusal teknolojimizin geliştirilmesinin önemi vurgulanmaktadır. Çünkü Savunma Havacılık ve Uzay sanayi sektörü uluslararası serbest ticaret antlaşmalarının kapsamı dışındadır ve devletlerin desteklerine açıktır. Gelişen teknoloji ile birlikte saldırılarda balistik etki ile birlikte kimyasal saldırı amaçlı tehditleri bir arada bulunduran silahlar kullanılmaktadır. Yer üstünde veya yeraltında inşa edilen özel sığınaklar, savunma ve saldırı amaçlı askeri araçlar radyoaktif serpinti etkilerine, kimyasal ve biyolojik harp maddelerine, nükleer silahların zayıflamış basınç ve ısı tesirlerine ve konvansiyonel silahların parça tesirlerine karşı korunmak amacıyla sürekli olarak geliştirilmek zorundadır.

Zırh tasarımlarında tehdidin türüne ve şiddetine bağlı olarak genellikle çelik matrisli veya güçlendirilmiş Al matrisli yapılar kullanılmaktadır. Özellikle Al7xxx serisi alaşımlar hafifliğin arandığı kullanım alanlarında tercih edilen zırh malzemeleri olmuştur. Yüksek şiddette çarpma ya da patlamalara karşı Al7xxx serisi alaşımların çelik zırhlar kadar dayanım sergileyemedikleri bilinmektedir. Çelikler, çok büyük teknolojik özelliklere sahip olduğu ve nispî olarak ucuz üretilebildiği için uzun zamandan beri zırh uygulamalarında büyük ölçüde kullanılmaktadır. Ayrıca çeliklerin çok üstün mekanik özelliklere sahip oldukları bilinmektedir. Ancak çelikler yüksek yoğunluğa sahip oldukları için zırhlarda kullanımı ağırlığın kritik olduğu durumlarda uygun değildir. Çelik zırhların yüksek yoğunluk dezavantajından dolayı araştırmacılar, koruma sistemlerinde tatmin edici derecede korumayı sağlayan hafif zırh malzemeleri için yeni malzemeler üzerinde araştırmaya yönelmiştir.

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, seramik ön tabaka ve metal veya kompozit takviye tabaka içeren ‘Tabakalı Kompozit’ zırhların, sahip oldukları balistik dayanım, çeliklerle kıyaslandığında ağırlık/dayanım açısından oldukça cazip özellikler taşıdığı anlaşılmıştır. Kompozit zırhlarda, seramik plaka kırılarak mermiyi aşındırır ve lokal basıncı azaltarak koni şeklini almak suretiyle mermi yüzeyindeki teması artırmaktadır. Metalik veya kompozit

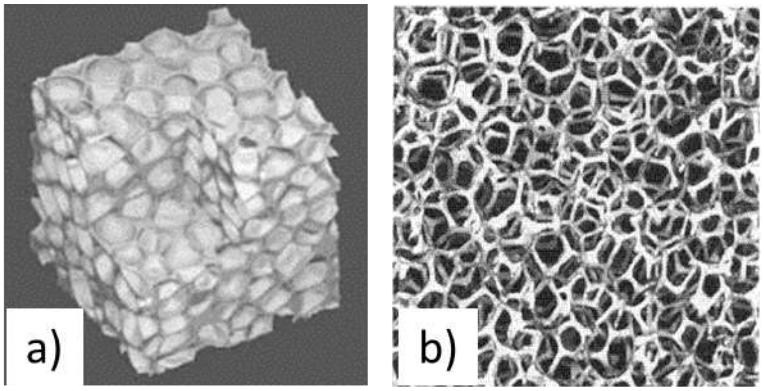
malzeme seramik parçacıkları ile desteklenerek merminin kinetik enerjisini absorbe eder. Seramikte kırılma işlemi merminin enerjisinin çok küçük miktarını (~ %0.2) absorbe ederken, büyük bir miktarı (% 20-40) arka plakanın deformasyonu esnasında absorbe edilmektedir. Kinetik enerjinin geriye kalanı (%10-15) merminin deformasyonunda harcanır. İntegral zırh malzemelerinin üretiminde seramik plakalar ile destek plakaları epoksi yapıştırıcılar ile birleştirilmektedir. Bu durumda zırh malzemesine mermi çarptığında ara yüzeyde meydana gelen şok dalgaları plakalarda ayrılmalara neden olmaktadır.

Literatürde balistik, patlama ve radyo aktif tehditlere karşı tek bir malzemenin kullanımından çok zırhlar tehdite göre (balistik tehdit, radyoaktif tehdit, kinetik enerjili veya kimyasal enerjili tehdit) sınıflandırılmış olup araştırmacılar tek bir tehdite göre incelemeler yapmışlardır. Bu tehditlere karşı Al7xxx serisi malzemelerin hafifliğinden faydalanılırken yüksek dayanıma ve sertliğe sahip B_4C parçacıklarıda zırh malzemesinin aşınma direncini önemli ölçüde artırmaktadır. Balistik performans açısından zırh malzemelerinin delinme mekanizması büyük ölçüde zırh sertliğine bağlıdır ve sert zırhlar mermi şeklini değiştirebilir. Ayrıca B_4C'nin yüksek nötron absorbesinden dolayı (760 barn at neutron velocity of 2200 m/sec) nükleer endüstrisinde önemli bir malzeme olduğu da bilinmektedir. Tahribat mühimmatları hedefte hasarı ya parça tesiri ile ya da yüksek basınçlı patlama tesiri ile meydana getirmektedir. Farklı türlerde kombine edilmiş Al köpük yapılar ise hafifliği, titreşim ve enerji sönümleme kabiliyetleri ile çeşitli tehditlere karşı (özellikle basınçlı patlama) performans sergilemiş yapılar olarak bilinmektedir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Metalik Köpükler

Metalik köpükler; odun, mercan ve sünger gibi hücreli yapıların bir türüdür. Doğal bir ürün değildir. Köpükten daha ziyade sünger şeklinde açık gözenekli yapıya sahip olmalarına rağmen genellikle “metalik köpük” şeklinde ifade edilir. Gözenekli yapı şeklini alabilmesi için farklı fonksiyonel malzemeler kullanılır (Davies ve Zhen 1983). Alüminyum, demir ve nikel gibi mühendislik alaşımları değişik üretim teknikleri kullanılarak farklı yoğunluklarda köpürtülebilir (Stöbener vd. 2008). Üretim tekniğine bağlı olarak açık gözenekli veya kapalı gözenekli yapıda metalik köpükler elde edilebilir (Banhart, 2001). Şekil 2.1’de açık ve kapalı gözenekli metalik köpük örnekleri gösterilmiştir. Alüminyum esaslı köpükler yüksek sağlamlık ve dayanım, iyi korozyon direnci, birbirine benzer ve homojen dağılımlı gözenek yapısında üretilebilmelerinden dolayı metalik köpükler arasında en fazla çalışılan ve en önemli köpüklerdir (Banhart, 2001).



Şekil 2.1. a) Kapalı gözenekli b) Açık gözenekli metalik köpük (Davies, ve Zhen 1983; Stöbener vd. 2008; Banhart, 2001).

Metalik köpüklerle ilgili çalışmaları Sosnik 1948 yılında, alüminyum içinde civa buharlaştırarak yapmıştır (Drolet, 1977). 1950’lerde sıvı metallerin, önceden viskozite artırıcı işlemden geçtiklerinde çok daha kolay köpükleştirilebileceğinin anlaşılmasıyla daha kolay üretim yöntemleri geliştirilmeye başlanmıştır. Daha sonra Elliot 1951 yılında bu çalışmayı tekrarlayarak alüminyum köpük üretmiştir. Bu çalışmaya göre, ergiyik metale köpürtücü madde ilave edildikten sonra ergiyik metal içindeki gazın ayrışarak bileşenlerden birinin gaz haline geçmesi için ısıtılmakta ve oluşan gaz gözenek oluşturarak metalin köpürmesine neden olmaktadır. Köpürme işleminden sonra elde edilen madde, katı köpük yapısını oluşturmak amacıyla soğutulmuştur.

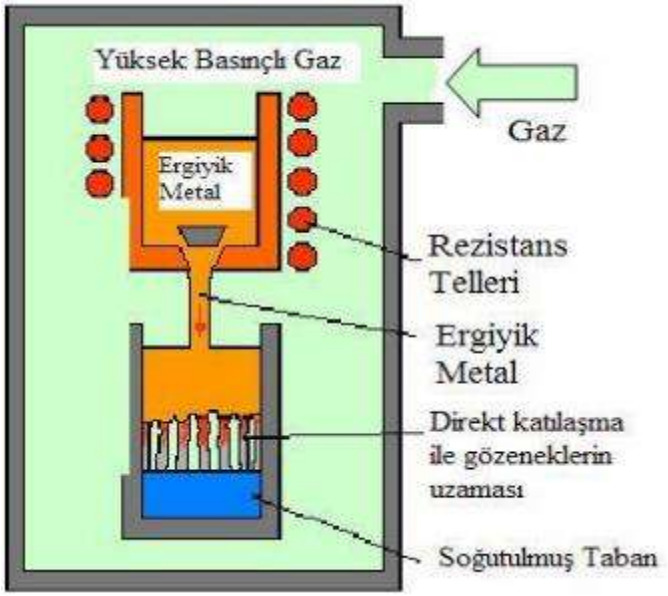
1980'lerin sonunda ise metalik köpük araştırmaları tüm dünyada yeniden canlılık kazanmıştır. Shinko Wire adlı şirketten Japon mühendisler, bugün "Alporas işlemi" olarak bilinen yöntemi geliştirmişlerdir (Kulkarni ve Ramakrishnan, 1973). 1990 yılında, Alman fizikci Joachim Baumeister, 1950'li yıllarda Benjamin Allen'in geliştirdiği sıkıştırılmış toz köpükleştirme yöntemini yeniden incelemeye başlamıştır.

2.2. Metalik Köpük Üretim Yöntemleri

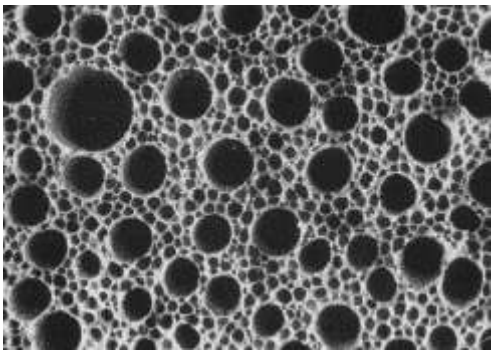
2.2.1. Katı-gaz ötektik katılaşma yöntemi

Katı-gaz ötektik katılaşma yöntemi, hidrojen gazı yardımı ile ötektik sisteme sahip bazı metalik yapıları köpürtmek için kullanılmıştır (Banhart, 2001). Elde edilen köpüklerin gözenek yapısı açık gözenekli yapılardır. GASAR diye adlandırılan bu yöntemde, metal üst kısımdaki tank içerisinde ergitilir. Haricen düzenek içerisine gönderilen hidrojen gazı ergiyik metal tarafından emilir. Emilen hidrojen gazı metali bozunmaya uğratarak, sıvı durumdaki metal içerisinde gaz kabarcıkları oluşturur. Sıvı metal içerisinde mevcut olan hidrojen gazının çözme etkisi haricen uygulanan basıncın artması ile artar. Gazı sönümlemiş olan ergimiş sıvı, alt kısmı soğutulmuş olan başka bir tank içerisine aktarılır. Sıvı durumdaki metal, tankın soğutulmuş olan tabanından yukarı dogru ilerleyerek katılaşır. Düzeneğin hemen hemen her kısmı kontrol edile bilen basınç altındaki gaz ile sarılmıştır. Tipik katılaşma hızı 0,05 mm/s' ile 5 mm/s kadardır. GASAR yönteminin şematik gösterilişi Şekil 2.2'de verilmiştir.

Bu yöntem ile üretilen metalik köpüklerin gözenekleri katılaşmaya paralel olarak şekillenir ve genel olarak küresel şekillidir. Gözenek şekli ve ebatları, kullanılan metal ve alaşımların kimyasal bileşimine, eriyik sıcaklığına, gaz basıncı ve soğutma hızına bağlı olarak kontrol edilebilir. Kullanılan yöntem ile köpük üretiminde alüminyum, nikel, bakır, demir, magnezyum ve çeşitli alaşımlar kullanılmıştır. Gözenek çapları 10 μm ile 10 mm arasında, gözeneklilik oranı ise %5-75 arasındadır (Banhart, 2001). Oluşan gözeneğin tipi genellikle yuvarlak ve dağılımı ise homojendir (Şekil 2.3).



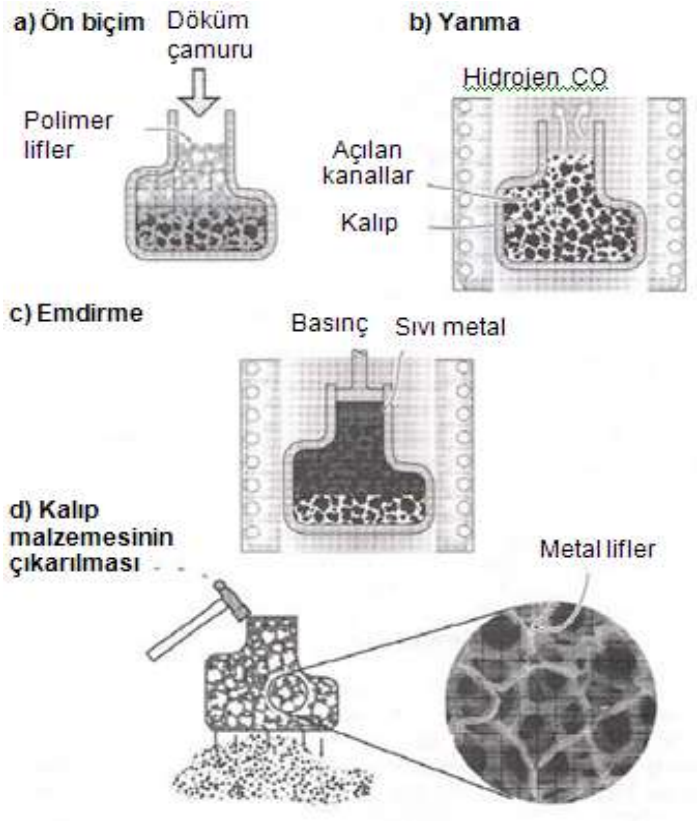
Şekil 18.2. Açık gözenekli metalik köpüğün GASAR yöntemi ile üretimi (Banhart, 2003).



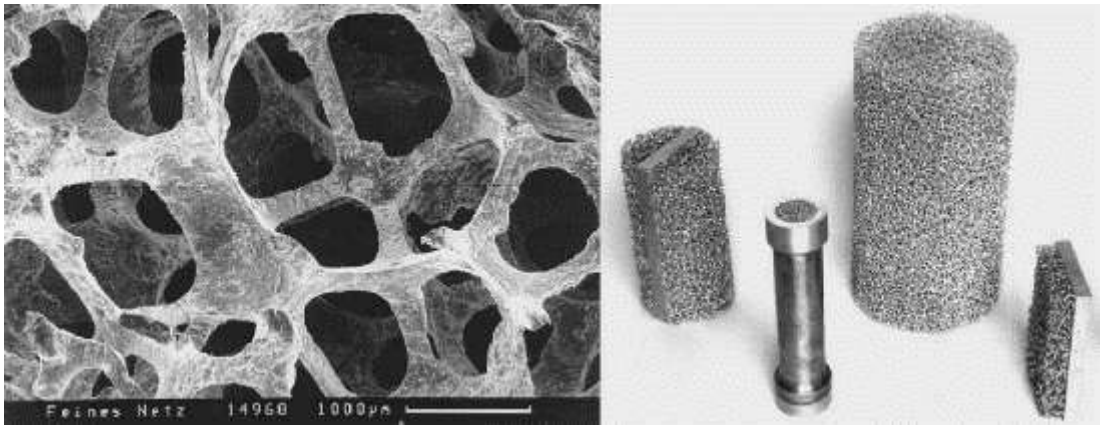
Şekil 2.19. GASAR yöntemi ile üretilmiş köpüğün gözenek yapısı (Banhart, 2001).

2.2.2. İnfiltrasyon yöntemi

Hassas döküm yöntemi açık gözenekli köpüklerin üretim yöntemidir. Bu yöntem infiltrasyon olarak adlandırılır ve DUOCEL yöntemi olarak bilinir. Ergiyik metal bir tür katı kalıp içerisine dökülür ve gözenek şekli kalıpla oluşturulur. Metalik köpük üretimi için istenilen gözenek ebadı ve relativ yoğunlukta açık gözenekli polimer model hazırlanır. Daha sonra bu model kuma gömülür ve kurutulduğu zaman döküm kalıbı çamuru ile kaplanır. Kalıp polimer modeli ayrıştırmak ve döküm malzemeyi katılaştırmak için fırın içerisinde pişirilir. Sonuç olarak kalıp soğutularak metal alaşımı ile doldurulur. Soğutulduktan sonra orijinal polimer köpüğe benzeyen metal köpük ayrıştırılarak alınır (Amjad, 2001). Şekil 2.4'te infiltrasyon yöntemi ile köpük üretimini şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 2.5' te ise bu yöntemle üretilen köpüğün elektron mikroskop (SEM) görüntüsü ve bu yöntemle üretilen bazı parçalar gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Hassas döküm yöntemi (*DUOCEL* yöntemi) (Amjad, 2001).

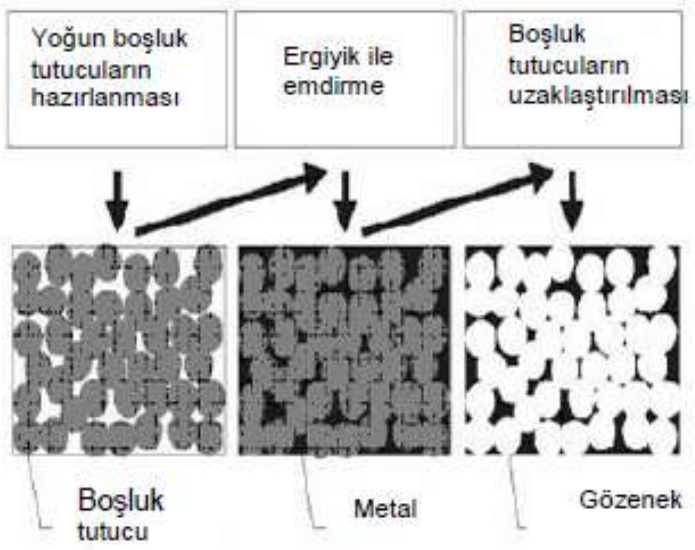


Şekil 2.21. a) *DUACEL* köpüğün SEM görüntüsü (Banhart, 2001), b) Hassas döküm ile yapılmış bazı parçalar (Hintz vd., 1999)

2.2.3. Boşluk tutucu malzemelerin etrafına hassas döküm

Metalik köpükler inorganik hatta organik tanecikler veya küreler etrafına sıvı metal dökümü yoluyla üretilebilir. Tanecikler ya dökümden sonra metalik ürün olarak kalmakta ya da uygun bir çözücü veya asitle çıkarılmaktadır. Yöntem Şekil 2.6'da şematik olarak gösterilmiştir. Bu

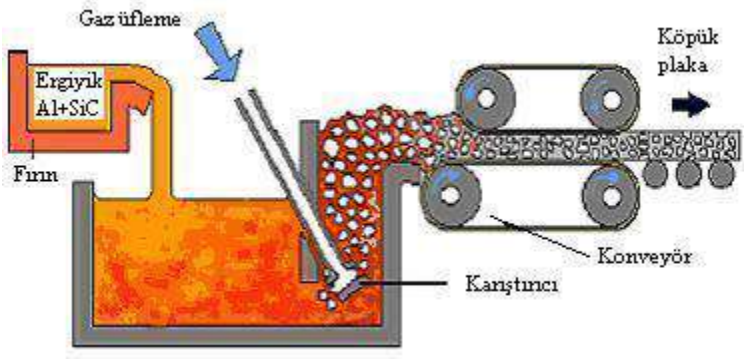
yöntemin en önemli avantajı, verilen dolgu taneciklerinin boyut dağılımı ile gözenek boyutu dağılımının kontrol edilebilmesidir. Öte yandan, bu yöntem ile elde edilen maksimum gözeneklilik oranı %80 ile sınırlıdır (Banhart 2001).



Şekil 2.22. Boşluk tutucu kullanılan üretim yöntemi (Banhart, 2000).

2.2.4. Erğiyik metal içerisine gaz enjektesi

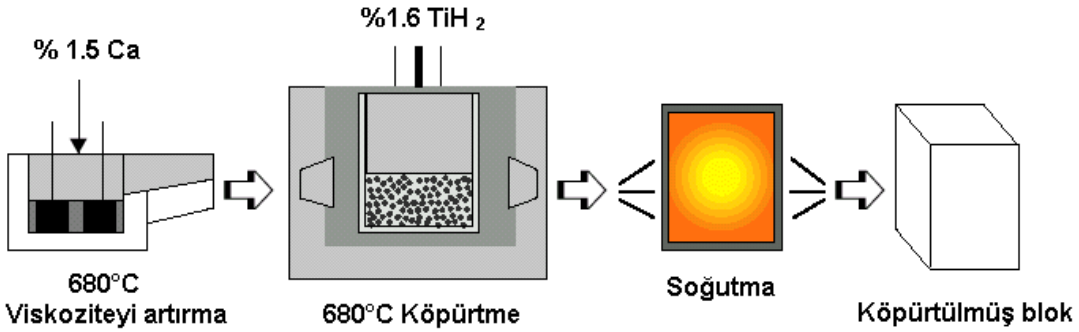
Bu yöntem Hydro Aluminium (Norveç) ve Cymat Aluminium (Kanada) firmaları tarafından güncel bir şekilde kullanılan yöntemdir (Wood, 1997). Bu yöntemde silisyum karbür, alüminyum oksit ya da magnezyum oksit parçacıkları ergiyik viskozitesini artırmak için kullanılır. Bundan dolayı üretim aşamasında ilk adım bu ergiyiğin hazırlanmasıdır. İkinci adım hazırlanmış ergiyik içerisine özel bir pervane veya titreşim nozulu yardımıyla gaz (hava, azot, argon) enjekte edilmesidir. Böylece ergiyik içerisinde homojen olarak dağılmış çok ince gaz baloncukları oluşur. Balonların ve ergiyik metalin oluşturduğu karışım daha sonra bir konveyör yardımıyla çekilerek soğumaya bırakılır (Şekil 2.7).



Şekil 2.23. Gaz enjeksiyonla doğrudan köpürtme işlemi (Banhart 2001).

2.2.5. Erğiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi

Ergiyik içerisine köpürtücü madde ilave edilerek metal köpük üretimi, gaz enjekte edilerek yapılan üretime alternatif olarak geliştirilmiş bir yöntemdir (Miyoshi vd. 2000; Babcsan vd. 2005). Bu yöntemde, ergiyik içerisine gaz enjekte etmek yerine direkt olarak TiH2, ZrH2 ve CaCO3 gibi köpürtücü madde ilave edilerek köpürtme yapılır (Shapovalov, 1993). Köpürtücü madde etkili sıcaklıkta çözünerek gaz açığa çıkarmakta ve köpük oluşumunu sağlamaktadır. Şekil 2.8'de ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile metalik köpük üretimi şematik olarak gösterilmiştir (Shapovalov, 1993). Japonya'da Shinko Wire Company şirketi 1986 yılından beri bu yöntemi kullanmakta ve günde 1000 kg üzerinde üretim yapmaktadır. Yöntemin ticari adı ALPORAS olarak bilinmektedir (Miyoshi vd. 2000).



Şekil 2.24. Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile köpürtme (Shapovalov, 1993).

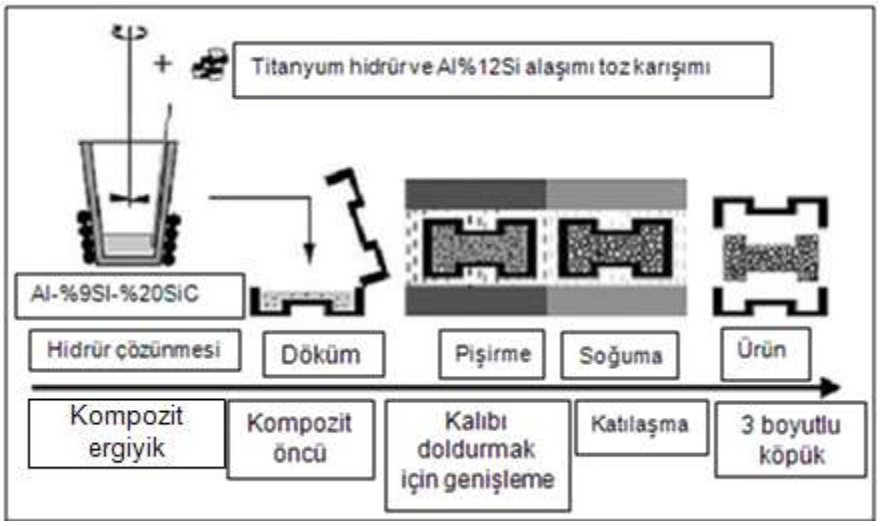
Bu üretim yöntemi iki aşamadan meydana gelir. İlk aşamada köpürtülecek metal veya alaşım atmosfer ortamında ve sabit sıcaklıkta ergiyik hale getirilir. Bu esnada viskoziteyi ayarlamak için belli oranlarda Ca, Al_2O_3, kalsiyum-alüminyum oksit ($CaAl_2O_3$) veya kalsiyum oksit (CaO) ergiyik içerisine ilave edilerek belli bir hızda ve belli bir süre karıştırılır. İkinci aşamada ise viskozite istenilen değere ulaştığında ergiyik içerisine, köpürmeyi sağlamak üzere parçacık şeklindeki köpürtücü madde (TiH_2, $CaCO_3$) ilave edilir. İlave edilen TiH_2 ve $CaCO_3$ aşağıdaki şekilde (Eşitlik 2.1, Eşitlik 2.2) ayrışarak H_2 ve CO_2 gazı açığa çıkarır. Açığa çıkan gaz köpürmeye neden olur.

$$TiH_2 + Isı \rightarrow Ti_{(k)} + H_{2(g)} \quad (2.1)$$

$$CaCO_3 + Isı \rightarrow CaO + CO_2 \quad (2.2)$$

2.2.6. Sıvı metal yoluyla köpük üretimi (FORMGRIP)

Bu yöntem, Foaming of Reinforced Metal by Gas Release In Precursor kelimelerinin baş harfleri kullanılarak adlandırılmıştır (Amjad, 2001). İşlemin ilk aşamasında titanyum hidrür (TiH2) tozları ısıl işleme tabi tutulmaktadır. Böylece yüzeyde titanyum oksit film tabakası oluşumu sağlanır (sadece hidrojen geçirgenliği ile sınırlı) ve bu tabaka çözünmeyi geciktirici bir bariyer rolü oynar. Daha sonra hidrür ergiyik alüminyumla karıştırılır. İkinci aşamada ise karışım titanyum hidrürün hidrojen gazı salıp çözünmesi için ısıl işlem uygulanarak köpükler elde edilebilir (Şekil 2.9).

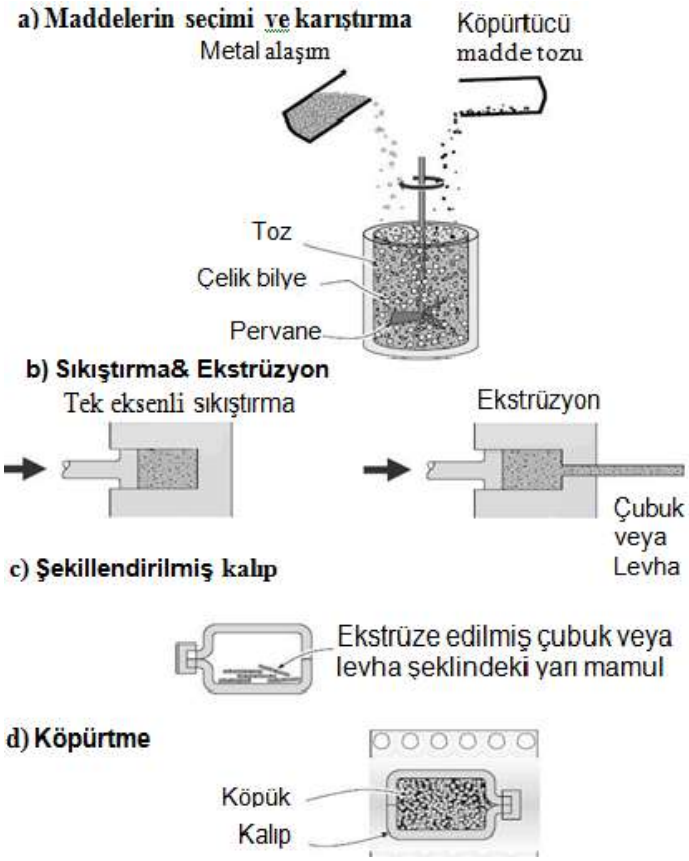


Şekil 2.25. FORMGRIP yönteminin şematik gösterimi (Gergely ve Clyne, 2000).

2.2.7. Toz metalurjisi yöntemi

Toz metalurjisi (TM) yöntemi ile metalik köpük üretimi Allen ve arkadaşları tarafından çalışılmış ve patenti alınmıştır (Prakash vd., 1995). IFAM'da (Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials) metalik köpükler, önceden hazırlanmış metal tozlarından üretilmektedir (Sang vd., 1998). Köpürtücü madde ile metal tozlarının (saf metal tozları, alaşım tozları veya metal toz karışımı) karıştırılmasıyla işleme başlanır (Şekil 2.10). Daha sonra metal toz ve köpürtücü madde karışımı preslenir ve yarı mamul bir madde hâline getirilir. Bu yönteme örnek olarak tek eksenli veya izostatik sıkıştırma, ekstrüzyon ve toz haddeleme verilebilir. Üretimde çok dikkatli olmak gerekir. Çünkü artan gözenekler ve diğer hatalar, kalitesiz ürün oluşmasına sebep olur. İkinci aşamada numune matris malzemenin ergime noktasına yakın bir sıcaklığa ısıtılır. Köpürtücü madde, ergimeye

başlayan malzemeden ayrışır ve gaz çıkışı olur. Bu gaz çıkışı ergiyik metalin genişlemesine ve oldukça gözenekli bir şekle dönüşmesine sebep olur.



Şekil 2.26. Toz metalurjisi ile köpük üretiminin şeması (Zhao ve Sun, 2001)

Bu metot alüminyum ve alaşımlarıyla sınırlı değildir. Kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve diğer bazı metal ve alaşımları, işlem parametreleri ve köpürtücü maddelerle ayrıştırılarak metalik köpük elde edilebilir. Köpürtücü madde olarak TiH_2 ve ZrH_2 gibi metal hidrürlerin yanında karbonatlar (kalsiyum karbonat, potasyum karbonat, sodyum karbonat ve sodyum bikarbonat), hidratlar (alüminyum sülfat hidrat, alüminyum hidroksit) veya hızlıca buharlaşan maddeler (cıva bileşikleri veya pulverize edilmiş organik maddeler) kullanılmaktadır. Kalsiyum hidrür, kalsiyum-magnezyum karbonat, kalsiyum sülfat, demir sülfat, kurşun karbonat, kurşun oksit ve sodyum nitrit gibi diğer alaşımlar ise bazı sıcaklık ve basınç şartları altında kullanılabilir (Banhart, 2001). Toz metalurjisi yöntemi ile metalik köpük elde etmek, her biri ayrı birer araştırma konusu olabilecek beş aşamadan oluşur (Ashby vd., 2000). Bu aşamalar aşağıda kısaca verilmiştir.

Karıştırma: Karışımın yapılması için metal tozuyla gaz oluşturacak köpürtücü madde tozları belli oranlarda hazırlanır. Hazırlanan tozlar homojenliği sağlamak için karıştırılır. Karıştırılan

tozlar kalıp içerisine konularak preslenir. Karıştırma yapılmadan presleme işlemi yapılırsa, toz karışımı köpürtücü madde ve içerisinde köpürtücü olmayan metal tozlarından oluşacaktır. Köpürtmeden sonra bu köpükler yoğun veya daha az gözenekli bir içyapıya sahip olacaktır.

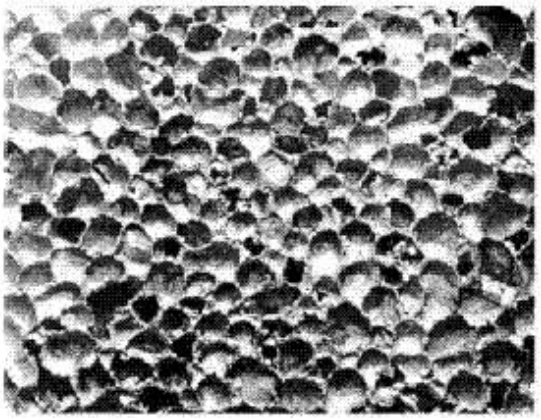
Gözenek Oluşumunun Başlangıcı: Preslenerek tablet haline getirilen karışım, fırın içerisine yerleştirilir. Fırın sıcaklığının artmasıyla, köpürtücü madde içerisindeki gaz ayrışırak gözeneklerin çekirdeğini oluşturur. Köpürtücü maddenin ayrıştığı ve alaşımın ergidiği sıcaklık değerlerine bağlı olarak çekirdek oluşumu, katı, yarı katı ya da sıvı hâlde gerçekleşebilir.

Gözeneklerin Büyümesi: Ayrışmakta olan köpürtücü maddeden çıkan gazın sürekliliği sayesinde çekirdekler büyür ve bir araya gelerek köpüğü oluşturur. Gözenek boyutu belli bir büyüklüğe gelince ısıtmanın durdurulması gerekmektedir. Isıtmanın devam etmesi gözeneklerde çökmenin meydana gelmesine neden olur.

Katılaşma: Hızlı soğutma, gözeneklerin bozulmasına ya da gözenek duvarlarında çatlaklar oluşmasına neden olabilir. Çok yavaş soğutma kararsız durumdaki köpüğün çökmesine sebep olur. Bu durumu önlemek için, metalin uygun zamanlama ve uygun hızda katılaştırılması gerekir. Gözeneklerdeki çökmeyi engellemenin bir diğer yolu ise viskoziteyi artırmaktır. Zaten ticari işlemlerde kullanılan maddelerin en önemli rolü viskoziteyi artırmaktır. Viskoziteyi artıran katkı maddeleri genellikle homojen dağıtılmış ve sıvının içinde katı olarak kalan oksitler veya karbürler gibi metal olmayan parçalardan oluşur.

Yarı mamul parçaların tam genişlemesi için gerekli olan zaman, sıcaklığa ve numunenin boyutuna bağlı olup birkaç saniye ile birkaç dakika arasında değişir (Davies ve Zhen, 1983). İşlem parametrelerine dikkat edildiğinde elde edilen gözenek yapısı Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Metalik köpüklerde, köpürtücü madde olarak TiH_2 kullanıldığı Al köpüklerde, köpüğün yoğunluğu alüminyum yoğunluğu ile orantılıdır. Bu orantı kullanılan tozların ağırlıkları ölçülerek yapılır. Al ve alaşımlarının köpürtülmesinde kullanılan köpürtücü madde miktarının % 0,5-2,5 gibi düşük olduğu bulunmuştur (Banhart 2001; Zhao ve Sun 2001).

Köpürtme işlemi, belli bir sıcaklıkta ve belli bir süre sonra kesilirse belli bir yoğunluk elde edilecektir. Köpürtme işlemine devam edilirse daha düşük yoğunluk hatta köpükte çökmeler görülecektir. Bu durumda gözenek yapısı bozulacaktır.

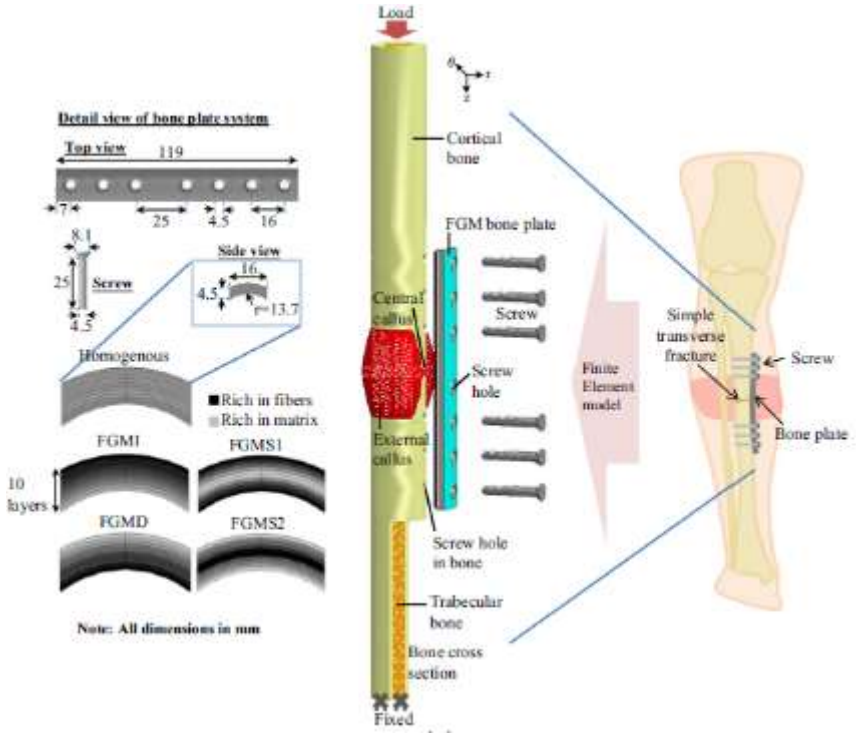


Şekil 2.27. TM yöntemi ile üretilmiş Al köpüğün gözenek yapısı (Banhart ve Baumeister, 1998).

2.3. Fonksiyonel Derecelendirilmiş (FDM) Metalik Köpükler

Saf metaller gelişen mühendislik uygulamalarında dar bir kullanım alanına sahiptir çünkü değişken talepleri karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Teknolojik gelişmelere paralel olarak artan ve değişen ihtiyaçların karşılanabilmesi için malzemelerde kademeli veya değişken (heterojen) yapılara ihtiyaç duyulmuştur. Son yıllarda katmanlı veya kademeli yapılara örnek olarak fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelere (FDM) sıklıkla rastlanmaktadır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler kavramı 1984 yılında bir grup Japon bilim insanı tarafından ortaya çıkarılmıştır (Zhang ve Zhang, 2013). Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerde fiziksel ve kimyasal olarak birbirlerinden farklı özellikler taşıyan iki madde arasında faklı ısıl genleşme katsayılarından dolayı oluşan ısıl gerilmeler derecelendirilmiş yapılarıyla azaltılır, iki malzeme arasında ani değişmelerden dolayı meydana gelebilecek olumsuzluklar minimize edilebilir (Mahamood vd., 2012; Taheri vd., 2014).

Başta yüksek sıcaklık uygulamaları olmak üzere, uzay araçları, elektronik endüstrisi ve özellikle son yıllarda medikal uygulamalarda FDM yapılar sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 2.12'de fonksiyonel derecelendirilmiş bir yapının insan vücudunda kullanım yerlerinden birisi gösterilmiştir (Mehboob ve Chang, 2014).



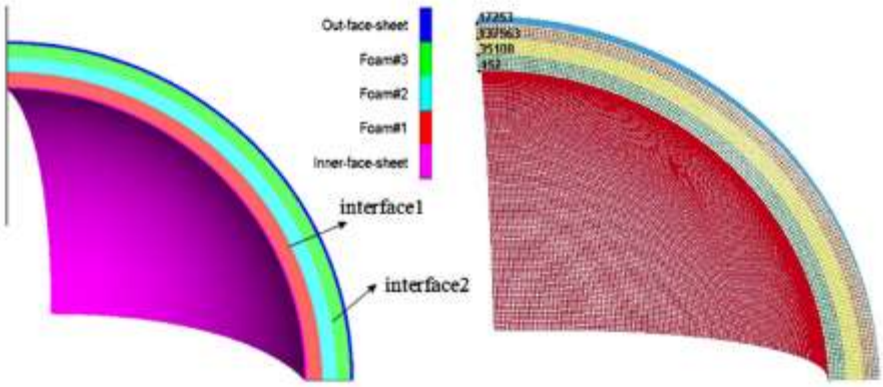
Şekil 2.28. FDM yapının insan vücudunda kullanımı (Mehboob ve Chang, 2014)

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler ihtiyaç duyulan tasarıma bağlı olarak farklı yöntemler ile üretilebilirler. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretiminde geniş bir alanda malzeme kullanımına olanak sağladığı için toz metalurjisi yöntemi dikkat çekmektedir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretiminde kullanılan toz metalurjisi yöntemi birkaç temel adımdan oluşmaktadır. İlk adımda tozları ön tasarıma göre tartma ve karıştırma vardır. Bir diğer adımda ise karışım tozları önceden şekli belirlenmiş kalıp içerisine uygun şekilde dağıtma ve devamında istifleme-sıkıştırma bulunmaktadır. İmalatın son safhasında ise tam yoğunluğa ulaşmak için sinterleme yapılmaktadır (Mahamood vd. 2012; Zhu vd., 2001; Nemat-Alla vd., 2011).

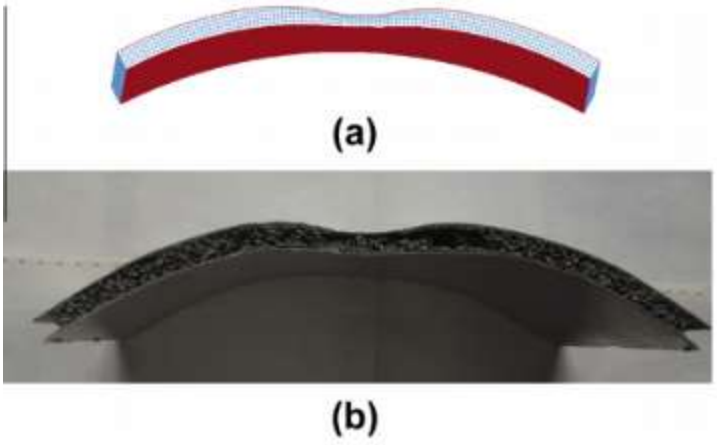
Hücresel malzemeler ve köpük yapılar çeşitli mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulama alanları içerisinde özellikle hafifliğin ve enerji absorbesinin gerekli olduğu alanlar gelmektedir (otomotiv sektörü köpük yapıların kullanımında önemli bir yer tutmaktadır). Köpük yapıların enerjisi sönümleme özellikleri ile alakalı literatürde birçok çalışma mevcuttur (Reglero vd., 2011; Shiomi vd., 2010; Esmaeelzadeh vd., 2006). Bir insan kemiği veya bir bitkinin sapı gibi doğada karşılaşılan hücresel malzemeler fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli yapılara örnek olarak gösterilebilir (Zhang ve Zhang, 2013). Fonksiyonel derecelendirilmiş köpükler yüksek enerji sönümleme kabiliyetlerinden dolayı son yıllarda araştırmacıların yoğun ilgisine mazhar olmaktadır (Cui vd., 2009a; Cui vd., 2009b).

Fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzemeler bulk FDM yapıların bir türüdür ve son yıllarda bu alanda önemli gelişmeler meydana gelmiştir. Bu gelişmelere bağlı olarak polimer ve metallik köpüklerin laboratuvar şartlarında çeşitli türleri derecelendirilmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş Polimer köpükler ile karşılaştırıldıklarında derecelendirilmiş Alüminyum köpüklerin daha yüksek mukavemet, ısıl dayanım ve yüksek enerji emilimi sağladığı bildirilmiştir. Fakat Alüminyum matrisli fonksiyonel derecelendirilmiş köpüklerin üretiminde çeşitli problemlerin olduğu ve sorunların araştırmaya açık olduğu rapor edilmiştir (Stöbener vd., 2008; Gupta, 2007, Chittineni ve Woldesenbet, 2010).

Shiqiang ve arkadaşları farklı yoğunluğa sahip Al köpükler kullanarak fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç köpük yapılar üretmişlerdir (Şekil 2.13, Şekil 2.14). İki levha arasında farklı yoğunluklara sahip köpük yapılar değişik kombinasyonlarda yerleştirilmiş ve mekanik performanslar değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmada köpük yapının derecelendirilmesi değiştikçe mekanik özelliklerin değiştiği tespit edilmiştir (Shiqiang vd., 2014).



Şekil 2.29. Derecelendirilmiş sandviç yapıların modeli (Shiqiang vd. 2014)



Şekil 2.30. Deney numunesine ait görüntü (Shiqiang vd. 2014)

2.4. Balistik

Atış bilimi olarak da bilinen balistiğin kökeni Fransızcadaki “balistique” kelimesinden gelmektedir. İlk olarak 1800’lü yıllarda ortaya çıkan balistik bilimi mermi ve füzelerin hareketini inceleyen bir bilim dalıdır. Bu alanın ortaya çıkmasının en önemli sebebi; silah, mermi ve zırh teknolojisinin oldukça gelişmesine bağlı olarak bunların birbirleriyle olan etkileşimlerinin farklı açılardan incelenmesine duyulan ihtiyaçtır. Balistik genel olarak merminin namludan çıkıp hedefe ulaştığı süreçteki zaman diliminde meydana gelen değişimleri ve etkileri incelemektedir. Bu süreç üç ana başlık altında ele alınmaktadır (Özgültekin, 2012).

1) İç Balistik: Merminin namludan çıkmadan ve çıktığı andaki durumların incelendiği, süreci kapsamaktadır.
2) Dış Balistik: Merminin namludan çıkıp hedefe ulaştığı zaman dilimindeki uçuş hareketini araştıran bilim dalıdır.
3) Terminal Balistik: Merminin hedefe ulaştığı ilk andan itibaren meydana gelen çarpışma, delme ve bunların mekanizmalarını inceleyen bir alandır.

<u>İç Balistik</u>

İç balistik mekanizmasında balistik prosesi daha çok kimyasal açıdan ele alınmaktadır. Namlu içinde barutun yanma şekli, elde edilen basıncın hızı, kimyasal enerjinin kaynağı, gazın genişlemesi, namlu boyunca merminin hızı, açığa çıkan enerjinin kontrolü ve yönlendirilmesi gibi durumlar iç balistik çalışmaları sayesinde tespit edilmektedir. İç balistik bilimindeki parametreleri dört ana başlık altında toplamak mümkündür.

1. Koçan (Yanma Odası) Özellikleri
2. Barut Özellikleri
    - Barutun Et Kalınlığı
    - Barutun Geometrisi
    - Barutun Ağırlığı
3. Namlu Özellikleri
    - Namlu Uzunluğu
    - Namlu Et Kalınlığı
    - Namlu Sıcaklığı
    - Namlu içi Sürtünme

4. Mermi Çekirdeği Özellikleri

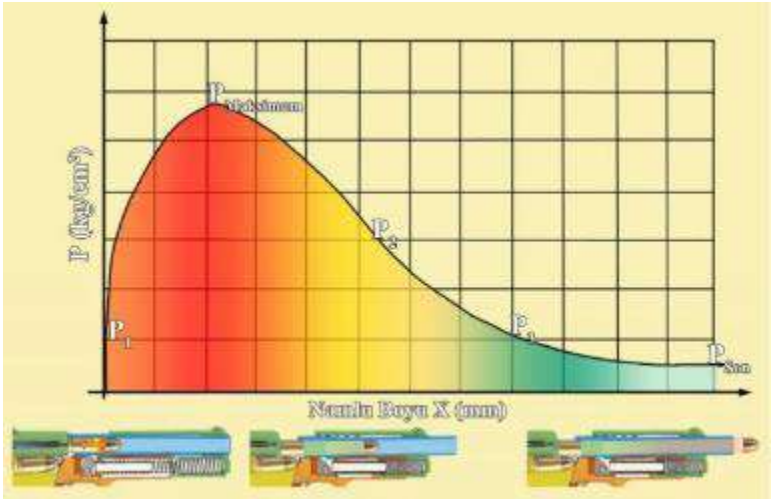
Mermi Çekirdeğinin Efektif Kütlesi

Mermi Çekirdeğinin Taban Yapısı

Mermi Çekirdeğinin Gömlek Yapısı

En yüksek balistik verimin elde edilmesi için bu dört temel parametre üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

Ateşli silahlarda kullanılan barut, çok hızlı yanan bir maddedir. Yandığında ortaya çıkan gazların basıncı, ateşli silahlarda mermi için itici gücü oluşturmaktadır. Barut, düşük seviyeli patlayıcılar grubunda bulunmaktadır. Yandığında sesten yavaş bir parlama ortaya çıkmaktadır. Bu sayede, silahta barutun yanmasından oluşan basınç, mermiyi itecek kadar güç ortaya çıkarırken, namluya da zarar vermemektedir. Diğer silahlara göre sıcaklık basınç açısından daha çok zorlanarak çalışan askeri silahlar için barut-basınç eğrisi elde edildikten sonra, silah üretim prensiplerine bağlı kalınarak her bir noktaya temas etmesi beklenen basınç miktarına dayanabilecek duvar kalınlıklarının hesaplanması beklenmektedir. Basınç yardımıyla barutun itilmesi sonucu haznede yanma başlar. Artan basınca bağlı olarak da yanmanın şiddeti de artar. Bu yanmadaki artış merminin namludan ayrılması için gerekli olan mermi atış değerine ulaşıncaya kadar devam eder. Basıncın en yüksek değere (Pmaksimum) ulaştığı noktada tüm barut yanmış olur ancak ivmelenme devam eder (Yavaş, 2009). Şekil 2.15'de namlu boyunca basınç değişimi gösterilmektedir.



Şekil 31. Namlu boyunca basınç değişimi

Temel anlamda düşündüğümüzde bir silahın mekanizması aslında tamamen yanmadan dolayı yüksek ısıya maruz kalmakta olan bir makine sistemine benzetilebilmektedir. Bu nedenle çalışma prensibi olarak da otomobil motorunu andırmaktadır. Her iki sistemde de genişleyen bir gaz vardır ve motordaki gaz pistonun hareketini sağlarken silahta ise merminin hareketine sebep olur. Silahtaki gaz barutun patlaması sonucu açığa çıkan yüksek sıcaklık ve yüksek basınçlı gazlardır.

İç balistik aynı zamanda silahın namlu içindeki spiral şeklindeki yiv ve setlerini de inceler. Mermi namlu içerisinde kendi ekseninde döner, iyi bir kararlılık sağlanır ve bu yiv ve setler sayesinde mermi dönerek hedefine ulaşır. Bu dönmenin etkisiyle de namlunun iç çeperinde oyuklara sebebiyet verir. Spiral şeklinde oluşan bu oyuklar silah namlusunun eğimine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Şekil 2.16'da barutun yanmasıyla oluşan basıncın etkisiyle merminin namludan çıkışını gösteren resim verilmektedir.



Şekil 2.32. Barutun yanmasıyla oluşan basıncın etkisiyle merminin namludan çıkışı

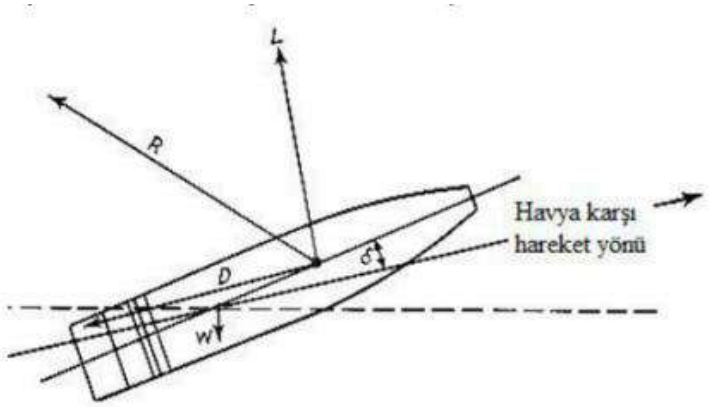
Dış Balistik

Dış balistik, merminin ve yanan barut gazlarının namluyu terk edip hedefe ulaşıncaya kadar geçen sürede merminin uçuş hareketini ve bu harekete etki eden faktörleri incelediği için balistik mekanizmasını iç balistiğe nazaran daha çok fiziksel olarak ele almaktadır.

Burada kullanılan mermi kelimesi füzeleri, silah mermilerini ve uçaktan atılan bombaların vs. tamamını kapsamaktadır ve hedefe atılan ya da fırlatılan herhangi bir rijit nesne olarak tanımlanmaktadır.

Mermi havadayken Şekil 2.17'de gösterildiği gibi hareket yönü ile ð açısı yapan bir eksene sahiptir. Hareketine farklı kuvvetler etki eder. Bu hareket, yerçekimi w'ye (dikeyde aşağı doğru), hıza, hava ve merminin özniteliklerine, merminin hareket ettiği yöne bağlı bir hava

kuvveti R'ye bağlıdır. Eğer δ, sıfıra eşitse ve mermi kendi eksenine göre simetrikse R kuvvetinin yönü mermi hareket yönünün tam tersi yöndedir.



Şekil 2.33. Merminin havadayken hareketine etkiyen kuvvetler

Genellikle δ, sıfır olmaz bu nedenle, R hareket yönünü keser. İşte dış balistik bilimi bu türlü hava dinamiği kuvvetlerinin merminin uçuşu sırasındaki etkilerini inceler.

Terminal Balistik

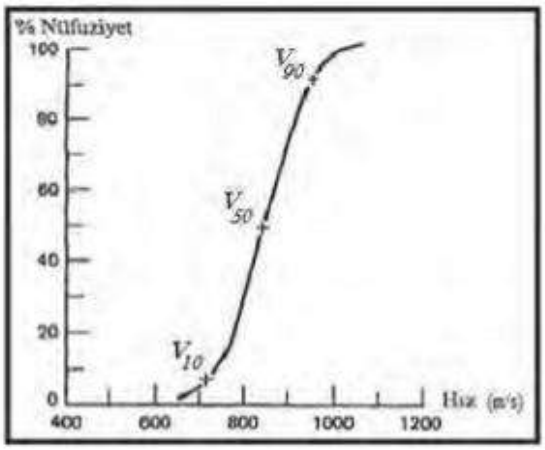
Literatürde hedef balistiği olarak da tanımlanan terminal balistik, merminin temas ettiği hedefte oluşturduğu hasarın incelenmesini sağlayan bir balistik alanıdır. Güvenli ve en uygun tasarımların farklı formlarda en sağlıklı şekilde yapılabilmesi için kısa süreli ve yüksek değerdeki yüklerin uygulanması gerekebilir. Bu yüklemeler karşısında malzeme davranışının iyi bir şekilde anlaşılması gerekmektedir.

Mermi hedefe ulaştığında meydana gelen hasar, hedefe etkime mekaniği, zırh malzemesi arkasındaki etkiler, saçılan parçacıkların yapıları, yüksek basınçtaki patlamalar gibi birçok başlık altında terminal balistik incelemeleriyle kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Terminal balistiğin alanı, patlamanın ya da merminin sadece hedef üzerindeki etkilerini incelemekle sınırlı değildir. Bunların haricinde özellikle son yıllarda üzerine daha fazla çalışmaların ve araştırmaların yapıldığı çevre ve canlılar üzerindeki etkilerini de ciddi anlamda incelemektedir. Mermilerin tipleri çap ölçülerine ve buna bağlı olarak da bıraktıkları hasara göre farklılık gösterebilmektedirler. Örneğin; tüfek, tabanca gibi küçük çaplı silahların mermileri, çarpma etkisi ile hedefi delmektedir. Büyük çaplı, ağır ateşli silahlar olan topların mermileri ise hedefi bulduğunda patlamaktadır. İşte bu gibi faktörlerin incelenmesi terminal balistik alanının çalışmaları ile gerçekleşmektedir (Demir, 2008).

2.4.1. Balistik koruma testleri

Balistik Limit V_{50} Testi

Hedefte oluşan hasar mekanizmalarının incelenmesi için çeşitli testler yapılabileceği gibi bir de zırh malzemesinin hasara uğramadan dayanabileceği mermi hızının tespiti için testler yapılmaktadır. Bunların en önemlisi balistik limit V50 testidir. Bu test yardımıyla balistik çarpma hızı veya balistik limitler belirlenmektedir (Cerit, 2004). Kritik hız değeri olarak tanımlanan V50, merminin hedefe dik bir şekilde çarpması sonucu hedefte meydana gelen delinmenin %50 oranında olup olmadığını hız olarak tanımlanmasını sağlayan balistik bir parametredir. Mermi V50 hızında ise zırh malzemesinin delinme ihtimali %50'dir. Balistik hız limitinin V50 değerinden düşük olması durumunda hedefte kısmi delinme meydana gelirken, yüksek hız limitinde ise tam delinme meydana gelmektedir (Erdem ve Türker, 2011). Tam penetrasyon olarak da tanımlanan tam delinme, mermi ya da zırh malzemesinden kopan parçacıklar sayesinde tamamen delinmesi olarak ifade edilmektedir. Kısmi delinme (kısmi penetrasyon) ise zırh plaka boyunca delinmenin tam olarak gerçekleşmemesi durumunda geçerli olmaktadır (Aly ve Li, 2008). V50 balistik hız limitini tespit etmek için yapılan testler sırasında zırh malzemesine en az dört atış yapılmalıdır. Bu atışlardan iki tanesinin hız değerleri hedefi delecek şekilde olması istenirken diğer ikisinin delmeyen hız değerlerinde olması gerekmektedir. Burada en önemli noktalardan bir tanesi merminin hedefe çarpma hız farkının belirlenmesidir. Hedefe farklı hızlarda gönderilen mermilerden, hedefi en yüksek hızda delen mermi ile hedefi delmeyen merminin plakaya çarpma hız farkının 18,29 m/s hız değerini geçmemesi şartı aranmaktadır. Test sonuçlarıyla belirlenen bu dört merminin hız limit değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak bir değer belirlenir. Bu değer zırh plakasının V50 balistik hız sınırı değerini Şekil 2.18'de V50 hız gösterimi yer almaktadır. Buna göre V50 değeri, kullanılan malzemenin sertliği ile lineer ilişki göstermektedir.



Şekil 2.34. V50 hız gösterimi (Karagöz vd., 2010)

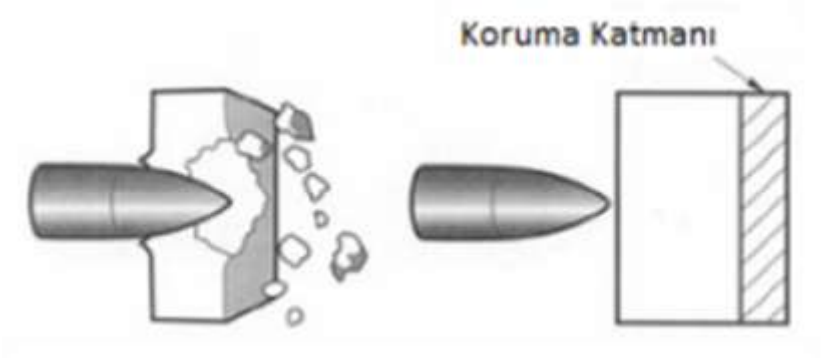
2.4.2. Balistik zırh malzemeleri

Geçmişten günümüze kadar zırh malzemelerinin kullanım amacı genellikle tehditler karşısında korunma amaçlı olmuştur. Bu korunma insanların korunması olabildiği gibi askeri teçhizatların korunması şeklinde de olabilmektedir.

Zırh malzemeleri birçok bilimsel alanı içine alarak disiplinler arası bir çalışma noktası haline gelmiştir. Fiziksel metalurji, katı-hal fiziği, tekstil bilimi, kimya, balistik, yüzey bilimi ve malzeme analizi bu çalışma alanlarının başlıcalarıdır. Bunların en temelinde ise malzeme bilimi bulunmaktadır. İhtiyaç duyulan ileri düzeydeki malzemenin üretilmesi ve geliştirilmesi malzeme bilimi sayesinde olmaktadır ve zırh malzemelerin de temelini oluşturmaktadır (Baykara, 1997).

Zırh malzemelerinin birçok kullanım alanı vardır ve bu kullanım alanlarında gösterdikleri davranışlara göre pasif, aktif ve reaktif şeklinde üç ana başlık altında toplanmaktadırlar. Balistik korumayı sağlamak için istenilen ölçü ve standartlarda oluşturulan malzemenin yüksek dayanımlı olması beklenmektedir ve bu özelliklere sahip zırh malzemeler korunacak sistemin üzerine monte edilerek kullanıldığında pasif zırh malzemesi görevi görmektedirler. Aktif ve reaktif zırhlar ise tehdidin hedefe ulaşmadan hemen önceki zaman diliminde ya da ulaştığı ilk anda oluşan enerjiyi absorbe ederek balistik koruma sağlamış olurlar.

Zırh malzemeleri balistik tehditlere karşı koruma sağlaması için geliştirilen bir malzeme grubudur. Bu korumayı da farklı davranışlarla sergilemektedirler. Namludan çıkan merminin kinetik enerjisinin plastik deformasyona dönüşmesiyle çatlak oluşturup açığa çıkan enerjiyi sönümleyip merminin hızını yavaşlatabildiği gibi mermiyi parçalayarak, aşındırarak veya hedeften uzaklaştırarak balistik koruma sağlanabilmektedir. Hedefe etkiyen enerji sayesinde bir çatlak oluşumu söz konusu ise korunması gereken ortam üzerinde ayrı bir tesir bırakmaması için yapıdan kopan parçaların kontrolünün sağlanması gerekmektedir. Bu sebeple ana zırh malzemesine Şekil 2.19'da gösterildiği gibi ek bir katmanın ilave edilmesi söz konusu olabilmektedir.



Şekil 35. Darbe sonrası kopan parçalar ve koruyucu katmanın şematik görünümü

Gelişmiş devletler uzay, havacılık ve savunma sanayisindeki yenilikleri ulusal gücün ve stratejik pozisyonların ilerlemesinin gereği olarak görmektedirler. Özellikle son yıllarda gelişmiş ülkelerde savunma ve uzay sanayinde yapılan araştırma-geliştirme faaliyetlerine ciddi yatırımlar yapılmaktadır. Savunma sanayisinde yapılan araştırmaların büyük kısmının zırh malzemeleri üzerine olduğu gözlenmektedir. Zırh malzemeleri uçaklar, gemiler, tank, askeri personel taşıma ve koruma araçları gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir.

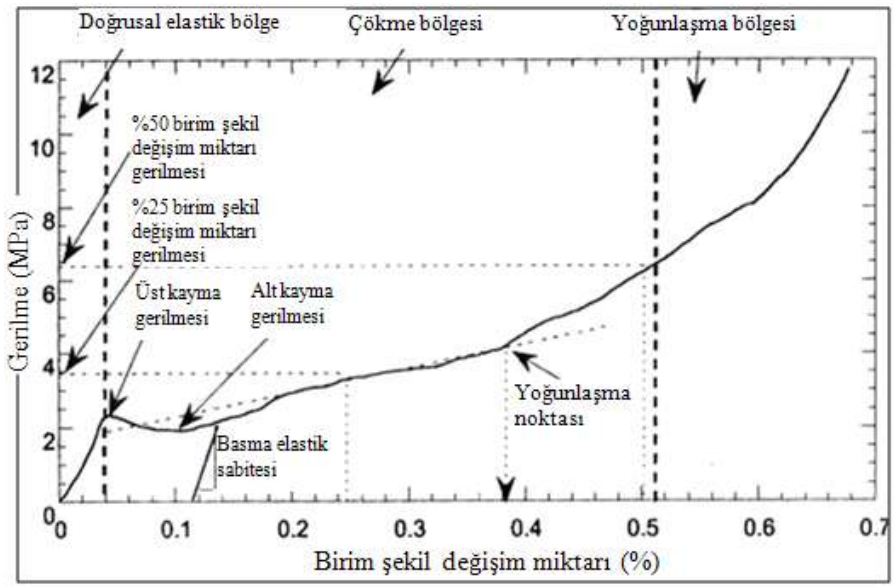
Günümüz teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak zırh malzemelerinin balistik performansını artırmak için birçok çalışma yapılmaktadır. Özellikle hafifliğin ve enerji sönümlemenin arandığı zırh tasarımları üzerine çeşitli çalışmalara rastlanmaktadır (Gama vd., 2001; Jing vd., 2014). Son yıllarda savunma sanayinde metalik köpük yapılar hafiflik ve enerji sönümleme kabiliyetlerinden dolayı tercih edilir malzemeler haline gelmiştir.

Metalik köpük yapılar polimerik olanlarla mukayese edildiğinde kıyasla daha rijit bir yapıya sahip, daha yüksek sıcaklıklarda içyapısını koruyabilen (kararlı), sıcaklık direnci daha yüksek olan yapılardadır. Tamamen geri dönüşümlü malzemeler olup çevreye herhangi bir zarar vermezler. En önemli avantajları ise özgül ağırlıklarının düşük olmasıdır. Bunun yanında yönden bağımsız olarak darbe ve titreşim sönümleyebilmesi, olumlu özellikleridir (Miao ve Rabiei, 2014; Liu vd., 2014). Metalik köpükler, metal veya alaşımlarından üretildiği için belli bir plastik şekil değiştirme bölgesine sahiptir. Bu plastik bölge lineer elastik bölge üstündeki yüklemelerde plastik çökme ile başlar. Köpüklerin lineer elastik deformasyon özellikleri Young modülü ve kayma ile hesaplanabilir. Lineer elastik deformasyon mekanizması gözeneklerin açık veya kapalı olması durumuna göre değişir. Kapalı gözenekli köpükler daha karmaşıktır. Eğer gözenek duvarları ince olursa çatlama veya kırılma meydana gelebilir. Bu gözenek duvarlarında bazı deformasyon gerilmeleri ortaya çıkar. Bu gerilme kuvvetini, köpük

malzemesinin sahip olduğu gerilme kuvveti etki ederek arttırır (Elbir vd., 2003; Esmaeelzadeh vd. 2006).

Kapalı gözenekli alüminyum köpüklerin düşük yoğunluk, yüksek dayanıklılık ve iyi enerji absorbe etme karakteri gibi özelliklerinden dolayı çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanımı artmıştır. Diğer özellikleri arasında; basma yüklemeleri altında deformasyon, elastik deformasyon, eksenel basmalarda katlanma ve çentik özellikleri çok önemlidir (Campana ve Pilone, 2009; Banhart, 2005; Bart-Smith vd., 1998).

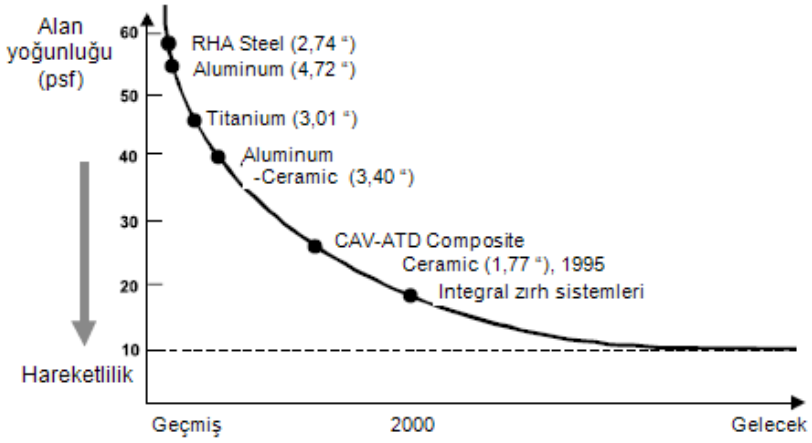
Alüminyum köpüklerin gerilme-birim şekil değişim eğrisi Şekil 2.20'de gösterilmiş ve Al 6061 metalik köpük için farklı üç bölgede anlatılmıştır (Seitzberger vd. 1997; Davies ve Zhan 1983). Bu üç bölge sırasıyla lineer elastik bölge, çökme ve yoğunlaşma bölgeleridir. Metalik köpükler tipik bir gerilme–birim şekil değiştirme eğrisi gösterir ve lineer elastik bölgede elastik deformasyona uğrar. Lineer elastik bölgede gerilme ve gerinim gözenek duvarı ile kontrol edilir. Bu bölge gözenek duvarlarının bükülmesi ve yırtılması ile sona erer ve çökme bölgesi başlar. Çökme, deformasyonun çok iyi sınırlandırıldığı elastik bölgeden deformasyonun diğer deforme olmamış kısımlara sıçramasıyla ilerler. Kritik bir genleşmede gözenek duvarları birbirine değmeye başlar ve bunun sonucunda yoğunlaşma meydana gelir.



Şekil 2.36. Metal köpüklerin gerilim-birim şekil değişim miktarı grafiği (Çinici, 2012).

Zırh malzemeleri ile ilgili yapılan çalışmalarda yapısal performans ve balistik entegrasyonda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Şekil 2.21'de zırhların tarihsel gelişimi boyunca ağırlık değişimini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi zırh malzemesinin yoğunluğunun

azaltılmasına yönelik çalışmalardan olumlu sonuçlar alınmıştır. Al esaslı metalik köpüğün integral zırh malzemesinde kullanımı hem balistik performans hem de hafiflik açısından önemli katkılar sağlamıştır (Bazle vd., 2001).



Şekil 2.37. Zırh malzemesinin tarihi gelişimi boyunca ağırlık değişimi (Bazle vd., 2001)

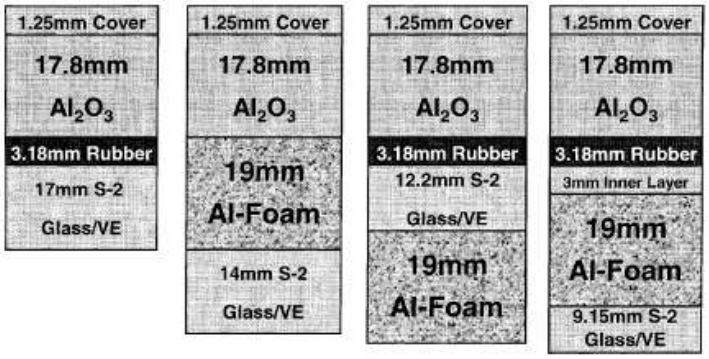
Hafif seramik-metal zırhların gelişimine Wilkins'in yaptığı çalışmalar öncülük etmiştir. Wilkins seramik-alüminyum zırh sistemini geliştirmiş ve daha sonra bazı zırhların nüfuziyet mekanizması üzerine araştırma yapmıştır. Yüksek sertlikteki seramiklerin deformasyonu ve seramiklerin karmaşık gevrek kırılganlık mekanizmasından kaynaklanan aşınması son yirmi yıldır bilim insanları tarafından araştırılmaktadır. Seramiğin kırılma işlemi merminin enerjisinin düşük bir miktarını (~%0,2) absorbe ederken büyük bir kısmı (%20-40) arka plakanın deformasyonu neticesinde absorbe edilir. Kinetik enerjinin sonu merminin deformasyonunda (%10-15) harcanır ve çok büyük bir miktarı seramik parçaları tarafından alınır (Çinici, 2012; Wilkins, 1978).

Bazle ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda (Bazle vd., 2001) Al köpük içeren ve içermeyen balistik hedefler tasarlamış ve alüminyum köpük içerisinde şok dalga yayılımı kıyaslanması için test edilmiştir. Bu çalışmada, alüminyum köpüksüz hedef 161, 03 kg/m2 ve alüminyum köpük içeren hedef 157, 75 kg/m2 yoğunluğa sahiptir. Yüksek sertlikteki çelik, alüminyum köpük, alümina seramik ve 7039 alüminyum plakalar ince tabaka epoksi yapıştırıcı ile birlikte bağlanmıştır. Her iki hedef 20 mm ve 1067 m/s hızda mermi ile vurulmuştur. Ölçülen gerilme değerlerinde köpüksüz sinyalin artış zamanı 1,0 mikro saniye köpükle 2,0 mikro saniyedir. Her iki deneyde de maksimum gerilme seviyesi yaklaşık 6,25 GPa olarak bulunmuştur. Deneysel çalışma ve sonlu elemanlar yöntemi sonucunda alüminyum köpüklerin gerilme dalga yayılımında iki önemli özelliği ortaya çıkmıştır;

1. Alüminyum köpükler gerilme dalga yayılımı zamanını artırmıştır,
2. Alüminyum köpük kullanımı gerilme dalga yayılımında önemli gecikmelere neden olmuştur.

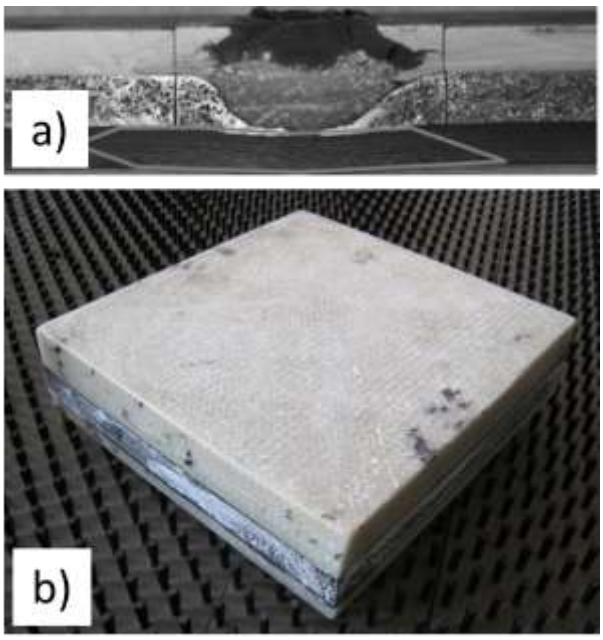
Gerilme dalga deneylerinin ikinci adımı farklı kalınlıktaki alüminyum köpük ile (12,7 ve 30,48 mm) iki balistik hedef ile ilgilidir. İlave olarak seramik matrisli (AS109) tabaka hedef ile bağlanmıştır. 20 mm merminin hızı 915 m/s'dir. İlk hedefe çarpan mermi AS109 seramik levhayı parçalamış, yüksek sertlikteki çeliği deforme etmiş ve alüminyum köpüğü yoğunlaştırmıştır. Ölçülen gerilim 0,825 GPa olarak kaydedilmiştir. İkinci hedefe çarpmada (39,48 mm alüminyum köpük) AS109 seramik tabakanın kırılması benzer ve yüksek sertlikteki çeliğin deformasyonu benzer şekilde görülmüştür. Bununla beraber alüminyum köpük tamamen değil kısmen yoğunlaşmıştır ve gerilme ölçümü hiç kaydedilememiştir. Bu iki deneyden önemli sonuçlar çıkmıştır. Eğer köpük bir taraftan diğer tarafa tamamen yoğunlaşmazsa içerisinden geçen gerilme dalgalarının ölçümüne izin vermez. Alüminyum köpüğün hava/gaz dolu gözenekli yapısı gerilme dalga yayılımını zorlaştırır. Gözenek duvarı gerilme dalgalarının yayılımında önemli rol oynar. Kapalı gözenekli köpüğün deformasyonu gözenek duvarı eğilmesi ve plastik çökmesiyle meydana gelir. Bu durum bölgesel yoğunlaşmaya yol açar. Gerilme dalga yayılımı etkisi kapalı gözenekli köpük tamamen yoğunlaştığında meydana gelir. Eğer gerilme dalgası köpük tamamen yoğunlaşıncaya kadar arka plakaya ulaşmazsa arka plakada hasar ve deformasyonu büyümesini geciktirir. Bu şekilde köpük zırhların balistik etkisini geliştirir.

Alüminyum köpüklerin integral zırh malzemesi olarak kullanımı amacıyla farklı tasarımlar yapılmış ve Al köpük içermeyen integral zırhlarla balistik özellikleri karşılaştırılmıştır (Şekil 2.22). Al esaslı metalik köpüklerin dinamik deformasyonu çarpma yüzeyinde başlamış ve yoğunluk tamamlanıncaya kadar kalınlık içerisinde yayılmıştır. Alüminyum köpüğün gözenekli yapısı gerilme dalgalarını dağıtır ve ince dalgalar olarak hareket ettirir. Alüminyum köpük içerisinde gerilme dalgalarının dağılım etkisi sadece yoğunluk tamamlandıktan sonra meydana gelmektedir. Al bazlı metalik köpüğün kullanılmadığı bir tasarımda ilk başta görülmektedir (Bazle vd., 2001).



Şekil 2.38. Al köpük kullanılarak yapılan çeşitli zırh tasarımları (Bazle vd., 2001).

Köpükte kısmi yoğunlaşma meydana geldiğinde gerilme dalgaları filtre edilerek hareket edebilir. Bu sayede alüminyum köpüğün arka plakaya iletilen gerilmenin etkisini azalttığı tespit edilmiştir. Son zamanlarda özellikle ABD de Al esaslı metalik köpüğün darbe emme özelliği sebebi ile integral zırh malzemesi üretiminde kullanılması konusunda yoğun çalışmalar yapılmaktadır (Shiomi vd. 2010). Bu konuda yapılan çalışmalar iki nokta üzerinde yoğunlaşmaktadır; Al esaslı metalik köpüğün dayanımını artırmak ve integral zırh malzemesinde farklı tasarımlar uygulayarak zırhın performansını yükseltmek. Alüminyum köpüklerin integral zırh malzemesi olarak kullanımı Şekil 2.23'de görülmektedir. Şekil 2.23a'dan da anlaşılacağı gibi alüminyum köpüklerin lokal deformasyonu integral zırh sisteminde seramik parçacıklarını tutmaktadır (Bazle vd., 2001). Şekil 2.23b'de ise Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi tarafından üretilen integral zırh malzemesi görülmektedir.



Şekil 2.39. Al köpüğün integral zırh malzemesi olarak tasarımı (Çinici, 2012; Bazle vd., 2001)

2.4.3. Zırh uygulama alanları ve zırh sistemlerinde aranan özellikler

Hava, kara, deniz ve uzay araçlarında koruma amaçlı pek çok uygulama alanına sahip zırh malzemeler; kullanım alanlarına göre sivil, emniyet ve askeri amaçlı olarak üç farklı şekilde gruplandırılmaktadır. Bankalar için tasarlanan zırhlı araçlar, devlet büyüklerini koruma amaçlı özel olarak yapılan zırhlı sivil araçlar kişisel zırhlı yelek ve miğferler bunların başlıcalarıdır. Bu denli ciddi kritik noktalarda kullanılan zırh malzemelerinden de beklenen bir takım özellikler vardır. Ancak zırh malzemesi dediğimizde olmasını istediğimiz en temel mekanik özellikler süneklik ve dayanıklılıktır.

Zırh malzemelerinin işlenebilirliğinin ve yeniden şekillendirilme kabiliyetinin yüksek olması istenir. Bu nedenle gevrek, kolay kırılabilen yapılardan ziyade sünek olması istenir. Bu sayede enerji absorbe edebilme yeteneğinin de yüksek olması sağlanmaktadır (Kara, 2012).

Etkiyen kuvvetin hedefe temas ettiği ilk anda oldukça yüksek bir enerji açığa çıkmaktadır. Bu enerjinin absorbe edilme miktarı balistik korumanın performansıyla doğru orantılıdır. Açığa çıkan enerji ne kadar yüksek miktarda absorbe edilip sönümlenebilirse çatlak oluşum mekanizması minimum seviyede kalır ve bu sayede yüksek seviyede balistik koruma sağlanmış olur. Bu nedenle üretilecek olan zırh malzemelerinin sünekliği ve enerji absorbe edebilme kabiliyeti oldukça önem arz etmektedir. Bu noktada zırh malzemesinin tokluk özelliği de ön plana çıkmaktadır. Çünkü malzemelerin en önemli mekanik özelliklerinden olan tokluk malzemenin enerji emebilme kabiliyeti olarak da tanımlanmaktadır. Tablo 2.1'de balistik performansın belirlenmesinde önemli olan parametreler hedefteki zırh malzemesi ve etkiyen kuvvet olan mermi bakımından ele alınmaktadır.

Tablo 2.9. Mermi ve hedef bakımından balistik performans parametreleri (Gellert vd. 2000).

HEDEF	Malzeme Özellikleri ve Yapısı	Elastisite Modülü
		Alansal Yoğunluk
		Kalınlık
		Tabaka Sayısı
MERMİ	Fiziksel Özellikler	Ağırlık
		Kalibre
		Uç Geometrisi
		Sertlik
		Hız
		Vuruş Açısı

Zırh sistemlerinin kullanıldığı birçok alan ve buna bağlı olarak kullanıldığı çok çeşitli ortam koşulları bulunmaktadır. Zamanla duyulan ihtiyaca göre de artık zırh malzemelerin daha hafif yapılar olması istenmektedir. Askeri amaçlı kullanılan bir aracın hareket kabiliyetinin üst seviyede olması istenir. Bu aracı zırhlamak istediğimizde ise hareket kabiliyetini sınırlandırmamız istenir. Bu noktada kullanılacak zırh malzemesinin hafif ve düşük yoğunlukta olması tercih edilmektedir. Zırhlı personelin ya da teçhizatın hareket kabiliyeti ve hızı Elde edilen düşük yoğunluk sayesinde artmaktadır. Bu nedenle zırh teknolojisindeki araştırmalar sürekli olarak daha düşük yoğunlukla daha yüksek performansın elde edilebilmesi yönünde ilerlemektedir.

Zırh malzemesi olarak en yaygın kullanılan malzeme düşük maliyeti ve dayanım ve tokluk özelliklerinin iyi olmasından dolayı çeliklerdir. Ancak yüksek yoğunluklarından dolayı alternatif malzeme arayışları devam etmekte ve daha hafif ve düşük yoğunlukta zırh malzemesi üretmek için çalışmalar yapılmaktadır (Weilan vd., 2016).

Tablo 2.2'de birkaç zırh çeliğinin kimyasal kompozisyonu verilmiştir. Bu çeliklerin özellikleri ise Tablo 2.3'de sunulmuştur. Günümüzde kullanılan MIL A 12560 çeliği birçok uygulamada kullanılan standart zırh çeliğidir. Yüksek sertliğe sahip MIL A 46100 çeliği ise balistik korumanın MIL A 12560'a göre %20 daha etkili olduğu (14.5 mm AP) bir zırh çeliğidir.

Tablo 2.10. Zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri

Kimyasal Bileşim (%)	MIL A 12560 (Mars 190)	MIL A 46100 (Mars 240)	MIL 46173 (Mars 270)	Mars 300	XH 129	Armox 440 T
Karbon	< 0.30	< 0.30	0.37 maks.	0.45-0.55	0.26-0.32	0.21
Mangan	1.20	0.95	0.90	0.3-0.7	0.1-0.4	1.2
Kükürt	0.005	0.005	0.005	0.005	≤0.01	0.01
Fosfor	0.012	0.012	0.012	0.012	≤0.015	0.01
Silisyum	0.2-0.4	0.2-0.4	0.2-0.4	0.6-1.0	0.1-0.4	0.1-0.5
Nikel	1.80 maks.	1.85 maks.	3.00 min	4.5 maks.	-	2.5
Krom	1.00	1.6	1.90 maks.	0.4 maks.	1.0-1.5	1.00
Molibden	0.3-0.5	0.5	0.3-0.5	0.3-0.5	0.1-0.5	0.7

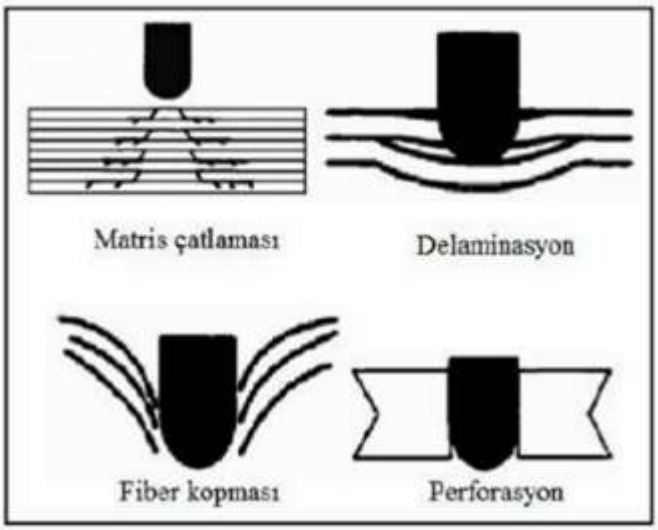
Tablo 2.2'de verilen zırh çeliklerinin ilk üçü düşük karbonlu çeliklerdir. Bu çeliklerin kimyasal bileşiminde verilen maksimum karbon miktarı % 0.3 civarındadır. Tablo 2.3'de zırh çeliklerine ait mekanik özellikler verilmiştir.

Tablo 2.11. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri (Manganello ve Wilson 1993; U. S. Military 1988; U. S. Military 1990; Karagöz 2005; Karagöz ve Atapek 2007).

Özellik	MIL A 12560 (Mars 190)	MIL A 46100 (Mars 240)	MIL 46173 (Mars 270)	Mars 300	XH129*		Armox 440 T
Sertlik (HB)	277-388	477-534	477-601	578-655	400-450	480-530	420-480
σ_Y (MPa)**	1150	≥ 1100	≥ 1100	≥ 1300	1200	1300	≥ 1100
σ_T (MPa)**	1250	≥ 1600	≥ 1700	≥ 2000	1375	1600	≥ 1300-1500
Uzama (%)	≥ 10	≥ 9	≥ 8	≥ 6	10	9	≥ 10
Tokluk***	20-30	30 - 40	30	15	16	14	30

** : σy= Akma Mukavemeti, σT= Çekme Mukavemeti, *** : Çentik darbe (-40ºC, J/mm^2)

Günümüzde kompozit malzemeler zırh malzemesi olarak çeliğe göre daha yaygın kullanım alanına sahiptirler. Kompozit yapılı zırh malzemeler polimer, metalik ve seramik esaslı başlıklar halinde incelenmektedirler. Plastikler iyi işlenebilirlikleri, düşük maliyeti ve düşük yoğunlukları sayesinde tercih edilmektedir. Seramik esaslı zırhlar ise düşük yoğunlukları ve yüksek sertlikleri sayesinde iyi bir seviyede balistik performansa sahip oldukları gibi yüksek maliyete ve düşük işlenebilirliğe de sahiptirler. Şekil 2.40'te kompozit yapılarda karşılaşılan balistik darbe hasar şekilleri verilmiştir.



Şekil 2.41. Kompozit yapıda balistik darbe hasar şekilleri (Yanen, 2016).

2.4.4. Balistik koruyucu ölçüm standardı

Balistik koruyuculuğu ölçmek amacıyla National Institute of Justice (NIJ) ve NATO çeşitli standartlar geliştirmiştir. NIJ 0101.06 standardında kullanılan merminin kalibresi, tipi, ağırlığı ve hızı dikkate alınarak çeşitli koruma seviyeleri tanımlanmıştır. Ayrıca bu konu ile ilgili çeşitli askeri standartlar ve Türk Standartları Enstitüsü tarafından da bir standart hazırlanmıştır.

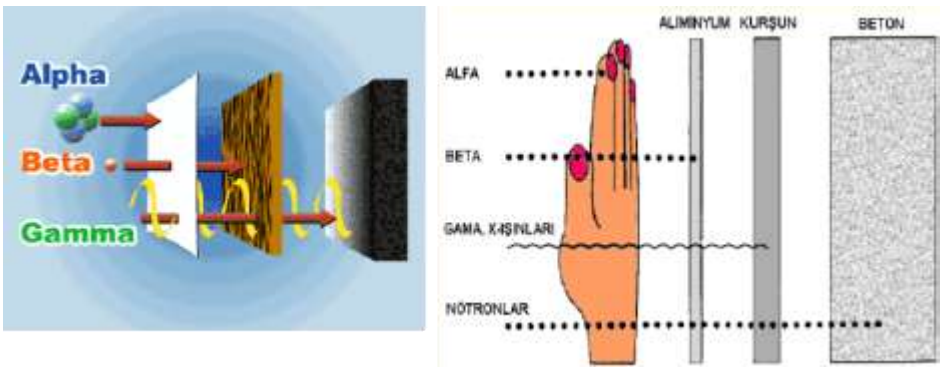
Tablo 2.4'de uluslararası balistik koruyucu standartlardan bazıları sunulmuştur (Yanen 2016; Sudhakar vd. 2016).

Tablo 2.12. Uluslararası balistik standartları (Yanen 2016).

Standart No	Standart Adı
MIL-STD-662 F	Balistic Test For Armor
NIJ-0101.06	National Institute of Justice
STANAG 2920	Balistic Test Method For Personel Armor
TS 11164	Balistik Koruyucu Vücut Zırhı
EN1063	Euronorm Standard For Security Glazing

2.5. Radyasyon Zırhlama

Son yıllarda nükleer sistemler için multi-fonksiyonel malzemelerin geliştirilmesi giderek kritik hale gelmiştir. Bunun nedeni radyoaktif kaynaklara yakın çevrelerin daha iyi korunabilmesi için olan talep artışıdır. Bu amaç için kullanılacak olan radyasyon zırhlayıcı malzemelerin veya zırhlayıcı yapı bileşenlerinin uygun mekanik özelliklerin yanı sıra güvenilir termofiziksel özellikleri de sağlamalıdır (Wilkins 1978). Kullanılacak zırh malzemesi, radyasyon türüne göre farklılık göstermektedir. Alfa ışınımı yapan bir kaynak kâğıtla, ondan daha fazla giriciliği olan betaları hafif olan alüminyum ile zırhlamak yeterli olmaktadır. Gama ışınlarının giriciliği ise ışınım yapan kaynağın enerjisine bağlı olmak kaydı ile betalardan 100 kat, alfalardan 10000 kat daha fazladır. Bu kadar yüksek giriciliğe sahip radyasyonlar ise ancak yüksek yoğunluğa ve yüksek atom numarasına sahip malzemeler ile zırhlanabilmektedir (Şekil 2.25) (Leonard vd. 2007).



Şekil 42. Radyasyon çeşitlerine göre zırhlama

Zırhlama:

Radyoaktif bir elementten yayımlanan radyasyonu dedektör yardımıyla ölçebiliriz. Radyasyon kaynağı ile dedektör arasına bir materyal koyarsak dedektörde ölçtüğümüz radyasyon değeri düşecektir. Bu değişim radyasyon – madde etkileşimleri ile açıklanır. Radyasyonun kontrolü insan sağlığı açısından önem taşımaktadır ve bu yüzden zırhlama önemlidir. Radyasyonun çeşitlerine göre zırhlama çeşitleri farklılık gösterir.

Alfa Kaynaklarının Zırhlanması

Alfa parçacıklarının büyük kütleleri ve yüklü olmaları ortamdaki menzillerini sınırlar ve zırhlama oldukça kolaydır. Alfa parçacıkları havada birkaç santimetre kadar menzile sahiptirler. En büyük enerjili fotonları bile insan derisini geçemezler (Martin, 2000). Kısa menzilli olmalarının sonucu olarak alfa parçacıklarını dedekte etmek oldukça zordur. Dedekte etmek için kullanılacak dedektörün seçimi de önemlidir.

Beta Kaynaklarının Zırhlanması

Beta parçacıkları enerjilerinin tamamını iyonizasyon ve frenleme (bremsstrahlung) ışınımı üretimiyle kaybederler. Bunun sebebi beta parçacıklarının yüklü olmalarıdır. Beta parçacıklarının menzili havada metre mertebesindedir, diğer yoğun ortamlarda ise bu menzil birkaç milimetreye kadar düşer, beta kaynaklarının zırhlanmasında maksimum menzilin (R_{bmak}) değeri zırhlama olarak seçilecek ortamın kalınlığına eşit veya daha küçük seçilmelidir. R_{bmak}'dan daha küçük soğurucu kalınlıklar için Eşitlik 2.3'teki bağıntı kurulur.

$$I_{(x)} = I_0 e^{-\mu x}{}_{b,i}^{(rx)} \qquad (2.3)$$

Burada; $\mu_{b,i}$ (cm^2/g) maksimum beta parçacık enerjisinin bir fonksiyonu, I_0 beta parçacıklarının şiddeti ve rx ise soğurucunun yoğunluk kalınlığıdır. Beta parçacıklarının azalmasını belirlemek için kullanılır.

Foton Kaynaklarının Zırhlanması

Fotonların, yüklü parçacıklardan daha farklı etkileşim gösterdiğini ve bu etkileşimlere örnek olarak fotoelektrik etkileşimler, compton, çift oluşum verilmiştir. X-ışınları ve gama ışınları

madde içerisinden doğrudan etkileşmeden geçebilir veya birincil demetteki fotonlardan oldukça farklı yönlerde düşük enerjili fotonlar şeklinde saçılır.

Soğurucu materyalin, foton demetini zayıflatması ideal geometride meydana geliyor ise, soğurularak veya saçılarak alıcıya ulaşan fotonların hepsi başlangıç enerjisine sahip olur. Zayıf geometride ise saçılan fotonların önemli bir kısmı ilgilenilen alıcıya ulaşacaktır ve başlangıç enerjilerini koruyan azalmamış fotonlara ilaveten çoklu saçılmış farklı enerjili fotonlar nedeniyle enerji spektrumu karmaşık olacaktır (Oak Ridge 1966; Martin 2000). Deneysel çalışmalarda ideal bir geometri oluşturmak mümkün değildir ve daima saçılan fotonları göz önüne almak gerekir. İdeal dar – demet şartlarında fotonların çeşitli soğurucu materyallerle azaltılması Eşitlik 2.4'teki bağıntı ile ilişkilendirilir.

$$I_{(x)} = I_0 e^{-\mu x} \qquad (2.4)$$

Burada; I_0 ilk foton şiddetidir, $I_{(x)}$, x kalınlığında ki soğurucudan geçtikten sonra foton şiddetidir. μ toplam azalma katsayısıdır. Bu katsayı saçılma reaksiyonları dahil olmak üzere tüm etkileşme süreçlerini içine alır. μ değerleri genellikle soğurucunun atom numarası arttıkça artmaktadır çünkü özellikle düşük enerjili fotonlar için atom numarası büyük malzemelerde fotoelektrik etkileşme olasılığı ve yüksek enerjili fotonlar için atom numarası büyük malzemelerde çift oluşum etkileşme olasılığı artar. Tablo 2.5'te çeşitli malzemelere ait soğurma katsayıları verilmiştir.

Tablo 2.13. Soğurma katsayıları (Hubbell ve Selzer, 1995)

Enerji(KeV)	Pb	Al	su
10	1482,31	70,795	5,329
50	91,2654	0,9935	2269
100	62,9812	0,4599	0,1707
500	1,8319	0,2279	0,0969
1000	0,8061	0,1659	0,0707
10000	0,5643	0,0626	0,0222

Fotonların üstel azalmalarını anlatırken yarı değer $x_{1/2}$ (HVL, yarı değer kalınlığı) yararlı bir tanımdır. Yarı değer kalınlığı kaynağın ilk şiddetinin soğurucu materyal vasıtasıyla yarıya düşmesidir (Eşitlik 2.5, Eşitlik 2.6). Tablo 2.6'da çeşitli malzemelere ait yarı değer kalınlıklar verilmiştir.

$$\frac{I_{(x)}}{I_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu x_{1/2}} \quad (2.5)$$

$X_{1/2}$= ln2/μ =HVL (2.6)

Tablo 2.14. Yarı değer kalınlıkları (Hubbell ve Selzer 1995)

Enerji(KeV)	Pb	Al	Su
0,1	0,011	1,507	4,06
0,5	0,378	3,041	7,152
1	0,86	4,177	9,802
2	1,326	5,938	14,028
3	1,442	7,249	17,456
4	1,455	8,27	20,382
5	1,429	9,059	22,871

Zırhlama için kullanılan metal bir soğurucu gelen foton şiddetinde compton saçılmalarından kaynaklı olarak değişim yapacaktır. Saçılan fotonların birçoğu alıcıya ulaşacak ve enerjisinde azalma ve alıcıya ulaşan fotonların akısı, demet boyutu, foton enerji dağılımı, soğurucu materyal ve geometrinin bir fonksiyonudur. Bu durum zayıf geometri olarak adlandırılır. İdeal geometride azalma katsayısı μ' ye dayalı olarak hesaplanan $I_{(x)}$ değeri böylece alıcıya ulaşan fotonların sayısının altında bir sayı verecektir buna bağlı olarak zırh kalınlığında yanlış hesaplama yapılır. Bu hesabı daha doğru hale getirebilmek için saçılmayan ilk fotonların yanı sıra, saçılan fotonların etkisi B yığılma faktörü tanımlanır (Martin, 2000) (Eşitlik 2.7). Alüminyum, kurşun ve su için Tablo 2.7, Tablo 2.8 ve Tablo 2.9'da yığılma faktörleri verilmiştir.

$I_{(x)} = I_0 B e^{-\mu x}$ (2.7)

Tablo 2.15. Alüminyum için yığılma faktörleri (Hubbell ve Selzer 1995)

	Enerji (MeV)			
μx	0,1	0,5	1	5
0,5	1,91	1,57	1,45	1,28
1	2,86	2,28	1,99	1,54
2	4,87	4,07	3,26	2,04

Tablo 2.16. Kurşun için yığılma faktörleri (Hubbell ve Selzer 1995)

	Enerji (MeV)			
μx	0,1	0,5	1	5
0,5	1,51	1,14	1,2	1,25
1	2,04	1,24	1,38	1,41
2	3,39	1,39	1,68	1,73

Tablo 2.17. Su için yığılma faktörleri (Hubbell ve Selzer 1995)

	Enerji (MeV)			
μx	0,1	0,5	1	5
0,5	2,37	1,6	1,47	1,28
1	4,55	2,44	2,08	1,56
2	11,8	4,88	3,62	2,08

2.5.1. Radyasyon zırhlayıcı malzemeler

Literatürde radyasyon zırhlamaya yönelik birçok malzemenin performansı denenmiştir. Bilindiği üzere bor hammadde olarak ülkemizde oldukça yaygın bir şekilde bulunmaktadır. Geniş bir kullanım yelpazesine sahip olan bor maddesinin iyi bir radyasyon soğurucu özelliğine sahip olduğu ve bu özelliğinden dolayı birçok değişik alanda kullanılabilirliğinin araştırılması önemlidir. Dolayısıyla bu konu hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Çalık ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada bor ve bor kaplı bazı çelik malzemelerin radyasyon soğurma özellikleri incelenmiş ve borlanmış çelik malzemelerin radyasyon soğurma kabiliyetlerinin arttığı belirlenmiştir. Borlama tek başına iyi bir zırh olabilmesine rağmen pahalı ve kullanılabilir olmamasından dolayı tek başına zırh kullanılması yerine zırh malzemesi olarak kullanılacak malzemelerin borla kaplanmasının daha uygun olduğunu ifade etmişlerdir (Çalık, 2009). Bazı bor cevherlerinin Am-241 (59,54 KeV) nokta kaynağı altında kütle soğurma katsayıları teorik ve deneysel olarak F. Demir tarafından hesaplanmıştır. Kütle soğurma katsayı zırhlamada yararlı bir parametredir. Sonuç olarak tinkal, üleksit ve kolemanitin foton ve nötron parçacık radyasyonlarından korunmak için malzemelerde koruyucu olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Çalık 2009).

Un ve Sahin (2011) tarafından yapılan bir çalışmada PbO, barit, kolemanit, tinkal ve üleksit için kütle soğurma katsayısı 80.1-1250.0 KeV enerjili foton aralığında hesaplanmıştır. Etkin

atom numarası, etkin elektron numarası, toplam atom kesiti, toplam elektronik kesiti teorik ve deneysel olarak hava kerma değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken karışık durum kuralı kullanılmış ve tüm numuneler için deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta kerma değerlerinin foton enerjisi arttıkça azaldığı gözlenmiş ve PbO, barit, kolemanit, üleksit ve tinkalin iyi birer zırhlama malzemesi olabileceği gözlemlemişlerdir (Demir, 2010).

Diğer taraftan, titanyum diborür katkılı bor karbür ve silisyum karbür gibi kompozit malzemelerinin Cs-137 ve Co-60 radioizotop kaynakları altında karşılaştırılarak araştırılmıştır. Kullanılan malzemelerin zırhlama özellikleri gama emisyon tekniği kullanılarak yapılmıştır ve deneysel sonuçlar teorik sonuçlarla kıyaslanarak uyum içinde olduğu görülmüştür. Teorik sonuçlar XCOM programından hesaplanmıştır. Farklı oranlarda hazırlanmış malzemelerin yarı değer kalınlıkları da deneysel olarak yine gama emisyonu yöntemiyle ölçülmüştür (Buyuk, 2014a; Buyuk, 2015).

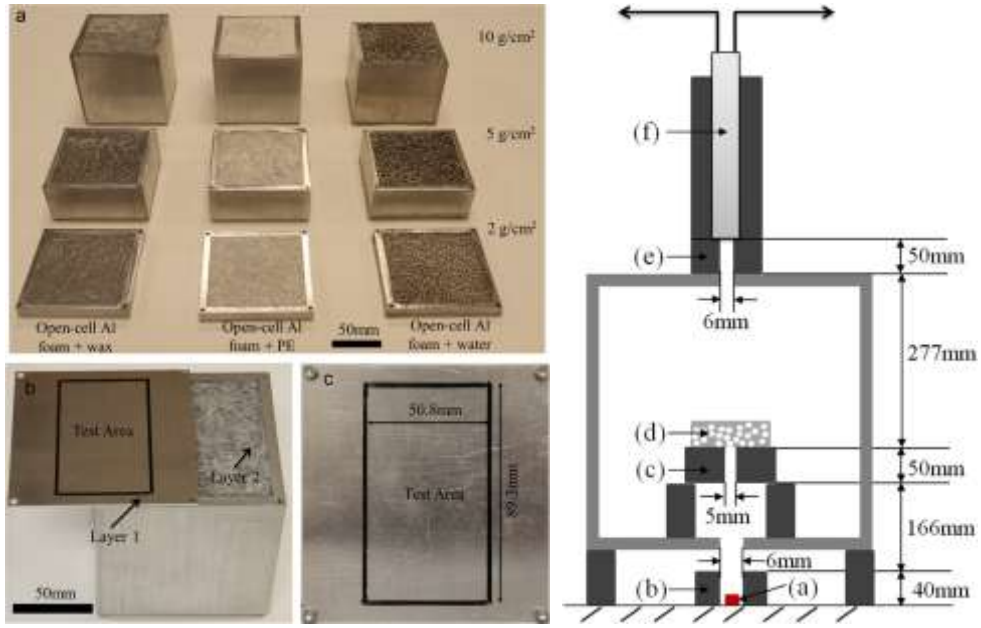
Büyük ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, gama transmisyon tekniği ile Cs-137 gama radyoizotop kaynağı kullanılarak farklı metaller için kalınlık tayini yapılmasına ilişkin deneysel bir inceleme amaçlanmıştır. Çalışılacak metaller olarak; endüstride sıkça kullanılan kurşun, çelik, pirinç ve alüminyum seçilmiştir (Buyuk, 2004).

Cs-137, Co-60 kompozitlerinin ve Pu-Be nötron kaynağı kullanılarak B4C-SiC kompozitlerinin zayıflatma davranışları incelenmiş ve hacimce değişen SiC oranına göre zayıflatma davranışı ortaya konulmuştur. SiC oranı arttıkça yüksek gama zayıflatma ve düşük nötron zayıflatma değerlerine neden olur. Ayrıca yarı değer kalınlıkları kütle soğurma katsayısı ve toplam makroskopik kesitler ile birlikte hesaplanırken, XCOM programı ile hesaplanan kütle soğurma ve deneysel ölçümler birbiri ile uyum içindedir (Buyuk, 2014b).

Alüminyuma farklı oranlarda katkılanmış bor karbürün Cs-137 kaynağı karşısında zırhlama özellikleri incelenmiş ve bor karbür oranın artışı ve kalınlığın artışının lineer soğurma ve kütle soğurma katsayılarına etkisi Akkaş ve arkadaşları tarafından hesaplamıştır (Akkaş, 2014).

Sing ve Badiger çalışmalarında bor içeren bazı malzemelerin gama ışınları ile etkileşim özelliklerini incelemişlerdir. Kullandıkları malzemeler $B_3Al_2O_3$, B_4C, $B_{10}H_{14}$ ve Fe-B dur. Fe-B malzemesinin 3 MeV altında foton enerjileri için iyi bir gama ışını zırhlama malzemesi olduğunu ve çeşitli nötron kaynağı, reaktör ve hızlandırıcılarda radyasyon zırhlama amaçlı kullanılabilecek yararlı bir malzeme sonucuna varmışlardır (Singh ve Badiger, 2015).

Nükleer endüstrideki yeni misyon kriterleri düşük yoğunluk, yüksek radyasyon toleransı ve enerji sönümleme özelliklerine vurgu yapmaktadır (Gupta, 2007). Bu kriterler nükleer tesisleri, radyoaktif atık depolama ve işletme tesislerini olası terör saldırılarına ve ani iklim değişiklerine karşı korumak için belirlenmiştir (Chittineni ve Woldesenbet, 2010; Shiqiang vd. 2014). Bunun için daha önce yapılan çalışmaların çoğu metal alaşımları, polimerler ve kompozitler üzerine yoğunlaşmıştır (Gama vd., 2001; Jing vd., 2014). Bunun dışında yalnızca birkaç çalışma gözenekli yapıların ışın yayma performansı üzerinedir (Li vd., 2014; Miao ve Rabiei, 2014). Chen ve arkadaşları nötronlara karşı boratlı su ve su ile doldurulmuş açık gözenekli Al köpüklerden oluşan ultra hafif yapıların mükemmel preformans sergilediklerini belirtmiştir (Şekil 2.26).



Şekil 2.26**.** Gama spektrometre sisteminin şematik diyagramı ve test edilen açık gözenekli Al Köpük numuneler (a) gama ışın kaynağı, (b) kaynak kolimatorü, (c) numune kolimatorü, (d) numune, (e) dedektör olimatorü ve (f) NaI dedektör (Miao ve Rabiei, 2014).

Hem kapalı hem de açık gözenekli metalik köpükler radyasyon zırhlama uygulamaları için potansiyel özelliklere sahip olan malzemelerdir. Özellikle kompozit metalik köpükler konvansiyonel bulk malzemelerin ve/veya diğer metal köpüklerin taşıdığı birçok özelliğin kombinasyonunu benzersiz şekilde sunmaktadır. Toz metalürjisi ve döküm teknikleri ile üretilebilen bu malzemeler yüksek dayanım ve enerji sönümleme kapasitesine sahiptir. Özellikle açık gözenekli köpüklerde geçirgen gözenekler bütünüyle mekanik ve kimyasal performansı geliştirmektedir (Liu vd., 2016; Elbir, 2003). Ülkemizde bor ve ürünlerinin çok geniş alanda kullanımı üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle nükleer sanayi için

düşünüldüğünde radyasyon soğurucu olarak da kullanılabilir olduğu tartışılmaktadır (Esmaeelzadeh vd., 2006).

2.6. Darbe Testi

Darbe problemi, iki ayrı koşula bölünerek basitleştirilebilir: büyük bir kütlenin alçak hız etkisi (düşen alet veya nesne) ve küçük bir kütlenin yüksek hızı etkisi (küçük silah ateşi, vb.). Darbe nesnesi, genellikle algılanması zor olan dahili hasara neden olabilir ve bu durum, yapının mukavemet ve istikrarında ciddi bir azalmaya neden olabilir. Bu nedenle, kompozit malzemeye çarpan yabancı cisimlerin etkisi önemli bir sorundur (Razali vd., 2014; Cantwell ve Morton, 1991).

Düşük hızlı darbeler malzeme özelliklerine, batıcı ucun kütlesine ve hedef sertliğe bağlı olarak 1-10 m/s aralığında hızlarda meydana gelebilecek olaylar olarak tanımlanır. Düşük hızlı darbeler düşük hızlı bir çarpışma olayı veya bakım faaliyetleri sırasında ortaya çıkabilir ve kompozit yapıların en tehlikeli yüklerinden biri olarak kabul edilebilir. Ağırlık düşürme darbe testi düşük hızlı darbe testleri arasında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemin uygulanması esnasında kompozit yapıların darbe davranışlarını test etmek için bir kütle belirli bir yüksekliğe kadar çıkartılır ve örnek üzerine serbestçe bırakılır. Düşük hızlı yükleme şartlarından dolayı kompozit malzemelerin arıza modlarını etkileyen birçok parametre vardır. Bu parametrelerin bazılarını numune kalınlığı, kullanılan takviye elemanının türü, batıcı ucun ağırlığı ve hızı oluşturmaktadır. Düşük hızlı darbe testleri açısından değerlendirildiğinde metallerin elastik ve plastik bölgelerdeki enerjiyi sönümlerken kompozit malzemelerin çoğunlukla elastik deformasyonda enerjiyi sönümlediği rapor edilmiştir (Safri vd., 2014; Razali vd., 2014).

Düşük hızlı darbe yüklemesi için, çarpma hızının büyüklüğü, sandviç yapının temas kuvvetini ve bükülmesini etkiler. Lee ve arkadaşları, çarpma hızının artmasıyla tepe kuvvetinin arttığını bildirmiştir (Lee vd., 1993). Darbe yüklemesi içerisinde kompozit malzemelerdeki en kritik hasar mekanizmalarından birisi tabakaların ayrılmasıdır. Kompozit yapının katmanları arasında matris çatlaklarının tetiklediği eşik enerjisi etkisiyle veya düşük darbe enerjisi nedeniyle ayrılmalar başlar. Bu ayrışmalar kompozit yapının darbe sonrası basınç direncini önemli ölçüde azaltabilir (Prichard ve Hogg,1990; Breen vd., 2005).

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Malzeme

Bu çalışmada, malzeme üretimi için dört farklı toz kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak Al7075 tozu, alaşım elemanı olarak Si tozu, köpürtücü madde olarak TiH_2 tozu ve takviye elemanı olarak B_4C tozları kullanılmıştır. Başlangıç tozlarına ait fiziksel özellikler Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Başlangıç tozlarına ait fiziksel özellikler

Toz	Boyut	Yoğunluk (g/cm^3)	Temin edildiği yer
Al7075	<150	2.81	Ecka Granules
Si	<10	2,34	Atlantic Equipment Engineers
B_4C	<10	2,52	Nurol AŞ.
TiH_2	<44	3,91	Sigma-Aldrich

3.2. Al7075 Köpük Metallerin Üretimi

Al7075 köpük metallerin üretimi için deneysel çalışmalar üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

1. Başlangıç tozlarının karıştırılması
2. Karışım tozların sıcak preslenmesi
3. Preform malzemelerin köpürtülmesi

3.2.1.Tozların karıştırılması

Al7075 köpürebilir malzeme üretimi için ağırlıkça %1 oranında TiH_2 ve %7 oranında Si tozları matris malzemesi Al7075 (AlZn5.5MgCu) tozları içerisine ilave edilerek Şekil 3.1'de verilen proje bütçesinden temin edilen turbula marka T2 F tipi üç boyutlu karıştırıcı ile 30 dakika karıştırılmıştır.



Şekil 3.1. Turbula T2 F tipi üç boyutlu toz karıştırıcı

3.2.2. Sıcak presleme işlemi

Karışım tozların sıcak olarak preslenmesinde 150 ton basma kapasitesine sahip özel yapım hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 3.2a). Karışım tozlar Şekil 3.2b'de verilen kalıp içerisinde ısıtıcı rezistans (Şekil 3.2c) yardımı ile farklı sıcaklıklarda (250^{o}C, 350^{o}C ve 450^{o}C) ve sıkıştırma basınçlarında (200, 300 ve 400 MPa) tek yönlü olarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma sonrası 60x60x12 mm^{3} boyutlarında üretilen köpürebilir preform numuneler elde edilmiştir(Şekil 3.2d).



Şekil 3.2. Tozların sıkıştırılmasında kullanılan deney seti, a)hidrolik pres, b) sıkıştırma kalıp seti, c) kalıp ısıtıcı rezistans ve d) Al7075 köpürebilir preform malzeme

3.2.3. Köpürtme işlemi

Sıkıştırma sonrası numuneler Şekil 3.3'de resmi verilen özel olarak tasarlanmış fırın içerisinde kontrollü atmosfer kullanılmadan 750^{o}C sıcaklıkta serbest halde (köpürtme kalıbı kullanılmamıştır) köpürtme işlemlerine tabi tutulmuştur. Her köpürtme işlemi için en az üç numune kullanılmıştır. Köpürtme işleminde köpürebilir malzemelerin hacimsel genleşme özelliklerini belirlemek için serbest köpürtme yapılmıştır.



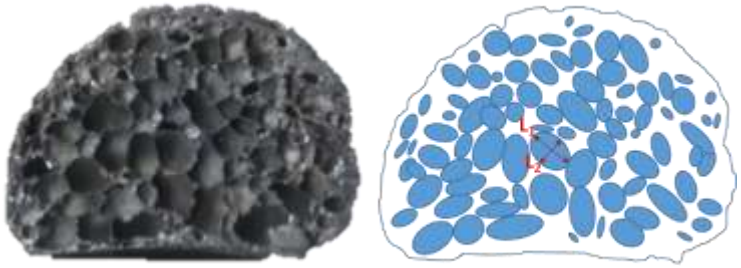
Şekil 3.3. Köpürtme işlemlerinin gerçekleştirildiği özel tasarım fırın

3.2.4. Makroyapısal Analizler

Gözenek boyutu ve gözenek şeklinin karakterizasyonu için Al7075 köpük numuneler ortadan kesilerek ara yüzeyler bir tarayıcı yardımı ile 1:1 oranında taranmıştır. Böylece Şekil 3.4'teki gibi görüntü resimleri oluşturulmuştur. Bu resimler üzerinden yapılan ölçümler ile gözenek boyutu ve gözenek şekli (küresellik) hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.2'de verilen formüllere göre yapılmıştır. Bu eşitliklerde kullanılan L_1 ve L_2; sırasıyla gözenek boyutunun enine ve boyuna uzunluğunu ifade etmekte, i ve n ise terimsel ifadelerdir.

$$Göznek\ boyutu\ (Gb) = \frac{L_1+L_2}{2} \qquad (3.1)$$

$$Ortalama\ gözenek\ boyutu\ (Gb_{ort}) = \frac{\sum_i^n Gb}{n} \quad (3.2)$$



Şekil 3.4. Al7075 köpüğün gözenek yapısı

3.2.5 Yoğunluk Ölçümü ve Genleşme Oranının Belirlenmesi

Deney boyunca üretilen köpürebilir malzemeler ve köpük numunelerin yoğunlukları Sartorius marka 0,1 mg hassasiyetteki terazi kullanılarak Arşimet prensibine göre ölçülmüştür. Hesaplamalarda Eşitlik. 3.3'te verilen formül kullanılmıştır

$$\rho_n = \frac{(m_h)}{(m_h - m_{su})} . \rho_{su} \quad (3.3)$$

Burada ρ_n; numune yoğunluğu, ρ_{su}; oda sıcaklığında suyun yoğunluğu, m_h; numunenin havadaki ağırlığı ve m_{su}; numunenin su içerisindeki ağırlığını ifade etmektedir.

Köpürme sonrası numunelerin genleşme oranları aşağıda verilen Eşitlik 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır.

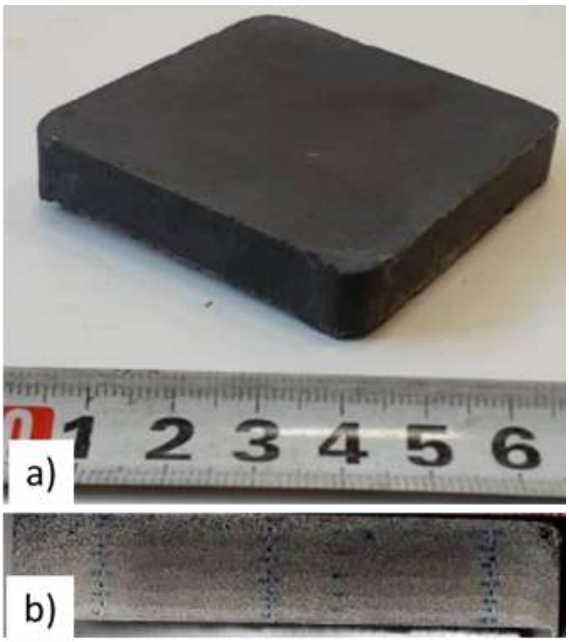
$$Hacimsel\ genleşme\ (HG) = \left(\frac{\left(\frac{m_k}{\rho_k}\right)}{\left(\frac{m_p}{\rho_p}\right)}\right) - 1 \Longrightarrow (HG) = \left(\frac{v_k}{v_p}\right) - 1 \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte ρ^*; köpük yoğunluğu, v_k; köpük hacmi, m_k köpüğün havadaki ağırlığı, ρ_p; köpürebilir malzeme yoğunluğu, v_p; köpürebilir malzeme hacmi ve m_p; köpürebilir malzemenin havadaki ağırlığıdır.

3.3. B_4C takviyeli Al7075 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin (FDM) Üretimi

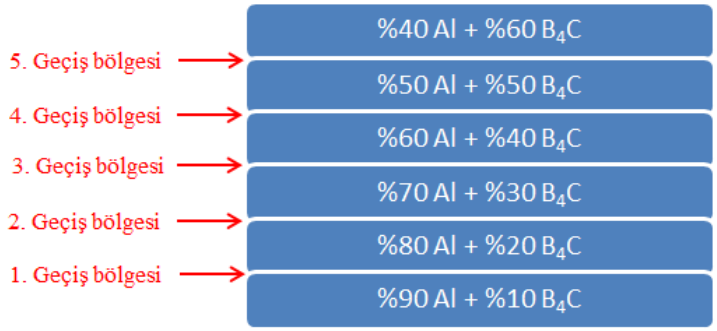
Yapılan çalışma kapsamında toz metalurjisi yöntemi kullanarak sıcak presleme ile ön alaşımlı Al7075 matrisli B_4C takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler üretilmiştir. Matris malzemesi olarak <150 μm parçacık boyutuna sahip Al 7075 tozu ve <10 μm B_4C tozları kullanılmıştır. Ağırlıkça %10 - %60 arasında değişen B_4C oranı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (FDM) kademelerini oluşturmaktadır ve her bir kademe yaklaşık 2 mm kalınlığa sahip olup toplam kalınlık 12 mm'dir.

Deneysel çalışmalarda Al7075 tozu ile B_4C tozları her kademe için ayrı ayrı tartılarak hazırlamış ve 3 boyutlu karıştırıcıda karıştırılmıştır (Şekil 3.1). Her bir kademe için ayrı ayrı hazırlanan karışım tozlar sıcak presleme kalıbı içerisine 6 kademeyi oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir. Sıcak presleme işleminde presleme sıcaklığı olarak 250, 350 ve 450^oC, presleme basıncı olarak da 200, 300 ve 400 MPa basınç değerleri kullanılmıştır. Şekil 3.5'te 60x60x12 mm ölçülerinde üretilen FDM'nin makro resmi ve kademeleri gösteren kesit görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.5. a) FDM'nin makro resmi, b) Kademeleri gösteren kesit görüntüsü

FDM'lerin kademeleri içerisinde bulunan toz miktarları ve geçiş bölgeleri Şekil 3.6'da şematik olarak gösterilmiştir. Al7075 serisi matris içerisinde bulunan B_4C parçacıkların miktarı en alt kademe de ağırlıkça %10 olmak üzere yukarı doğru %10 oranında arttırılmıştır.



Şekil 3.6. FDM kademelerinin ve geçiş bölgelerinin şematik olarak gösterimi

3.3.1 Sertlik ölçümleri

Numunelerin brinell sertlik ölçümleri, ASTM E 10 - 84'e karşılık gelen sertlik ölçüm (Emco Test Duravision 2000) cihazında 2,5 mm çapa sahip bilye tipi uç kullanarak 31.25 kgf yük altında yapılmıştır (ASTM Standartları, 1989). Sertlik ölçümleri her bir kademe ve ara yüzeyden ayrı ayrı olmak üzere beş ölçüm yapılmış ve ortalama değerler kullanılmıştır. Kullanılan sertlik ölçüm cihazının resmi Şekil 3.7'de verilmiştir.



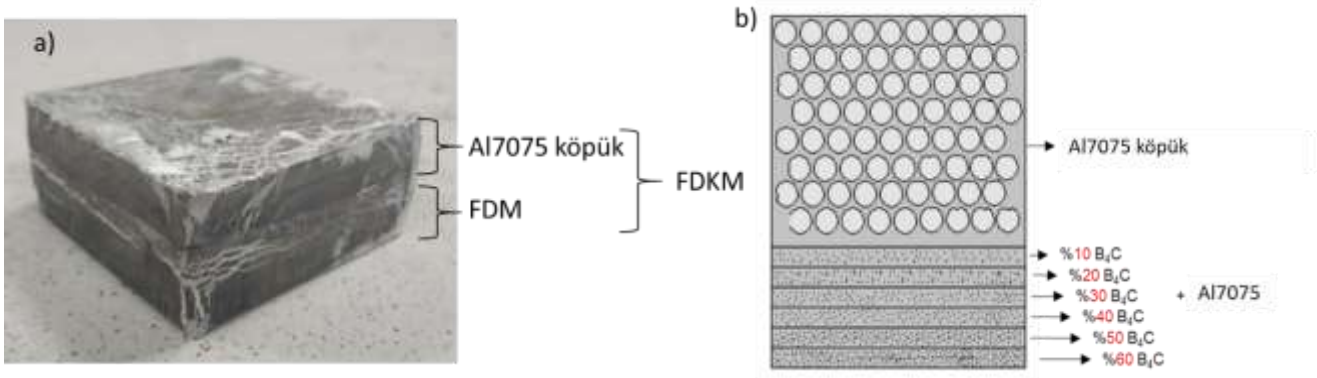
Şekil 3.7. Sertlik ölçüm cihazı

3.4. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Köpük Malzemelerin (FDKM) Üretimi

Fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzemelerin (FDKM) üretiminde tercih edilen parametreler, daha önce Al7075 köpükler ve FDM'lerin üretiminde kullanılan parametrelerin optimizasyonu sonucu seçilmiştir. Bu nedenle FDKM üretiminde sıcak presleme işlemleri 450 °C ve 400 MPa basınç altında gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça %10 - %60 arasında değişen B_4C

oranı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (FDM) kademelerini oluşturmaktadır ve her bir kademe yaklaşık 2 mm kalınlığa sahip olup yaklaşık toplam kalınlık 12 mm'dir.

Deneysel çalışmalarda Al7075 tozu ile B_4C tozları her kademe için ayrı ayrı tartılarak hazırlamış ve 3 boyutlu karıştırıcıda karıştırılmıştır. Her bir kademe için ayrı ayrı hazırlanan karışım tozlar sıcak presleme kalıbı içerisine 6 kademeyi oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir. Son kademe (7. kademe) ise Al7075 köpürebilir malzemeden oluşmaktadır. Bunun için daha önce Al7075 köpüklerin üretiminde kullanılan oranlarda (Al7075+ %1 TiH_2 + %7 Si) başlangıç tozları karıştırılmış ve son kademeyi oluşturmak için çelik kalıp içerisine doldurulmuştur. Sıkıştırma sonrası bu katmanın kalınlığı yaklaşık 3 mm'dir. Sıkıştırma sonrası numuneler daha önce Şekil 3.3'de resmi verilen özel olarak tasarlanmış fırın içerisinde kontrollü atmosfer kullanılmadan 750^oC sıcaklıkta kalınlıkları 25,4 mm (1 inç) olacak şekilde kalıp içerisinde köpürtme işlemlerine tabi tutulmuştur. Üretilen FDKM'lere ait resim ve şematik görünüm Şekil 3.8'de verilmiştir.

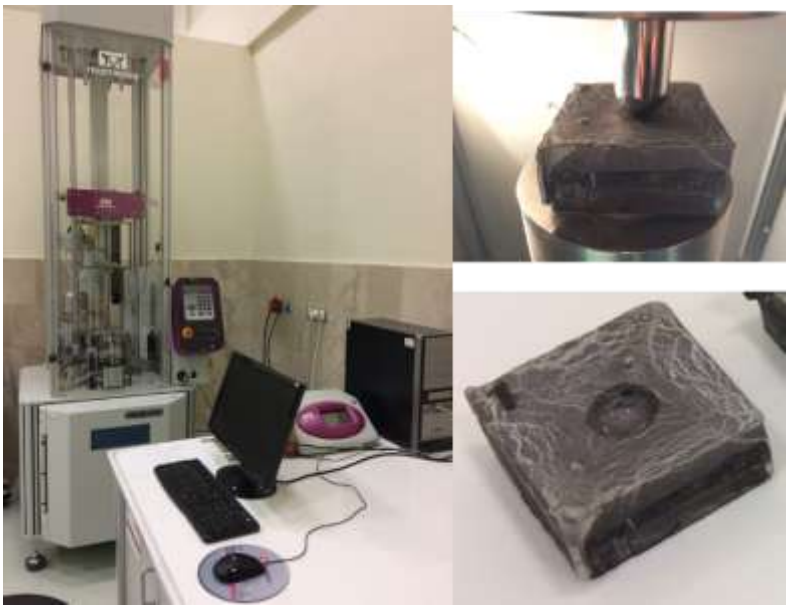


Şekil 3.8. Üretilen FDKM ve FDKM'nin şematik görünümü

3.5. Darbe Testi

Yapılan proje çalışması kapsamında Al7075 matrisli B_4C seramik parçacık takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit köpük malzemeler üretilmiştir. Üretilen FDKM'lere köpük yüzeyinden düşük hızlı darbe testi uygulanmıştır. Üretilen FDKM'ler tasarım açısından özgün yapılardır. Literatür incelendiğinde bir yarısı gözenekli köpük yapı diğer yarısı fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit yapı olan herhangi bir malzemeye rastlanmamıştır. Elde edilen düşük hızlı darbe test sonuçlarının değerlendirmeleri metalik köpük yapılara ve kompozit malzemelere uygulanan darbe testleri referans alınarak yapılmıştır.

Darbe testleri Ceast 9350 darbe test cihazı (Şekil 3.9) kullanılarak ISO 7765 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Testler FDKM'lerin köpük yüzeylerine 1.6-6.4 m/s arasında değişen darbe hızlarında gerçekleştirilmiştir. Uygulanan darbe enerjisi değerleri 10 -125 Joule aralığındadır. Deneyler esnasında çapı 25.7 mm olan yarı küresel darbe ucu kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan darbe ucunun üzerindeki aparatlar ile birlikte toplam ağırlığı bütün darbe testleri için yaklaşık 7.295 kg'dır. Darbe kuvveti, ağırlık düşürme test cihazının çarpma tertibatına monte edilen gerinim ölçer kullanılarak ölçülmüştür ve bu sinyalin zamana göre değişimi bilgisayar tarafından kaydedilerek özel bir yazılım tarafından analiz edilmiştir. Impuls veri yazılım sistemi ile maksimum yük (N), toplam çökme miktarı (mm), darbe hızı (m/s), darbe enerjisi (J), absorbe edilen enerji (J) takip edilebilir.



Şekil 3.9. Darbe test cihazı, test başlangıcında FDKM ve test sonrası FDKM

3.6. Balistik Test

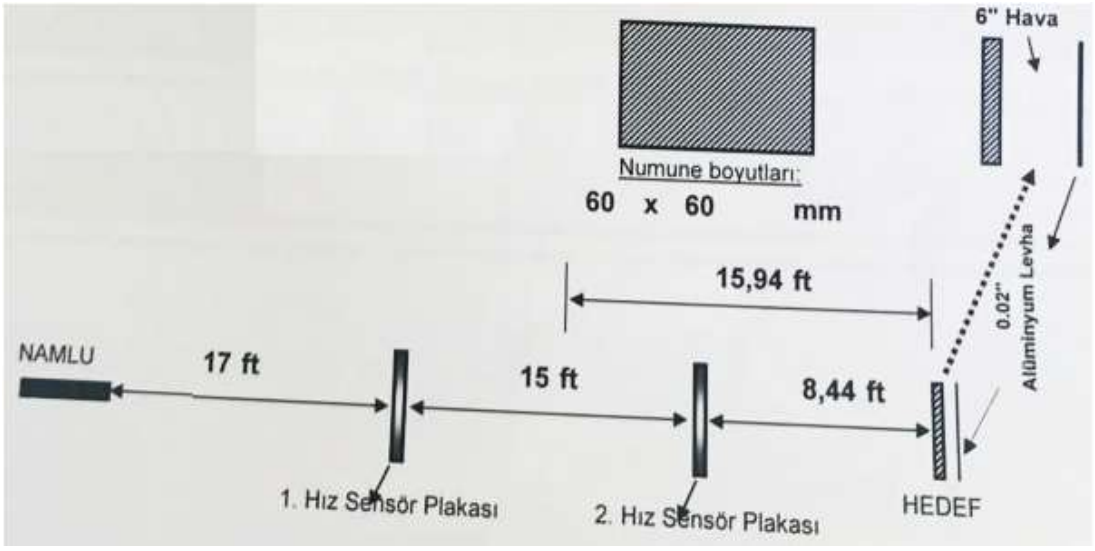
Numunelerin balistik performansını belirlemek amacıyla MIL-DTL-46063H standardına göre farklı hızlarda 7,62 mm'lik zırh delici mermiler ile hedef üzerine atışlar yapılmıştır. Balistik testler için öncelikle yaklaşık 12,7 mm kalınlığında Al7075/B_4C'den oluşan FDM'lere atışlar yapılmıştır. Daha sonra ise 25,4 mm kalınlığındaki FDKM'lere atışlar yapılarak V_{50} balistik sınır değerleri belirlenmiştir.

MIL-DTL-46063 numaralı standartta 0,5 inç kalınlığındaki numunelere 7,62-51 mm AP M2 çekirdek ile yapılacak olan atışlarda 30 derecelik atışların yapılması uygun görülmüştür. Proje kapsamında balistik testler için 0,5 inç kalınlığında numuneler hazırlanmıştır. ROKETSAN'da atış testlerinde kullanılan barut türünden dolayı çekirdeğin namludan çıkış ve

hedefe varış arasındaki sapmadan miktarının fazla olmasından dolayı 30 derecelik atışlar yapılamamıştır. Bu nedenle balistik test atışları standartlara göre 0 derecelik açılarda gerçekleştirilmiştir. Bu atışlar öncesi 30 derecelik atışlar için FNSS firması ile görüşülmüş ve görüşme neticesinde 20 adet numune için 50.000 TL civarında maliyet çıkartılmıştır. Söz konusu maliyet proje bütçesinden karşılanamayacağı için ROKETSAN firması ile iletişime geçilmiş ve yukarıda detayları verilen atış işlemleri gerçekleştirilmiştir. Atış testlerinde kullanılan 0 derecelik açı MIL-DTL-46063 standartlarında yer almadığı için bu testlerde elde edilen en yüksek V50 hızına sahip FDKM'lere 30 derecelik atışlar yapılabilmesi için FNSS firması ile tekrar iletişime geçilmiştir. FNSS Gölbaşı tesislerinde bulunan balistik test atış poligonunda FDKM'lere 30 derecelik atışlar gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar ilgili standartla karşılaştırılmıştır.

3.6.1. Balistik deney düzeneği

Balistik testler ROKETSAN ve FNSS firmasının özel olarak kurmuş olduğu balistik test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Testler sabit olarak monte edilmiş bir poligonda yapılmıştır. Sabit olan atış makinesinden zırh delmede kullanılan barut ateşlendikten sonra oluşan gaz basıncının itme etkisinden dolayı mermi kinetik bir enerji kazanır. Poligona yerleştirilen hız sensörleri merminin çıkış hızını ve hedefe varma hızını tespit eder. Namludan çıkan merminin hızını ölçmek için deney düzeneğine (poligona) 2 adet sensör yerleştirilmiştir. Sensörler arası mesafe 15 ft kadardır. Namlu ile hedef arası mesafe 17 ft kadardır. Mermi hedefe 90° dik olacak şekilde atılmıştır. Yapılan deneylerde V50 hız limitini belirleyebilmek için farklı oranlarda barut ilavesi yapılarak farklı hızlarda atışlar denenmiştir. Yapılan testlerde deney numunesi hedefe bağlanır ve atış makinesindeki mermi ateşlenir. Namludan çıkan kurşunun hızı sensörlerle ölçülür. Kurşunun hedefe çarpması sonrasında malzemede oluşturmuş olduğu tahribat göz ile muayene edilir. Balistik test düzeneği Şekil 3.10'da şematik olarak gösterilmiştir. Ayrıca Tablo 3.2'de balistik test parametreleri verilmiştir.



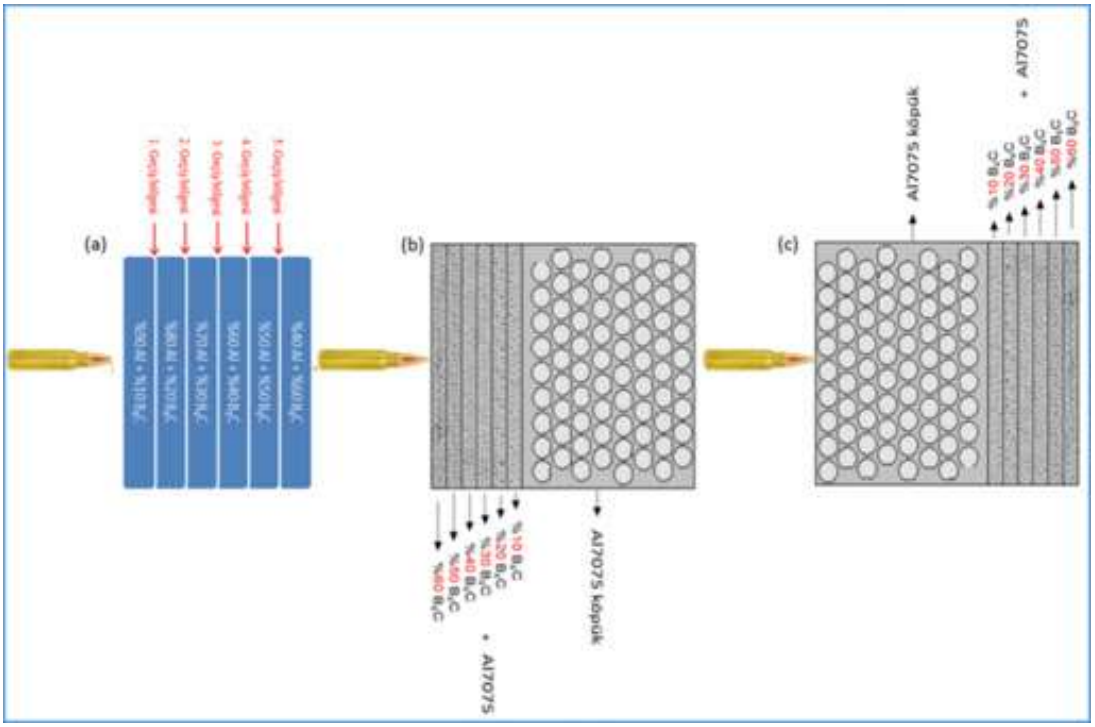
Şekil 3.10. Balistik test deney düzeneği

Tablo 3.2. Balistik test parametreleri

Test spesifikasyonu	MIL-DTL-46063H
Sıcaklık	Oda sıcaklığı
Numune boyutları	60x60x12 mm^3
	60x60x24 mm^3
Namlu tipi	28 inch OBERMAYER Cal. 0.30, 28”
Mermi tipi	7.62 mm APM2
Barut	MKE
Çekirdek ağırlığı (mg)	163,5
Mermi atış açısı	0^o
Mermi çapı (inç)	0,30

3.6.2. Balistik test numunelerinin hazırlanması

Balistik testler üç farklı malzeme grubuna atış yapılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak FDM’lere, ikinci olarak FDKM’lerin B_4C yüzeyine ve son olarak FDKM’lerin köpük yüzeyine atış yapılmıştır. Üç farklı malzeme grubuna yapılan atışlarda farklı hızlarda mermi kullanılarak malzemelerin V50 hız limitleri hesaplanmıştır. Şekil 3.12’de üç farklı şekilde atış yapılan balistik test numunelerin ve kurşunun ilk temas ettiği kesit yüzeylerin şematik görünümü verilmiştir. Şekil 3.11a’da FDM’nin %10 B_4C içeren yüzeyine (F), Şekil 3.11b’de FDKM’nin %60 B_4C içeren yüzeyine (FK*) ve Şekil 3.11c’de FDKM’nin köpük yüzeyine (FK) atılan merminin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.11. Üç farklı şekilde atış yapılan balistik test numunelerin ve kurşunun ilk temas ettiği kesit yüzeylerin şematik görünümü (a) kurşunun %10 B_4C içeren FDM ile teması, (b) kurşunun FDKM'nin %60 B_4C içeren yüzüyi ile teması, (c) kurşunun FDKM'nin köpük yüzeyi ile teması

3.7. Gama Işını Geçirgenlik Testi

Al7075 köpükler (kalınlık: 0.5 inç), FDM (kalınlık: 0.5 inç) ve FDKM'lerin (kalınlık: 1 inç) gama ışını geçirgenlik deneyleri Kastamonu Üniversitesi, Merkezi Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan (ORTEC- GEM50P4-83) Ge dedektörlü gama ölçüm sistemiyle yapılmıştır (Şekil 3.12). Bu ölçüm sistemi, enerji-duyarlı radyosyan dedektörü (Ge), sıvı azot bazlı dedektör soğutma mekanizması, dedektör tarafından üretilen sinyalleri algılayan elektronik sistem ve spektrum verilerini algılama, gösterme, saklama için yükselticilerden oluşmaktadır. Dar bir paralel ışın elde etmek için 2 mm'lik bir delik çapına sahip kurşun tutucu kullanılarak kaynak konuşlandırılmıştır. Kaynaktan 10 mm mesafede kolimator üzerine numune yerleştirilmiştir. Daha sonra foton akısı kurşun tutucudan geçirilerek detektöre ulaştırılmıştır. Deneylerde gama radyoizotop kaynakları olarak Cs-137 (662 keV), Co-60 (1173 keV) ve Na-22 (1275 keV) radyoizotopları kullanılmıştır.



Şekil 3.12. Yüksek Saflıkta Germanyum Dedektörlü Gama Ölçüm Sistemi

3.8. Mikroyapı Karakterizasyonu

Deneysel çalışmalar boyunca üretilen numunelerin (Al7075 köpükler, FDM ve FDKM) mikroyapısal analizleri SEM aracılığıyla karakterize edilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde Gazi Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan Jeol 6060 LV model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır (Şekil 3.13).

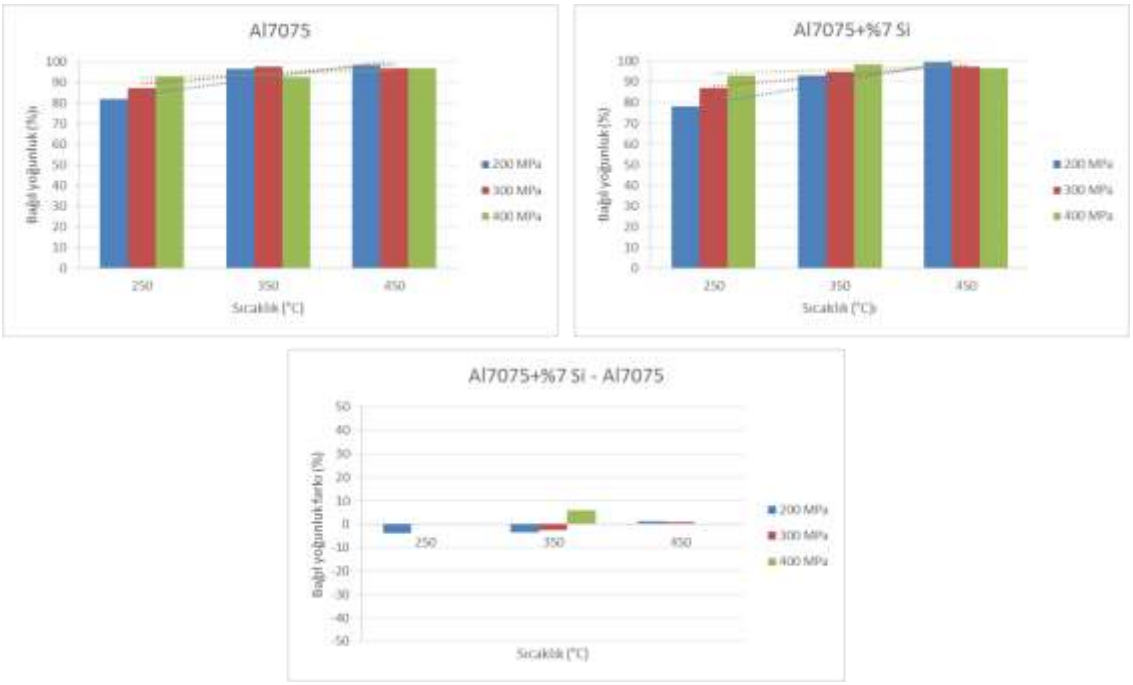


Şekil 3.13. Deneysel çalışmalarda kullanılan SEM

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Al7075 Preform Malzemelerin Köpürme Davranışı

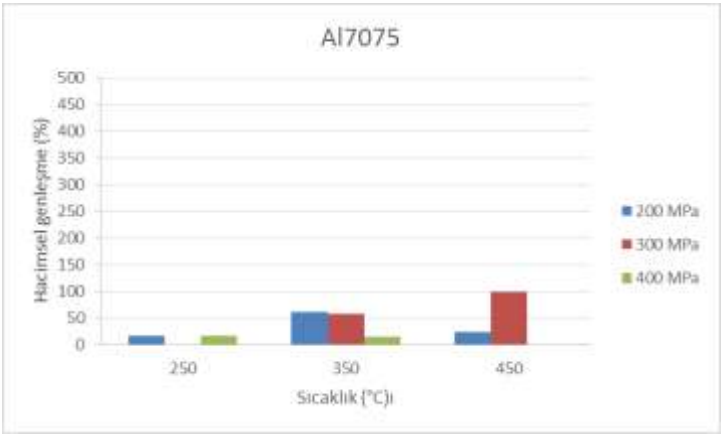
Şekil 4.1'de farklı sıcaklıklarda (250^{o}C, 350^{o}C ve 450^{o}C) ve basınçlarında (200, 300 ve 400 MPa) sıkıştırılan köpürebilir Al7075+%7Si ve Al7075 malzemelere ait bağıl yoğunluk değerleri ve bu değerler arasındaki farklar verilmiştir. Grafiklere bakıldığında her iki numune tipinde de sıcaklık artışı ile birlikte bağıl yoğunluk değerlerinin artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Sıkıştırma basınçlarında ise düşük sıcaklıklarda artan sıkıştırma basıncı ile birlikte bağıl yoğunluk değerlerinin belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenirken, sıcaklık artışı ile birlikte bu farkın değiştiği görülmektedir. Köpürebilir Al7075 malzemelerde maksimum bağıl yoğunluk değeri yaklaşık %99 (450 °C, 200 MPa), minimum değer ise yaklaşık % 82 (250 °C, 200 MPa) olarak elde edilmiştir. Köpürebilir Al7075+%7 Si malzemelerde de benzer şekilde maksimum bağıl yoğunluk değeri yaklaşık %99 (450°C, 200 MPa), minimum değer ise yaklaşık % 78 (250 °C, 200 MPa) olarak elde edilmiştir. Her iki numune türünün bağıl yoğunluk değerleri arasındaki fark karşılaştırıldığında maksimum farkın % 4'ü geçmediği tespit edilmiştir. Bu fark köpürebilirlik açısından oldukça önemlidir. Paulin ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada köpürebilir malzemelerin sıkıştırılmasında en az %98 bağıl yoğunluğun köpürebilirlik açısından iyi sonuçlar verdiğini belirtilmiştir (Paulin vd., 2011). Köpürebilir malzemelere uygulanan tek bir sıkıştırma tekniği bile köpürme davranışını etkileyebilmektedir (Bonaccorsi ve Proverbio, 2006; Güden vd., 2001) tarafından yapılan çalışmada da köpükleşmenin ancak %99'a yakın yoğunluktaki tabletlerde etkin bir şekilde oluştuğunu göstermiştir. Oysaki bu çalışmada köpürebilir malzemelerin sıkıştırma parametrelerinin yanı sıra alaşım elementlerinin de oldukça etkili olduğu görülmüştür.



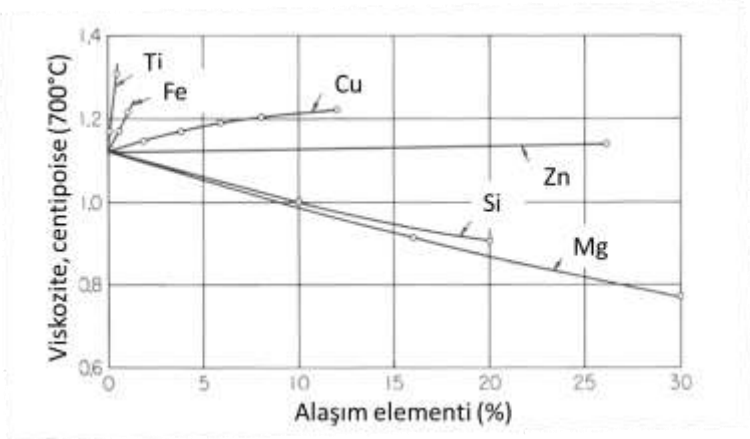
Şekil 4.1. Farklı sıcaklıklarda (250^{o}C, 350^{o}C ve 450^{o}C) ve basınçlarında (200, 300 ve 400 MPa) sıkıştırılmış köpürebilir Al7075 ve Al7075+%7 Si malzemelere ait bağıl yoğunluk değerleri

Şekil 4.2'de farklı sıcaklıklarda (250^{o}C, 350^{o}C ve 450^{o}C) ve basınçlarda (200, 300 ve 400 MPa) sıkıştırılan köpürebilir Al7075 malzemelere ait hacimsel genleşme değerleri verilmiştir. Al7075 köpürebilir malzemelerde en yüksek sıcaklık ve basınçlarda dahi önemli bir genleşme gözlenmemiştir. Bağıl yoğunluk değerleri %97'yi aşan numuneler olmasına rağmen hacimsel genleşme değerleri Al7075+%7Si köpürebilir malzemelere kıyasla oldukça düşüktür. Al7075 malzemelerde en yüksek genleşme değerine %100 ile 450°C sıcaklıkta ve 300 MPa basınçta ulaşılmıştır. Bu parametrede köpürebilir malzemenin ortalama bağıl yoğunluğu yaklaşık %97'dir. En düşük sıcaklıklarda ise numuneler kayda değer bir genleşme sergilememiştir. Bunun nedeni daha önce belirtildiği gibi düşük sıkıştırma basınçlarında ve sıcaklıklarında yeterli yoğunlaşmanın elde edilememiş olmasıdır. Ayrıca bu durum alaşım elementi silisyumun önemini ortaya koymaktadır. Al7075 alaşımları için literatürde solidüs/likidüs sıcaklıkları 476/638°C olarak belirtilmektedir (Layman, 1961). Köpükleşme sıcaklığı alaşımın solidüs/likidüs sıcaklıkları arasında ise yarı-katı ergiyik bölgede viskozite yüksek olacağından arzu edilen ölçüde genleşme beklenmemektedir. Yalnızca katı durumda genleşme gözlemlenebilir. Al7075 alaşımında solidüs sıcaklığının düşük olmasından dolayı köpükleşme esnasında TiH_2 bozunumu neticesinde salınan hidrojen gazının yapı içerisinde yeterince muhafaza edilememiş olabileceğinden dolayı yeterli köpürmenin meydana gelmediği düşünülmektedir. Köpükleşme sıcaklığı liküdüs sıcaklığının üzerinde tercih

edilmesi alaşımın viskozitesini düşüreceğinden genleşme rahatlıkla sağlanabilmektedir. İlave edilen Si parçacıkları Al7075 alaşımının solidüs-liküdüs sıcaklıkları arasındaki farkı azaltıcı yönde etki ettiği varsayılmaktadır. Bundan dolayı alaşımın viskozitesi azalacağından Al7075+%7Si malzemelerde hacimsel genleşmeler gözlemlenmiştir. Yaklaşık %7 oranında Si içeren Al356 alaşımında solidüs/likidüs sıcaklıkları 557/613 °C olarak belirtilmektedir (Layman, 1961). Şekil 4.3'te Gebhardt vd., (1955) tarafından yapılan çalışmada 700 °C sıcaklıkta Al alaşımı üzerine alaşım elementlerinin viskozite üzerine etkisi gösterilmektedir. Si ve Mg elementlerinin alaşımın viskozitesini azalttığı, Fe ve Ti elementlerinin ise artırdığı görülmektedir (Tan, 2003).



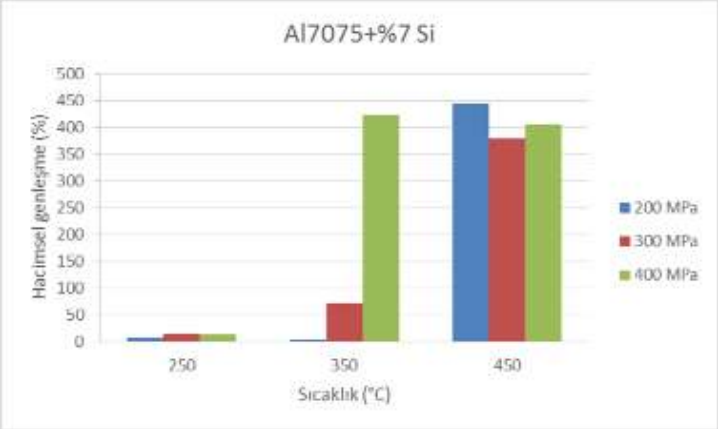
Şekil 4.2. Al7075 köpürebilir malzemelere ait hacimsel genleşme değerleri (750°C)



Şekil 4.3. 700°C sıcaklıkta Al viskozitesi üzerine alaşım elementinin etkisi (Gebhardt vd., 1955; Tan, 2003)

Şekil 4.4'te farklı sıcaklıklarda (250^{o}C, 350^{o}C ve 450^{o}C) ve basınçlarında (200, 300 ve 400 MPa) sıkıştırılan köpürebilir Al7075+%7 Si malzemelere ait hacimsel genleşme değerleri verilmiştir. Grafiklere bakıldığında presleme sıcaklığının ve basıncının köpürme davranışı için

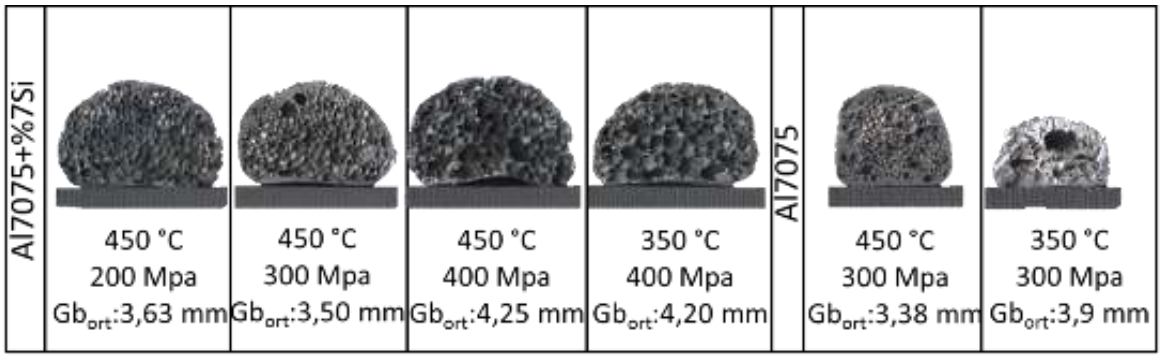
kritik birer parametre olduğu açıkça görülmektedir. Al7075+%7Si malzemelerde en yüksek genleşme değerine %446 ile 450 °C sıcaklıkta ve 200 MPa basınçta ulaşılmıştır. Aynı malzeme grubu en düşük sıcaklıklarda kayda değer genleşme sergilemezken, yalnızca 350°C sıcaklıkta ve 400 MPa basınçta önemli bir genleşme sergilemiştir. Bunun nedeni düşük sıkıştırma basınçlarında ve sıcaklıklarında yeterli yoğunlaşmanın elde edilememiş olmasıdır. Bu durumun köpürebilir malzemelerin yapısında yüksek oranda açık gözenekli yapıların oluşmasına neden olduğu varsayılmaktadır. Böylece hidrojen gazı ergiyik metal içerisinde gaz baloncuklarının genleşmesi ve oluşumunu sağlamadan, birbirleri ile kanal sistemi şeklinde ilişkili olduğu düşünülen açık gözenekli boşluklardan rahatlıkla kaçtığı düşünülmektedir. Önemli ölçüde köpürme sergileyen numunelerde yaklaşık %97 ve üzeri oranda bağıl yoğunluk elde edilmiştir. Dolayısıyla bu alaşım sistemi için %97 bağıl yoğunluk değeri tölare edilebilir sınır değeri olarak düşünülebilir. Ayrıca sıcak presleme esnasında da hidrojen gazının bir miktar bozunma neticesinde yapıdan uzaklaştığı varsayılmaktadır. Çünkü TiH_2 tozunun termal analizi bozunmanın yaklaşık 380°C'de başlayıp 570°C'ye kadar devam ettiğini göstermektedir (Duarte vd., 2000; Baumgärtner vd., 2000). Fakat bu sonuçlar serbest haldeki TiH_2 tozları için geçerlidir. Matris içerisinde gömülü TiH_2 parçacıklarında farklı sonuçlarla da karşılaşılabilir.



Şekil 4.4. Al7075+%7Si köpürebilir malzemelere ait hacimsel genleşme değerleri (750°C)

Şekil 4.5'te maksimum oranda hacimsel genleşme sergileyen numunelere ait makro yapı fotoğrafları verilmiştir. Numunelere ait her bir kesit resminin alt kısmında üretim parametreleri ve ortalama gözenek boyutu (Gb_{ort}) değerleri verilmiştir. Al7075 köpük numunelerde köpürmenin Al7075+%7Si numunelere kıyasla daha az genleşme sergiledikleri açıkça görülmektedir. Numunelerdeki boyutsal farklılık presleme sonrası üretilen köpürebilir preformların kesilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu fark hacimsel genleşme değerleri esas alındığından dolayı önemsizdir. Gözenek morfolojilerine bakıldığında Al7075+%7Si

numunelere ait gözeneklerin daha homojen dağıldığı dikkat çekmektedir. Bu durumun daha önce belirtildiği gibi Si alaşım elementinin ilavesi ile oluştuğu düşünülmektedir. Alaşım elementi ergiyik hale gelen matris malzemesinin viskozitesini düşürdüğünden, hidrojen gazının (balonların) yapı içerisinde rahatlıkla genleştiği ve iç basıncın daha kararlı hale geldiği düşünülmektedir.



Şekil 4.5 Maksimum oranda hacimsel genleşme sergileyen numunelere ait makro yapı görüntüleri

4.2. FDM'lerin SEM Analizleri

Sıcak presleme işlemi ile üretilen FDM'lerin mikroyapısal analizleri fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kademeler üzerinden ve bu kademeler arasındaki geçiş bölgeleri (GB) üzerinden yapılmıştır. Şekil 4.6'da bu bölgeler şematik olarak gösterilmektedir.



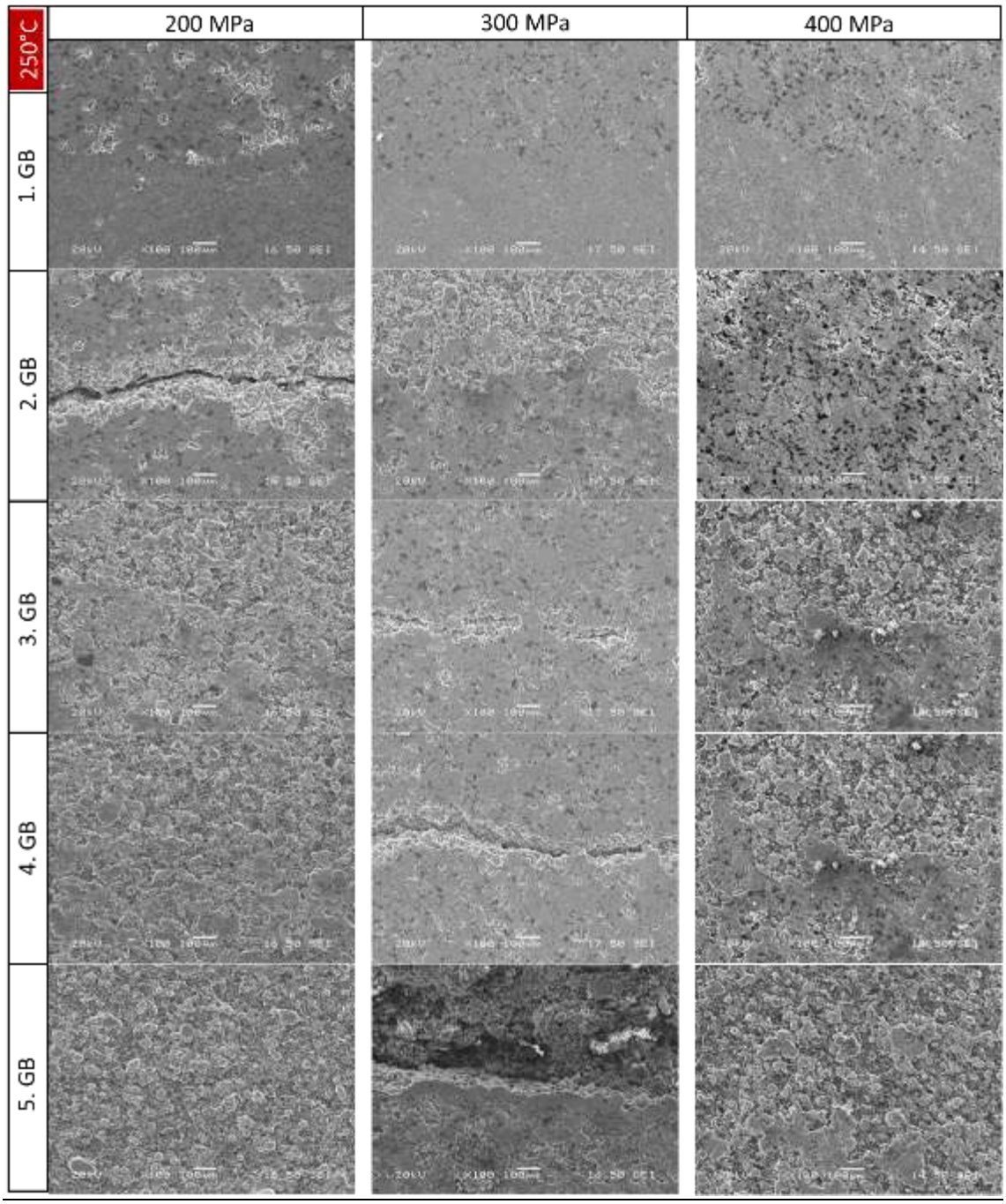
Şekil 4.6. FDM'ye ait kademelerin şematik gösterimi

Öncelikli olarak numunelerin geçiş bölgelerinden X100 oranında SEM görüntüleri alınmıştır. Elde edilen SEM görüntüleri üzerinde verilen numaralar (1-5) geçiş bölgelerini (GB) işaret etmektedir. Uygulanan tüm sıcaklık ve basınç değerlerinde artan B_4C miktarına bağlı olarak

gözenekli yapının artması ile kademeler arası geçiş bölgelerinin tespiti zorlaşmıştır. Ayrıca B_4C miktarındaki artışa paralel olarak sertliğin artması ile uygulanan basınç ile Al7075 tozlarında tabaklanmaların olduğu düşünülmektedir.

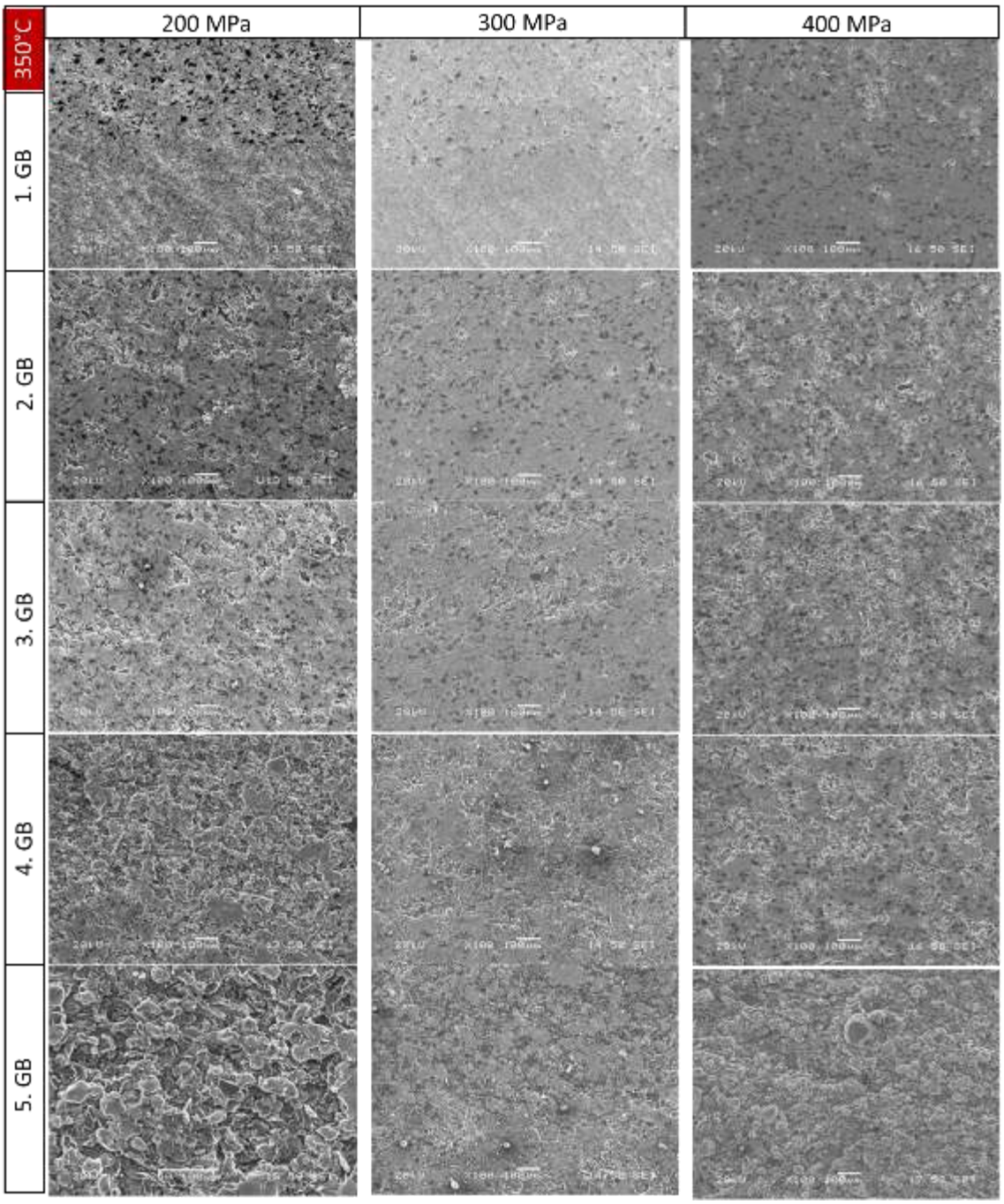
Şekil 4.7'de 250^oC sıcaklıkta 200, 300 ve 400 MPa basınç değerlerinde üretilmiş FDM'lere ait SEM görüntüleri verilmiştir. 250^oC sıcaklıkta 200 MPa presleme basıncında üretilmiş numuneye bakıldığında 1. geçiş bölgesi net bir şekilde fark edilebilmektedir. 1. geçiş bölgesinin alt kısmı ağırlıkça %10 B_4C içeren kademeyi üst kısmı ağırlıkça %20 B_4C içeren kademeyi temsil etmektedir. 250^oC sıcaklıkta bütün presleme basınçlarında 1. geçiş bölgesi net bir şekilde tespit edilebilmektedir. Ağırlıkça %10 ve %20 oranında B_4C içeren birinci ve ikinci kademelerde uygulanan sıcaklık ve basıncın yeterli geldiği düşünülmektedir. Buna karşın daha yüksek oranda B_4C içeren kademelere ait geçiş bölgeleri incelendiğinde kademeler arası çizgisel boşluklar ve uyumsuzluklar tespit edilmiştir. 250^oC sıcaklıkta 200 ve 300 MPa basınç değerlerinde üretilen numunelerin 2 - 5. geçiş bölgeleri dikkatle incelendiğinde çizgisel boşluklar açık şekilde görülebilmektedir. Ayrıca belirtilen bölgelerde gözenek miktarı ve boyutunun da arttığı tespit edilmiştir. Al7075 matris içerisinde bulunan B_4C miktarının artması ise her bir kompozit kademenin sertliğinin arttığı ve bu duruma paralel olarak sıkıştırılabilirliğinin zayıfladığı düşünülmektedir. FDM'lerin en üst kademesi olarak ifade edebileceğimiz ağırlıkça %50 ve %60 oranında B_4C içeren 5. geçiş bölgesi (5.GB) olarak gösterilen kısımlar incelendiğinde kademeler arası uyumun çok zayıf olduğu, gözenek miktarının fazla olduğu ve kademelerin birbirine difüze olmadığı tespit edilmiştir. Yüksek oranda B_4C içeren bu kademelerde sıkıştırmanın çok düşük, yoğunlaşmanın ise çok zayıf olduğu söylenebilir.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da 350 ve 450^oC sıcaklıklarda değişen basınç değerlerinde (200, 300 ve 400 MPa) üretilmiş FDM numunelere ait SEM görüntüleri sunulmuştur. 350 ve 450^oC sıcaklıkta üretilmiş numunelerde kademeler arası geçiş bölgelerinde çizgisel boşluklara rastlanmamıştır. Artan B_4C miktarına bağlı olarak 250^oC sıcaklıkta gözlenen boşluklar ve uyumsuzluklar 350 ve 450^oC sıcaklıkta üretilmiş numunelerde gözlemlenmemiştir. Özellikle 450^oC sıcaklıkta ve yüksek basınç değerlerinde üretilen FDM'lerde kademeler arası geçiş bölgelerinde iyi bir yoğunlaşma ve uyum gözlenmiştir. 450^oC sıcaklıkta üretilen numunelerde çizgisel halde fark edilen geçiş bölgeleri tespit edilmemiş ve bu duruma bağlı olarak kademelerin birbirine iyi şekilde difüze oldukları düşünülmektedir. Üretilen FDM'lerin geçiş bölgelerinde gözlenen uyumun artan sıcaklık ve basınçla arttığı tespit edilmiştir.

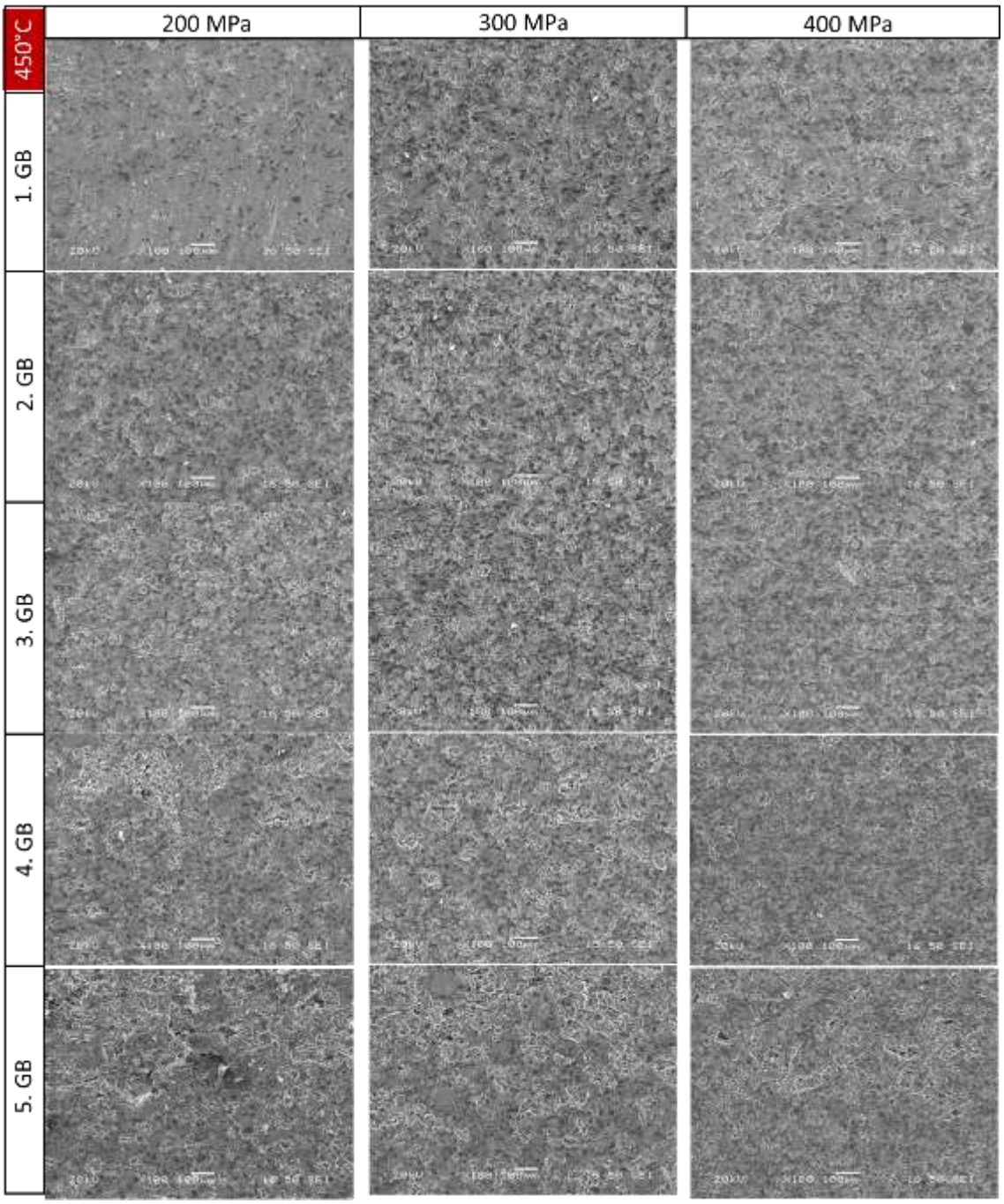


Şekil 4.7. 250^{o}C sıcaklıkta ve farklı basınçlarda üretilen numunelere ait SEM görüntüleri

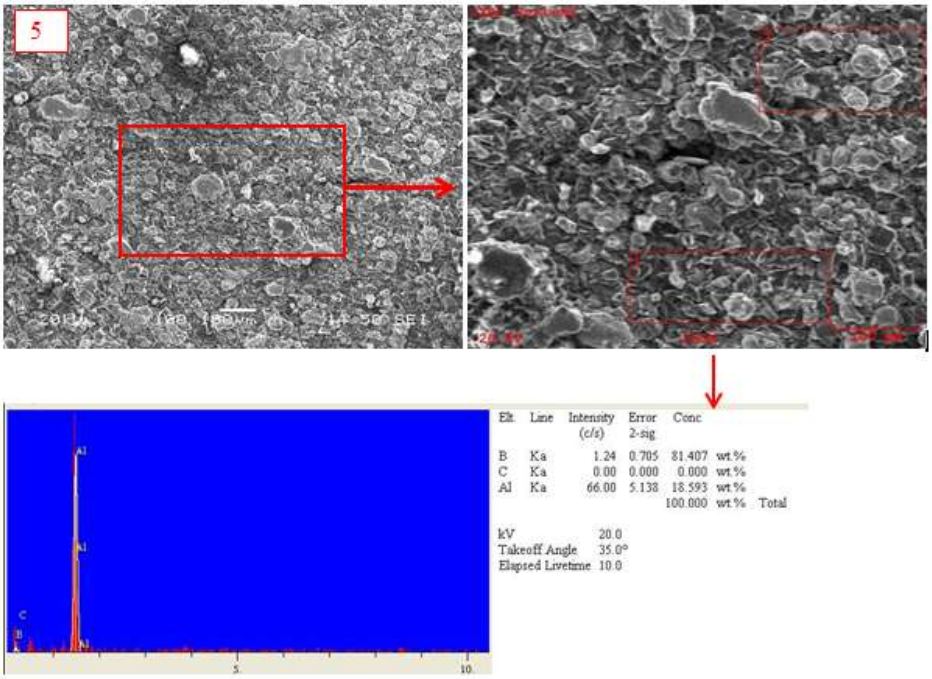
Şekil 4.10'da 400 MPa presleme basıncında 250^{o}C sıcaklıkta üretilmiş numunenin 5. geçiş bölgesinden alınan EDX analiz değeri verilmiştir. Elde edilen EDX değerleri yüksek oranda B_4C içeriğinin varlığını destekler niteliktedir. Şekil 4.11 ve 4.12'de 400 MPa presleme basıncında 350 ve 450^{o}C sıcaklıkta üretilmiş numunelere ait çizgisel EDX analiz değeri görülmektedir. Şekil 4.11 ve 4.12'de verilen EDX analizleri en düşük B_4C içeren kademeden yukarı doğru bir hat boyunca var olan B_4C miktarını temsil etmektedir. Çizgisel EDX değerleri de tabandan yukarı B_4C miktarındaki yoğunlaşmayı destekler niteliktedir.



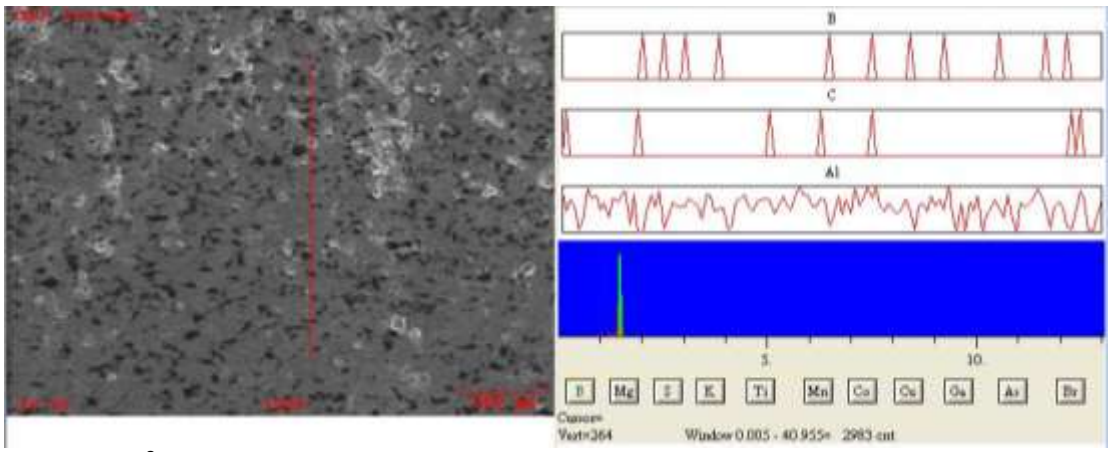
Şekil 4.8. 350^{o}C sıcaklıkta ve farklı basınçlarda üretilen numunelere ait SEM görüntüleri



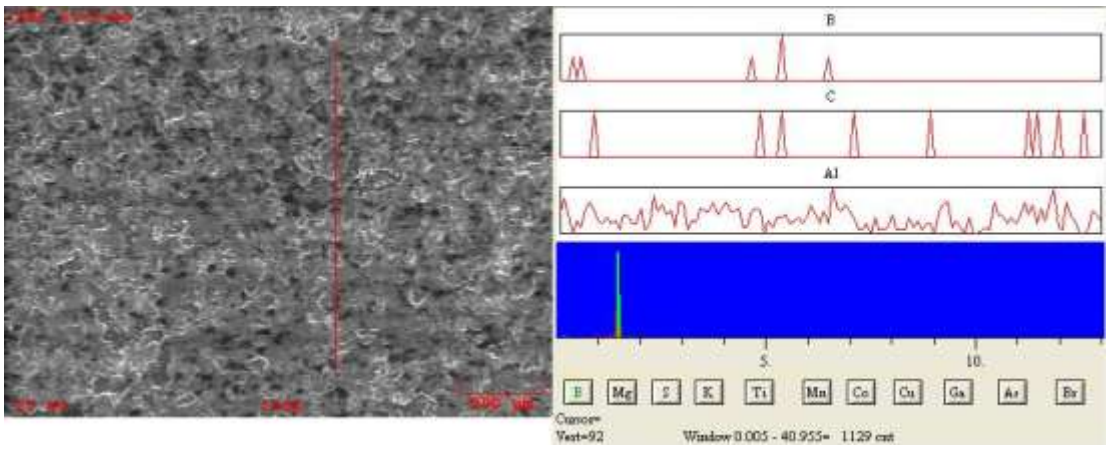
Şekil 4.9. 450^{o}C sıcaklıkta ve farklı basınçlarda üretilen numunelere ait SEM görüntüleri



Şekil 4.10. 250^{o}C sıcaklıkta 400 MPa presleme basıncında üretilmiş numune için EDX analizi



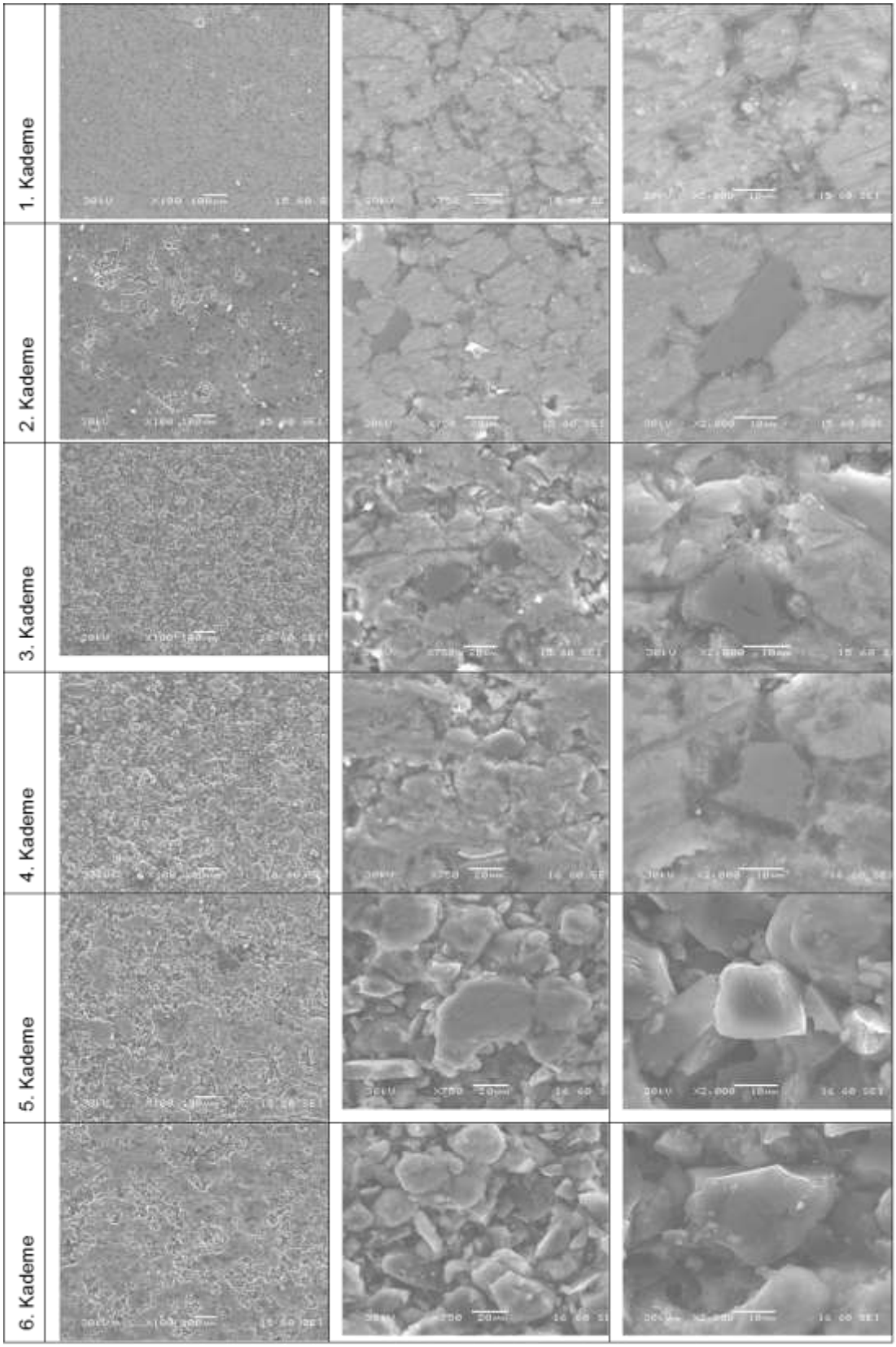
Şekil 4.11. 350^{o}C sıcaklıkta 400 MPa presleme basıncında üretilmiş numune için EDX analizi



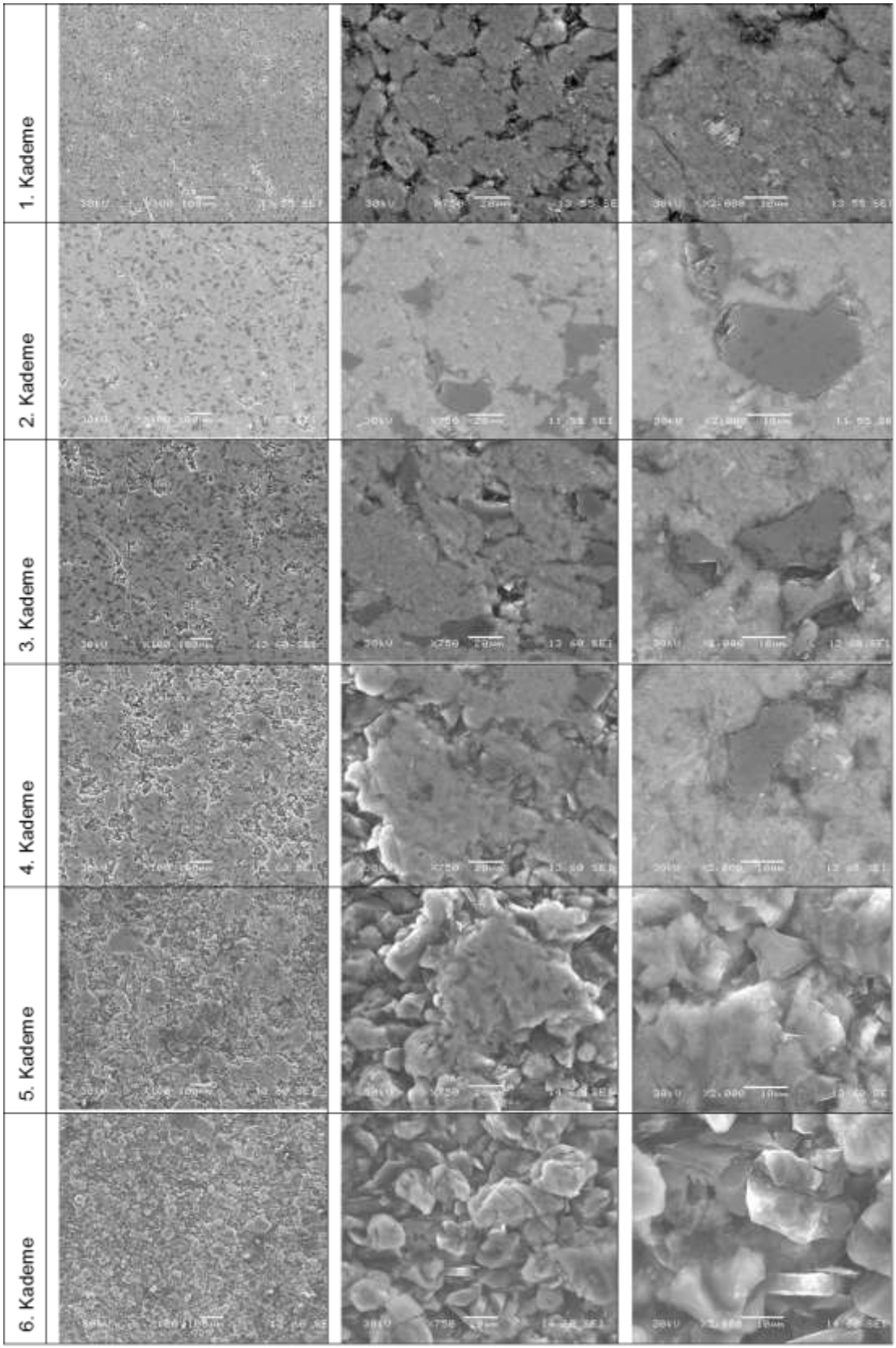
Şekil 4.12. 450^{o}C sıcaklıkta 400 MPa presleme basıncında üretilmiş numune için EDX analizi

Uygulanan presleme sıcaklığı, basıncı ve matris yapı içerisindeki B_4C miktarı FDM'lerin kademelerinde ve geçiş bölgelerinde mikroyapısal olarak farklı bölgelerin oluşmasına zemin teşkil edebilmektedir. Bu duruma paralel olarak FDM'lerin geçiş bölgeleri ve kademelerinden ayrı ayrı SEM görüntüleri alma gereği duyulmuştur. Üretilen FDM'lerin her bir kademesinden (6 kademe) farklı büyütme oranlarında (X100, 750 ve 2000) SEM görüntüleri alınmış ve elde edilen görüntüler doğrultusunda değerlendirmeler yapılmıştır. Farklı presleme sıcaklıklarında (250, 350, 450^oC) ve presleme basınçlarında (200, 300, 400 MPa) elde edilen FDM'lerin kademelerine ait SEM görüntüleri Şekil 4.13 – Şekil 4.21'de verilmiştir.

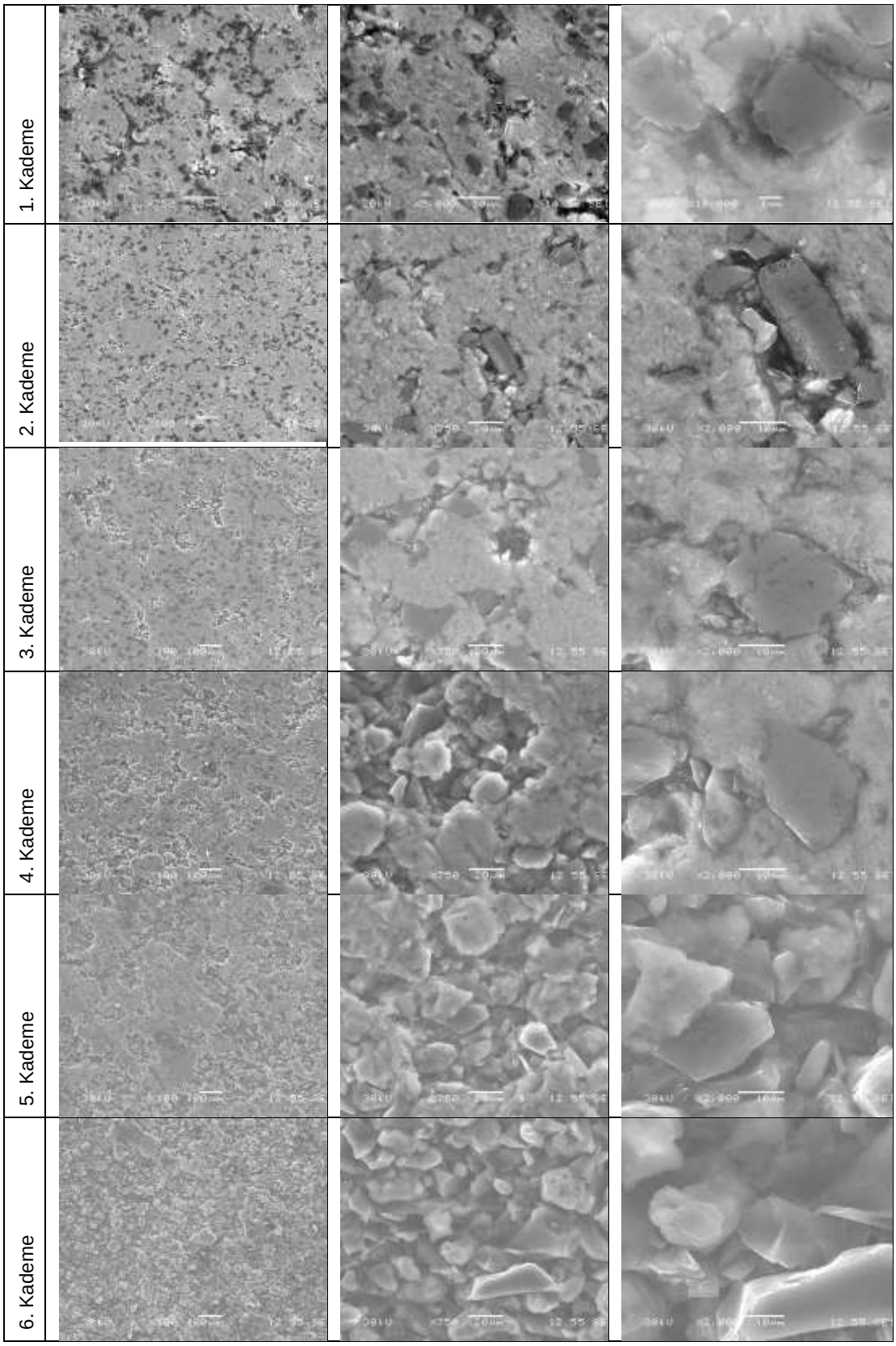
250 °C sıcaklıkta 200 ve 300 MPa basınçta ve 300°C sıcaklıkta 200 MPa basınç altında üretilen FDM' lerde 3.,4.,5. ve 6. kademeler de hem matris yapıda boşluklar hem de B_4C/matris ara yüzeylerinde uyumsuzluklar olduğu gözlemlenmiştir. Benzer durumlar 250°C sıcaklıkta 400 MPa ve 350°C sıcaklıkta 300 ve 400 MPa basınç altında üretilen FDM'lerin 4., 5., ve 6. kademelerinde de olduğu görülmüştür. 450°C sıcaklıkta 200 MPa basınç altın üretilen FDM'lerde 3.,4.,5., ve 6. kademelerinde, 300 MPa basınç altında üretilen FDM'lerde ise 4.,5. ve 6. kademelerde matris yapıda boşluklar ve partikül/matris ara yüzeylerinde uyumsuzluklar ve mikro boşluklar oluştuğu görülmüştür. Oluşan bu mikro boşluklar ve matris yapıda meydana gelen gözeneklilik hem oran bakımından hem de boyutsal olarak 250°C ve 350°C sıcaklıklarda elde edilen FDM'lere kıyasla oldukça düşüktür. 450°C sıcaklık ve 400 MPa basınç altında üretilen FDM'lerde ise matris yapıda meydana gelen gözeneklilik ve partikül/matris ara yüzeyinde oluşan mikro boşluklar oldukça azalmıştır. Kullanılan bütün basınç ve sıcaklık değerlerinde artan B_4C miktarına bağlı olarak gözenekli yapının arttığı gözlenmiştir.



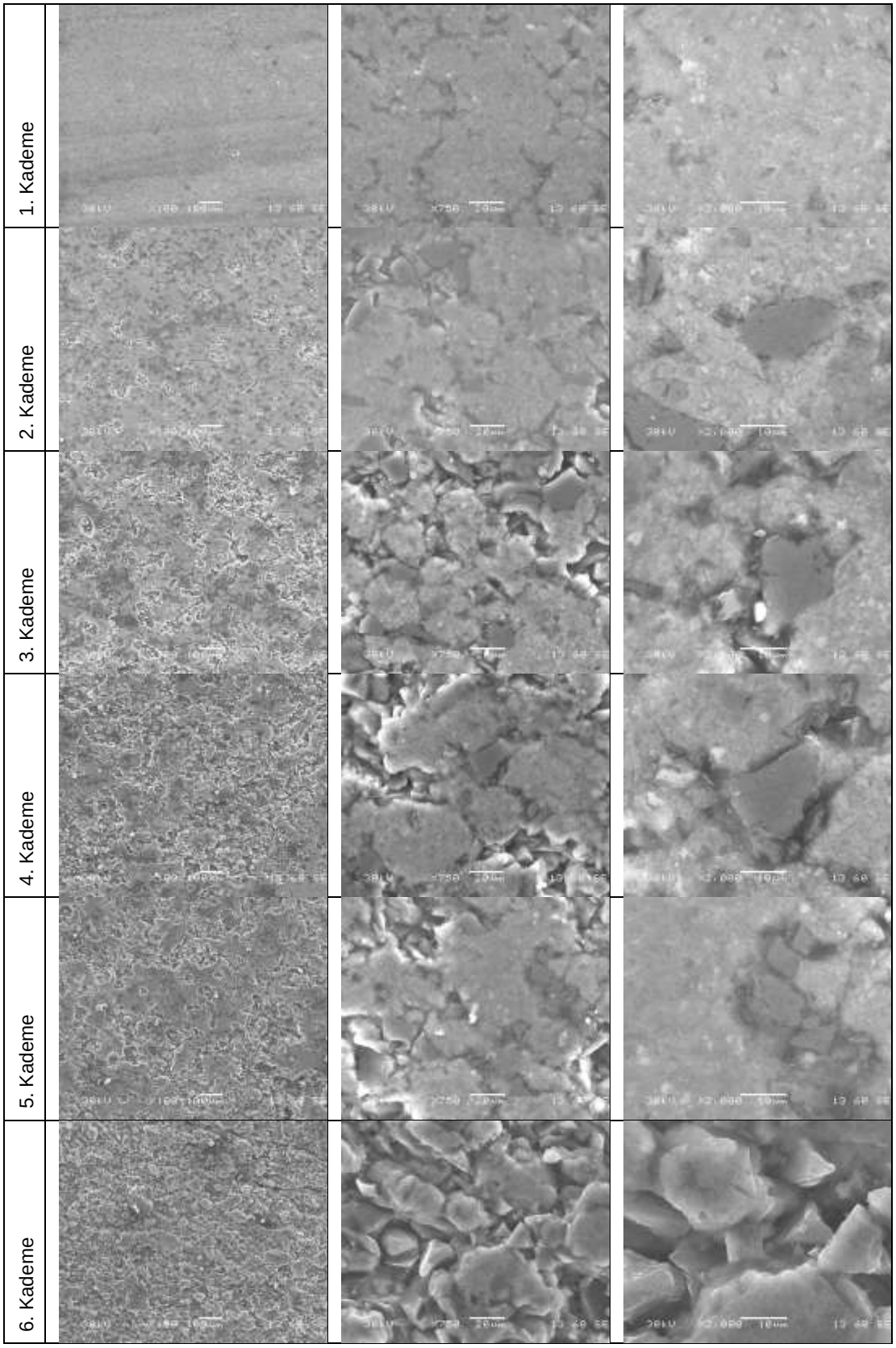
Şekil 4.13. 250^{o}C sıcaklıkta ve 200 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri



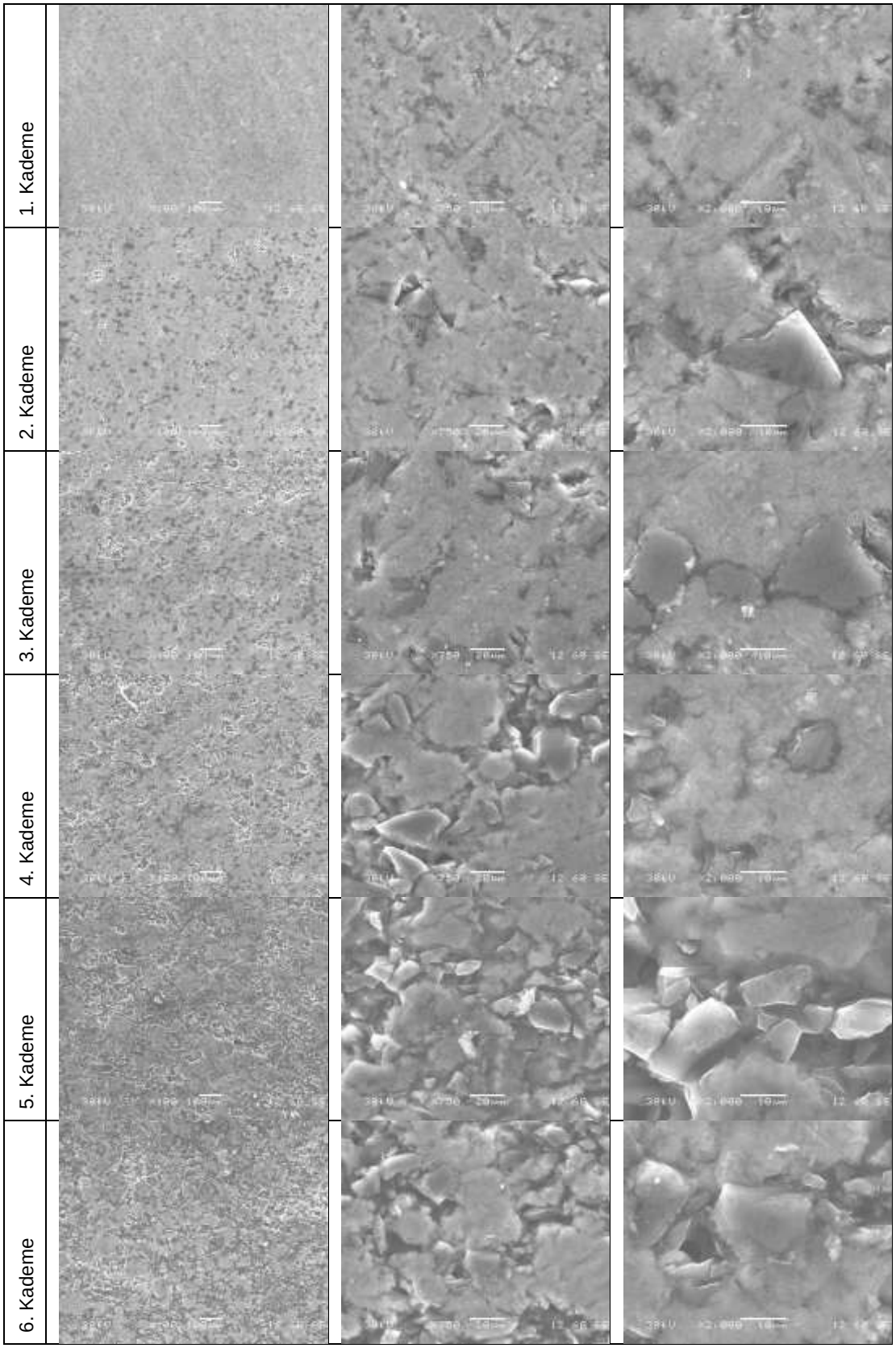
Şekil 4.14. 250^{o}C sıcaklıkta ve 300 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri



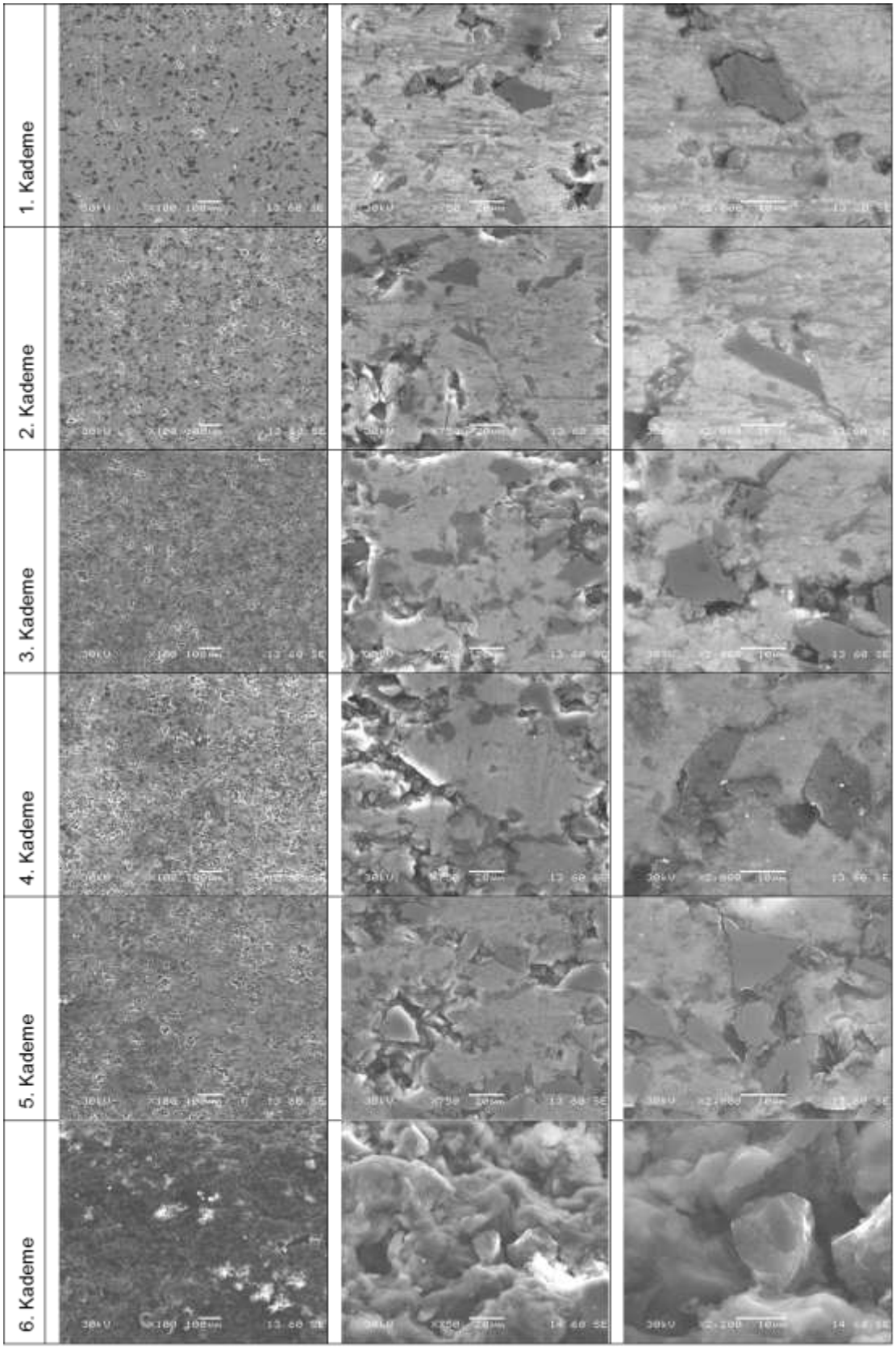
Şekil 4.15. 250^{o}C sıcaklıkta ve 400 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri



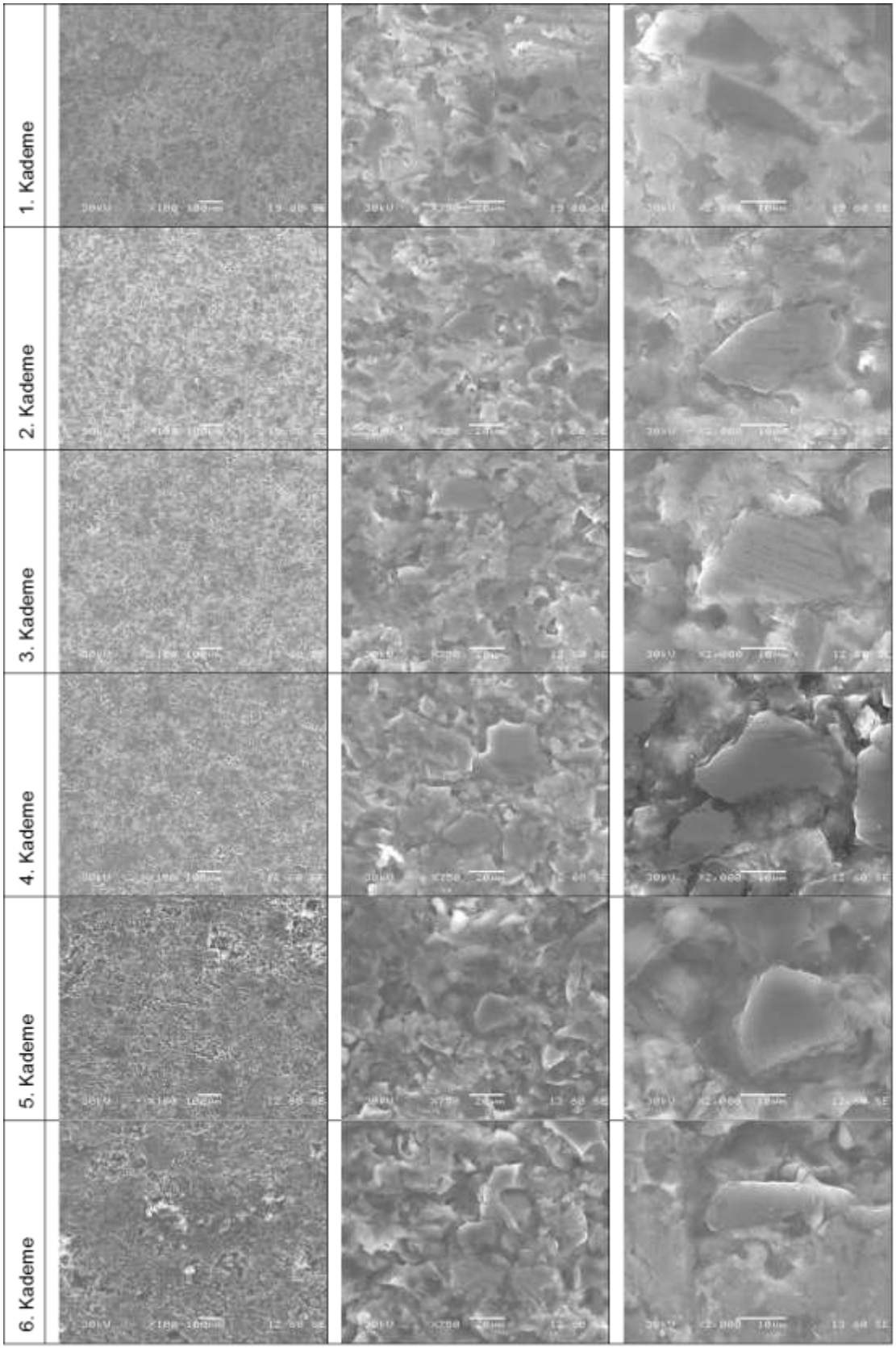
Şekil 4.16. 350^{o}C sıcaklıkta ve 200 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri



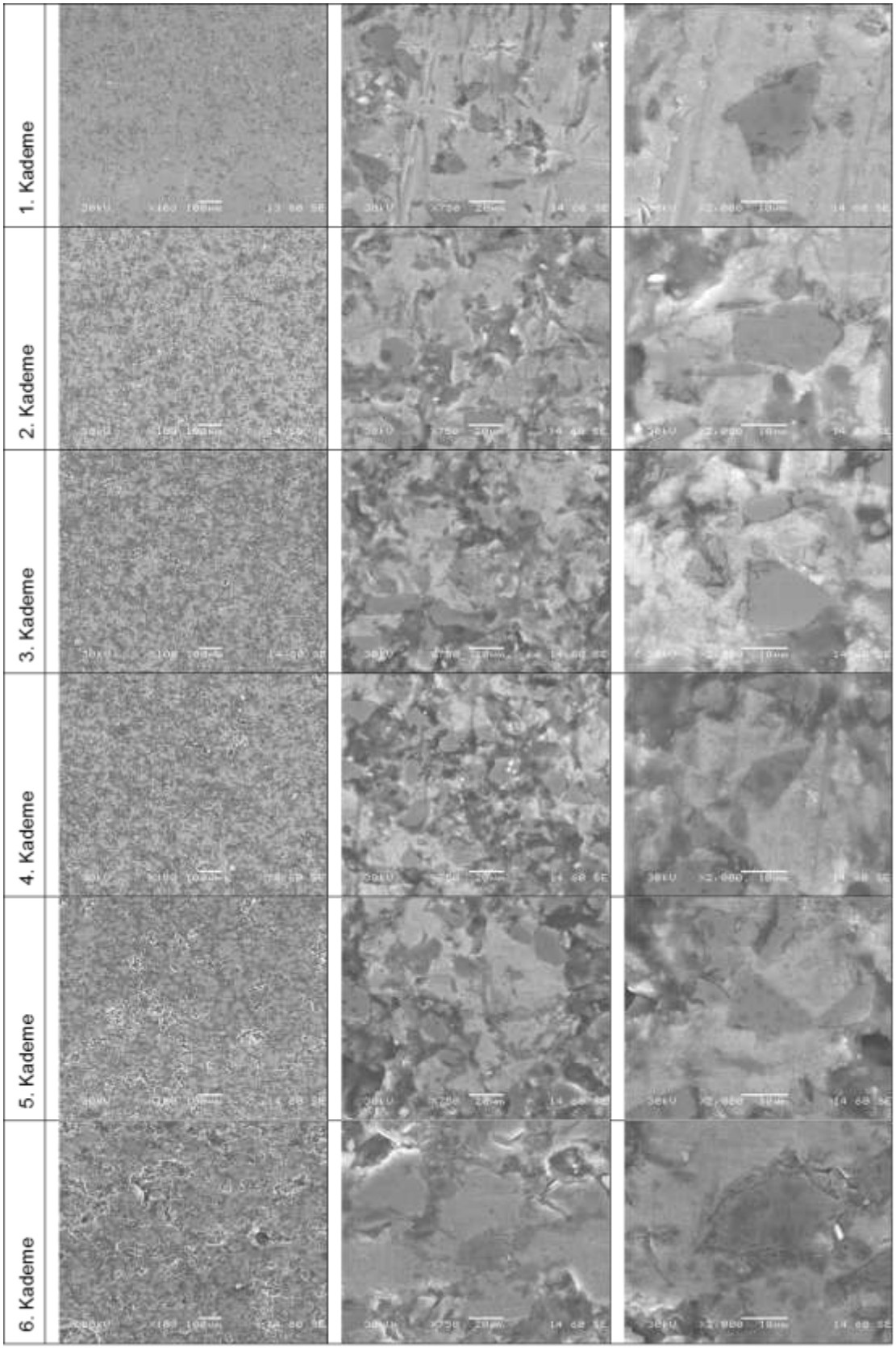
Şekil 4.17. 350^{o}C sıcaklıkta ve 300 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri



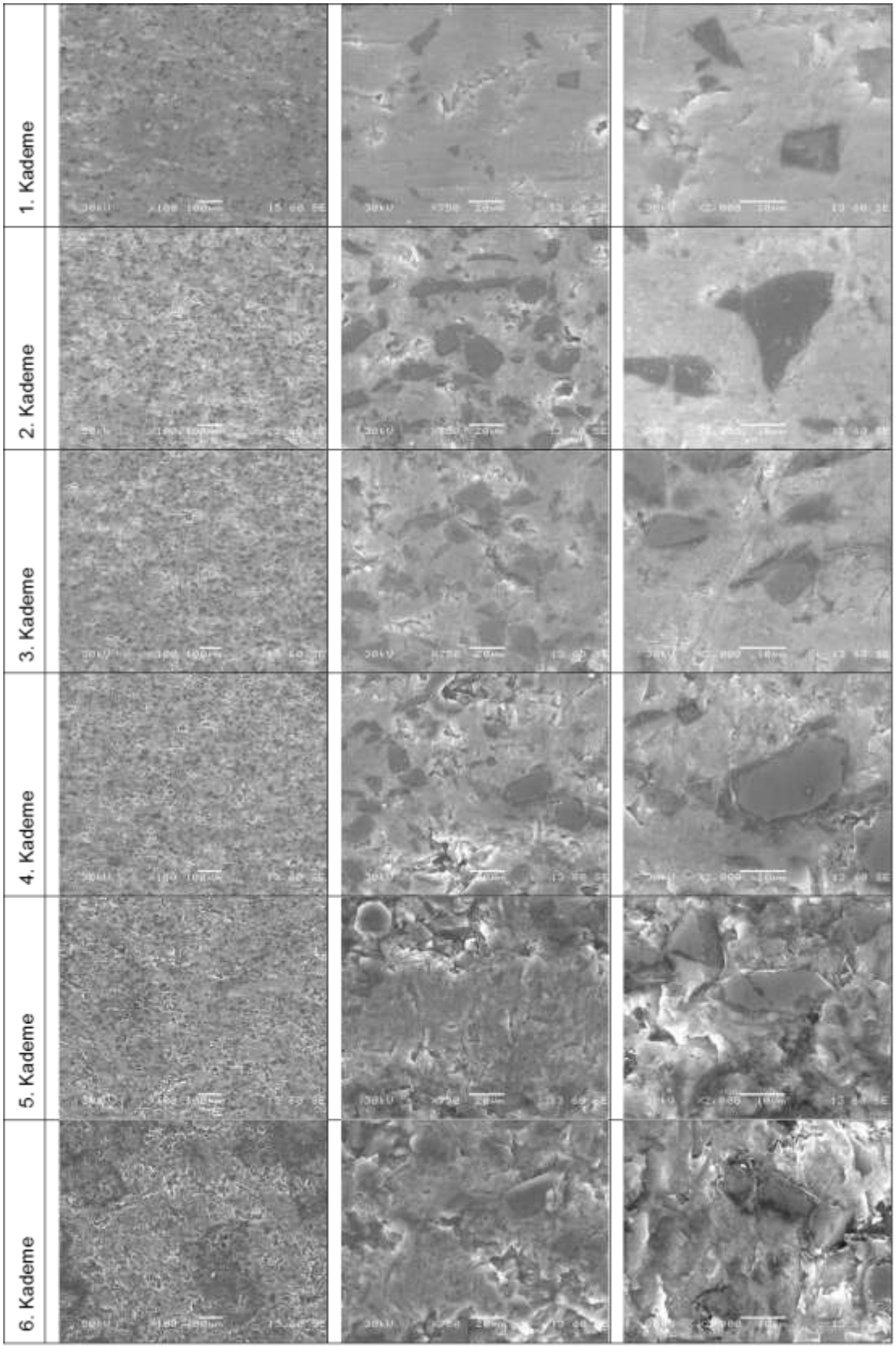
Şekil 4.18. 350^{o}C sıcaklıkta ve 400 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri



Şekil 4.19. 450^{o}C sıcaklıkta ve 200 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri



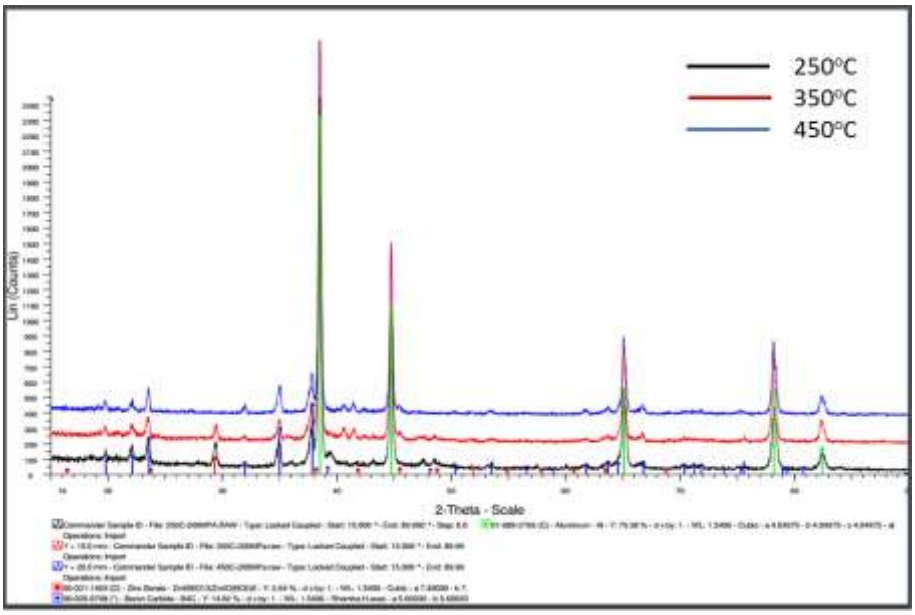
Şekil 4.20. 450^{o}C sıcaklıkta ve 300 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri



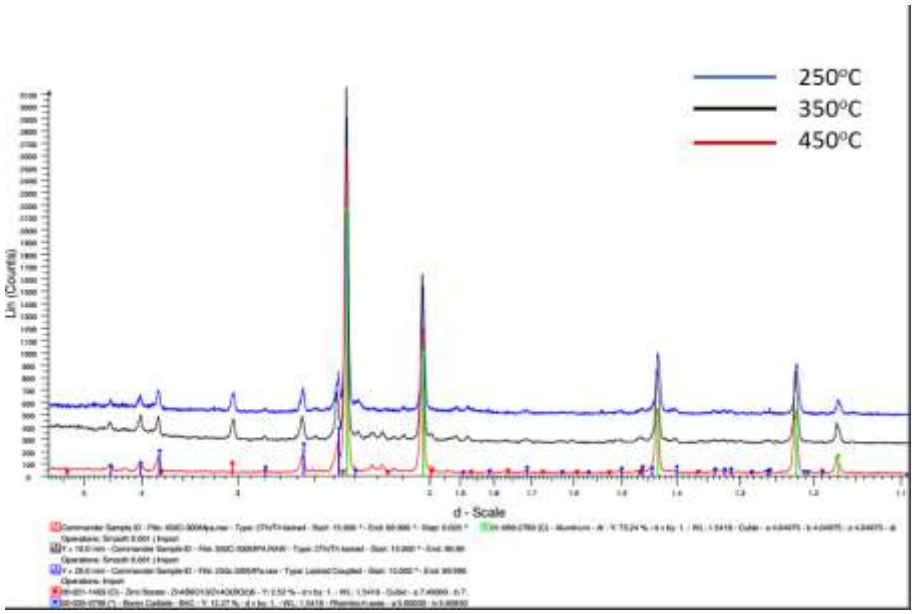
Şekil 4.21. 450^{o}C sıcaklıkta ve 400 MPa basınçta üretilen numunenin farklı kademelerine ait SEM görüntüleri

4.3. FDM'lerin XRD Analizleri

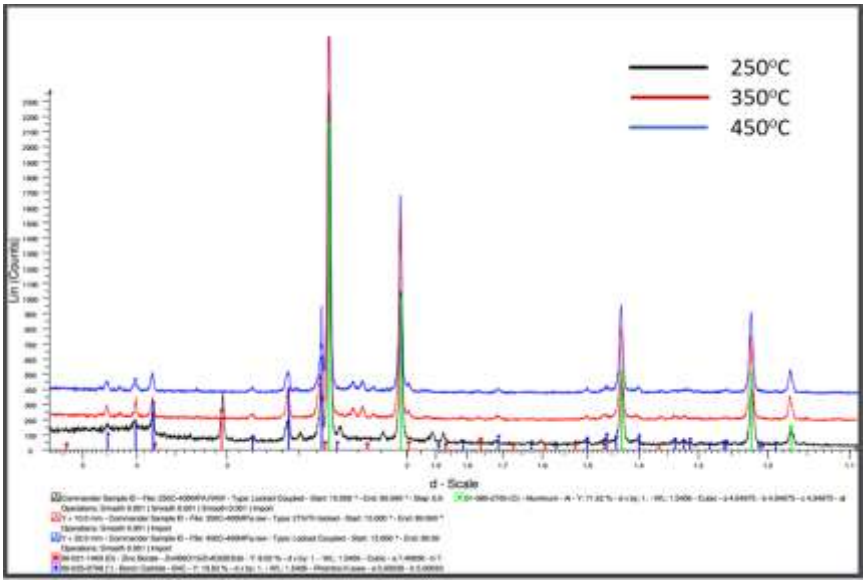
Şekil 4.22-4.24'te sabit basınç altında farklı sıcaklıklarda üretilen FDM'lere ait XRD grafikleri verilmiştir. Elde edilen grafiklerden yapılan analizler sonucunda genel olarak 38,45,65,78 ve 82 açılarında Al, 20,22,24 35 ve 36 açılarda B_4C ve 29 açısında Zn4B6O13 bileşiği oluştuğu tespit edilmiştir. 200 ve 300 MPa presleme basınçlarında 450°C presleme sıcaklığında, 400 MPa presleme basıncında ise 350°C ve 450°C sıcaklıklarda Zn4B6O13 piklerinin oluşmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.22. 200 MPa presleme basıncında ve farklı sıcaklık değerlerinde üretilen FDM'lerin XRD grafikleri

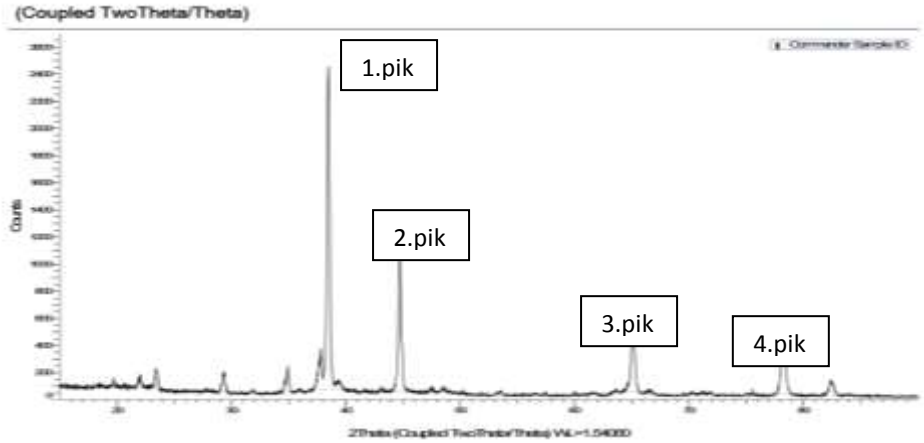


Şekil 4.23. 300 MPa presleme basıncında ve farklı sıcaklık değerlerinde üretilen FDM'lerin XRD grafikleri



Şekil 4.24. 400 MPa presleme basıncında ve farklı sıcaklık değerlerinde üretilen FDM'lerin XRD grafikleri

XRD grafiklerindeki pik şiddetlerinin belirlenebilmesi için en belirgin 4 pik kullanılmıştır (Şekil 4.25). Grafiklerden elde edilen pik şiddetleri Tabloxxx verilmiştir. Elde edilen g Grafiklerde 350°C ve 450°C sıcaklıklarda üretilen FDM'lerden elde edilen piklerin şiddetinin 250°C sıcaklıklarda elde edilen piklerin şiddetlerinden fazla olduğu söylenebilir. Ayrıca sabit sıcaklıkta presleme basıncının artması pik şiddetlerinin artmasına neden olduğu söylenebilir. Bu durumun sabit presleme basıncında sıcaklığın artmasıyla kristalografik kafes yapısının daha düzenli hale gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.Bilindiği gibi şiddet, kristal yapısına, difraksiyon düzlemlerine, difraksiyon açısına ve fazın bileşimine (kafes sabitine) bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla düşük presleme basıncı ve düşük sıcaklıklarda üretilen FDM'lerde hem gözeneklilik yüksek olması hem de yapısal düzensizliklerin fazla olması piklerin şiddetinin düşmesine neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.25. XRD grafiklerinin pik şiddetleri

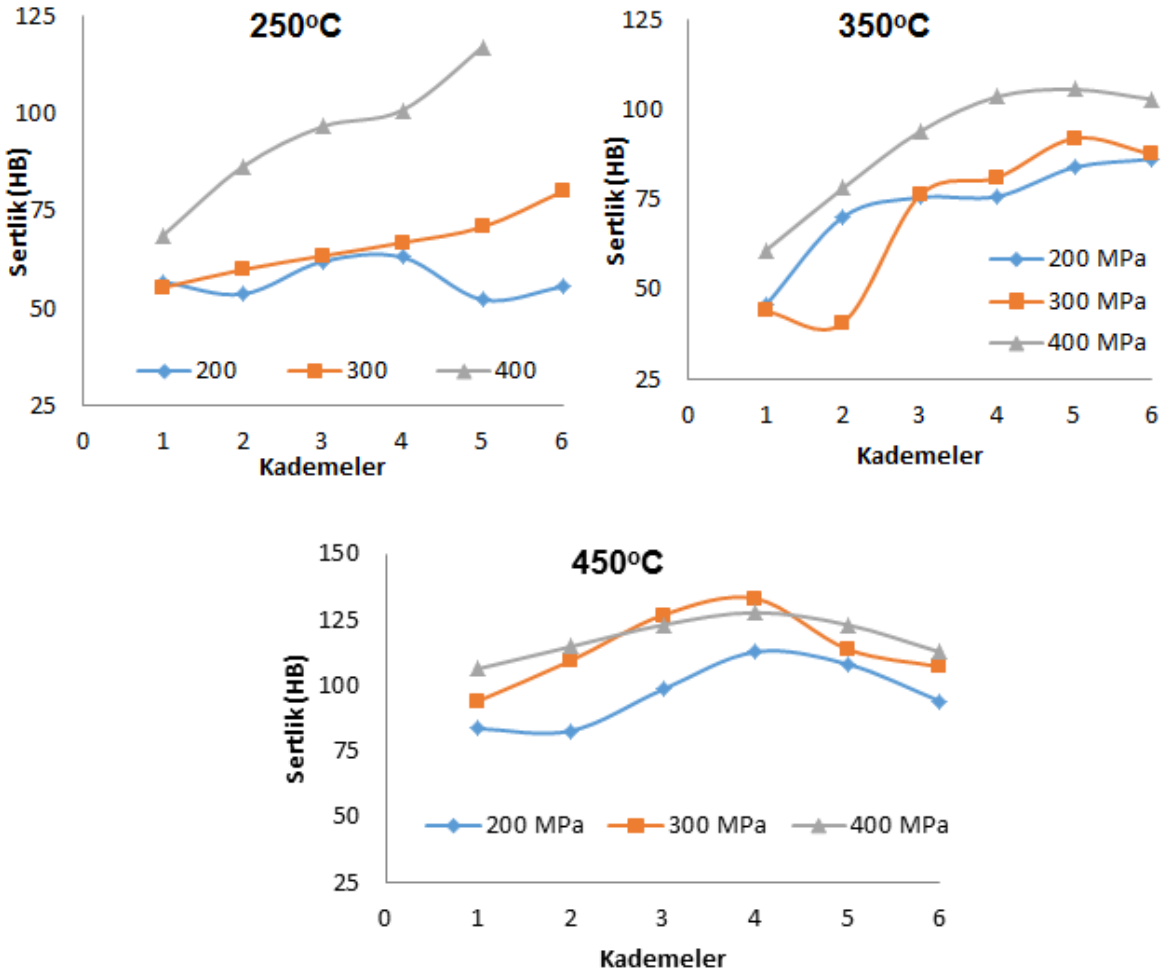
Tablo 4.1. XRD grafiklerinden elde edilen pik şiddetleri

250ºC	200 MPa	300 MPa	400 MPa
1.pik	2425	2375	2500
2.pik	1100	1050	1150
3.pik	550	500	500
4.pik	450	475	450
350^{o}C	200 MPa	300 MPa	400 MPa
1.pik	2500	2825	3000
2.pik	1150	1225	1325
3.pik	550	600	525
4.pik	500	550	500
450^{o}C	200 MPa	300 MPa	400 MPa
1.pik	2900	3000	3100
2.pik	1300	1425	1400
3.pik	650	675	650
4.pik	525	600	625

4.4. FDM'lerin Sertlik Değerleri

Şekil 4.26 ve 4.27 da farklı sıcaklık ve basınçlarda üretilen FDM'lerin kademelerinin sertlik değişimini gösteren grafikler gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, kademelerdeki partikül oranındaki artışın, sertlik değerlerinde artışa neden olduğu görülmektedir. Verilen grafiklerde sabit sıcaklıklarda presleme basıncının artmasına bağlı olarak kademelerdeki sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür. Artan presleme sıcaklığına paralel olarak FDM'lerin kademelerinin sertliğinde artış gözlenmiştir. 250^{o}C ve 350^{o}C sıcaklıklarda üretilen FDM'lerin kademelerinin sertlik değerleri kısmen yakın değerlerdeyken 450^{o}C sıcaklıklarda üretilen FDM'lerin kademelerinde sertlik değerlerinin yaklaşık olarak %20 oranında bir artış olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun, sıcaklık ve basıncın artmasına bağlı olarak matris/partikül arayüzey uyumunun ve matris yapı içerisindeki mikro boşlukların daha az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemelerin kademelerinin sertliği 40-130 HB aralığında değişmiştir. 450^{o}C sıcaklıklarda üretilen FDM'lerin kademelerinden alınan sertlik değerlerinin 75 HB'den daha düşük olmadığı görülmüştür. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Al matrisli kompozitlerde artan takviye elemanın türüne ve miktarına göre sertlikte artış olduğu bilinmektedir. Al alaşımları içerisine ilave edilen B_4C miktarına bağlı olarak sertlikte artış olduğu rapor edilmiştir (Gökmen, 2016;

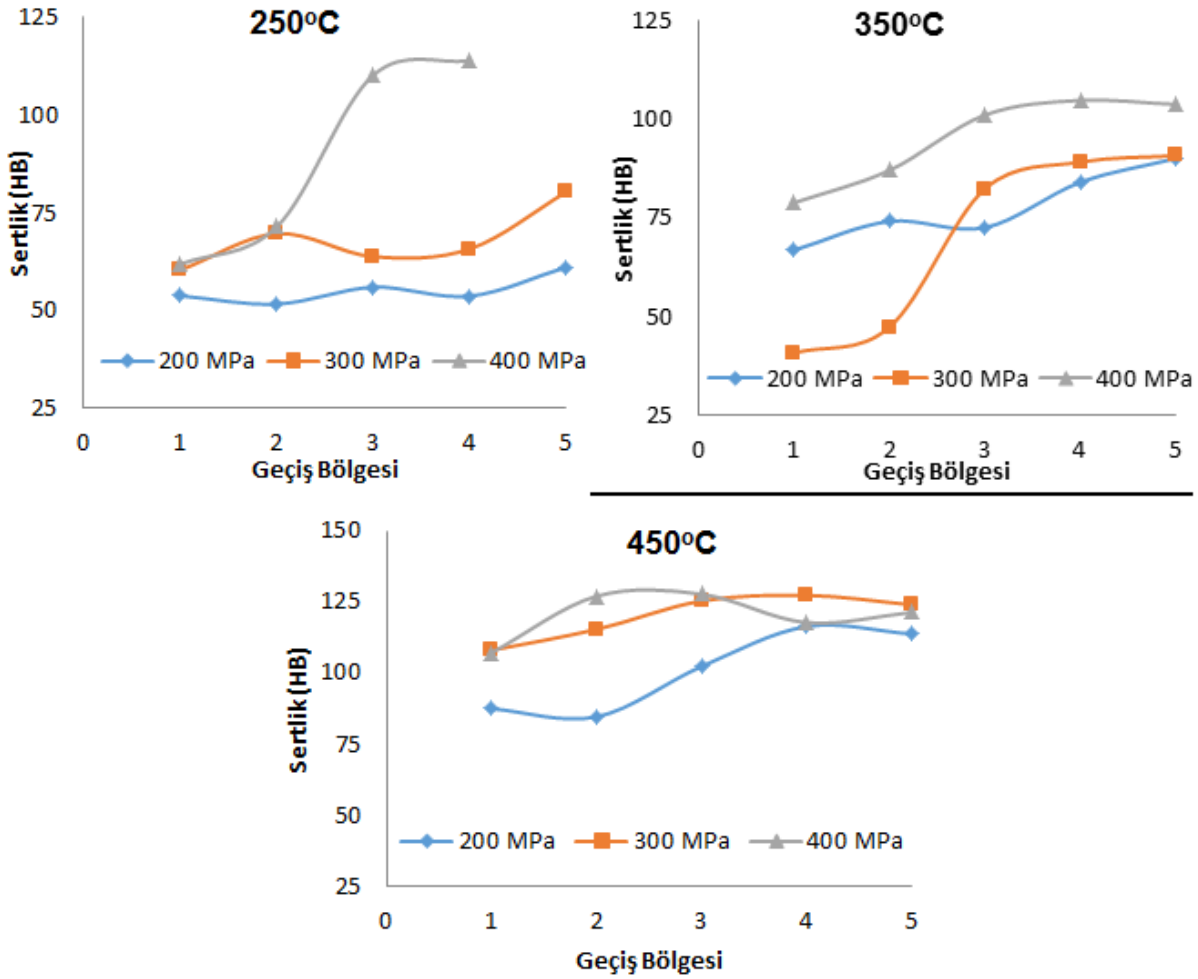
Varol vd., 2013). Bu duruma paralel olarak üretilen FDM'lerin her bir kademesi kendine özgü müstakil bir kompozit yapı olarak değerlendirilirse her bir kademe içerisindeki B_4C parçacıklarının miktarı FDM'nin sertliğini etkileyecektir. Bundan dolayı üretilen FDM'nin kademelerinin ve geçiş bölgelerinin farklı sertlik değerleri sergileyeceği düşünülmektedir.



Şekil 4.26. Farklı sıcaklık ve basınçlarda üretilen FDM'lerin kademelerinin sertlik değişimi

Şekil 4.27 de farklı sıcaklık ve basınçlarda üretilen FDM'lerin geçiş bölgelerinin sertlik değişimi verilmiştir. Geçiş bölgelerindeki sertlik değerleri partikül oranının artışına bağlı olarak artmıştır. Benzer şekilde, sabit sıcaklıklarda presleme basıncının artması geçiş bölgelerinin sertlik değerini artırmıştır. FDM'lerin her bir kademesi kendine özgü bir kompozit yapı olarak düşünüldüğünde geçiş bölgelerinde farklı sertliklerin elde edilmesi beklenilen bir durumdur. Metal matrisli kompozit yapılarda ilave edilen takviye parçacığın matris içerisinde dağılımının kompozitin mekanik özelliklerini etkilediği bilinmektedir (Iacob vd., 2015). FDM'nin geçiş bölgesinde ve kademelerinde bulunan B_4C parçacıkların durumunun sertlikte gözlenen kısmi farklılıkları temsil ettiği söylenebilir. Geçiş bölgeleri ve kademelerden alınan sertlik

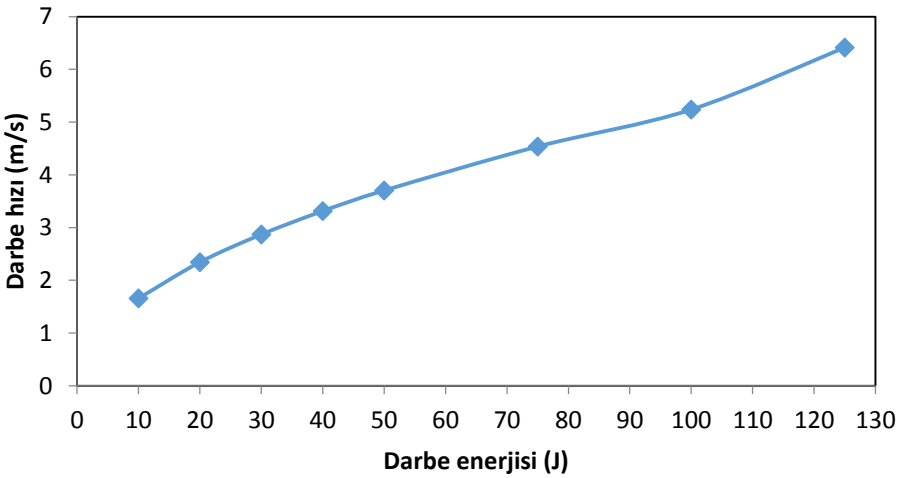
değerleri 250°C ve 350°C sıcaklıkta preslenen numunelerin sertlik değerlerine kıyasla yüksek olduğu görülmektedir. 450°C sıcaklıkta ve farklı presleme basınçlarında preslenen numunelerin sertlik değerleri farklılık göstermektedir. Örneğin geçiş bölgesinde en yüksek sertlik değeri 400 MPa presleme basıncında elde edilirken, kademelerde en yüksek sertlik değeri 300 MPa presleme basıncında elde edilmiştir. Presleme sıcaklığı arttıkça da hem geçiş bölgelerinin hem de kademelerin sertlik değerleri artmıştır. Çünkü presleme sıcaklığının artması tozların sıkıştırılabilirliğini ve yoğunluklarını artırmıştır.



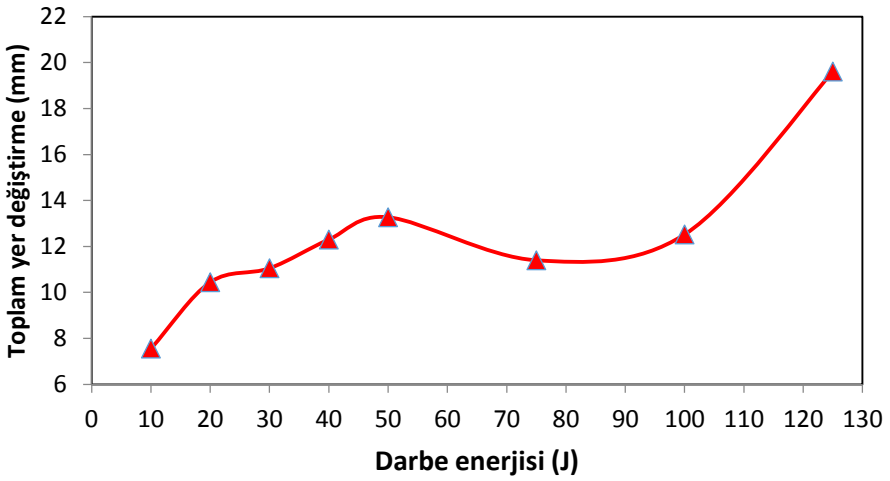
Şekil 4.27. Farklı sıcaklık ve basınçlarda üretilen FDM'lerin geçiş bölgelerinin sertlik değişimi

4.5. FDKM'lerin Düşük Hızlı Darbe Enerjileri Altında Penetrasyon Davranışı

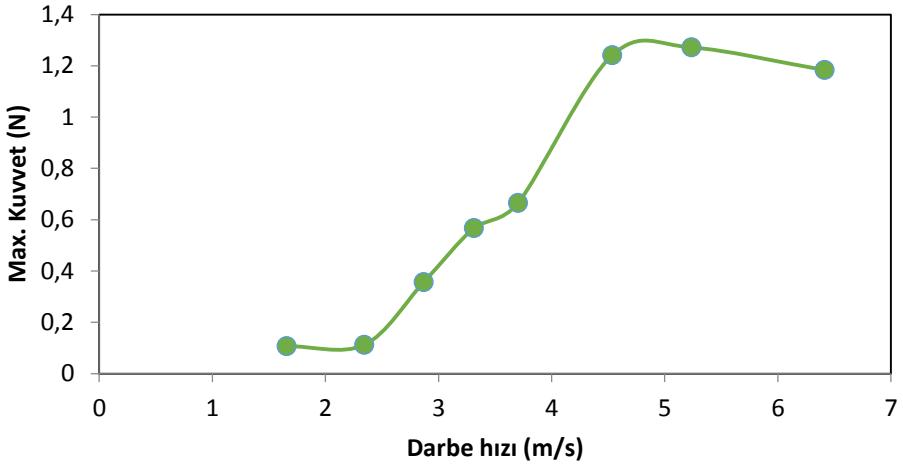
Proje çalışması kapsamında üretilen Al7075 matrisli B_4C parçacık takviyeli FDKM'lerin düşük hızlı darbe enerjileri altındaki penetrasyon davranışı incelenmiştir. Deneyler esnasında uygulanan darbe enerjisi 10-125 J aralığında darbe hızı ise 1.6-6.4 ms^{-1} aralığında değişmiştir. Artan darbe enerjisine karşın alüminyum köpüklerin darbe cevaplarını anlamakta maksimum temas kuvveti ve süresi, toplam çökme miktarı, delinme ve saplanma durumları önemli darbe karakteristikleridir (Çinici vd., 2014). Yapılan çalışma kapsamında toz metalurjisi ve sıcak presleme yöntemi ile üretilen FDKM'lere köpük yüzeyleri tarafından 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100 ve 125 J değerlerinde ağırlık düşürme testi uygulanmıştır. Darbe enerjisine bağlı olarak darbe hızı ve toplam yer değiştirme grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 4.28 ve Şekil 4.29). Şekil 4.30'da uygulanan darbe enerjisine bağlı olarak darbe hızında meydana gelen değişim gösterilmiştir. Artan darbe enerjisine paralel olarak darbe hızı lineer bir artış sergilemiştir. Şekil 4.29'da 50J darbe enerjisine kadar toplam çökme miktarının belirgin şekilde arttığı görülmektedir. 75 ve 100J'de yapılan denemelerde ise toplam çökme miktarında kısmi bir azalma gözlenmiştir. Darbe testi uygulanan numunelerin makro resimleri incelendiğinde açıkça görülecektir ki 75 ve 100 J değerlerinde yapılan denemelerde batıcı uç FDKM'nin köpük kısmını tamamen geçmiş FDM kısmına dayanmıştır ve bu duruma bağlı olarak toplam yer değiştirmede kısmi bir azalma meydana gelmiştir (Şekil 4.34).



Şekil 4.28. FDKM'nin artan darbe enerjisi ile darbe hızı ilişkisi



Şekil 4.29. FDKM'nin artan darbe enerjisi ile toplam çökme miktarı ilişkisi

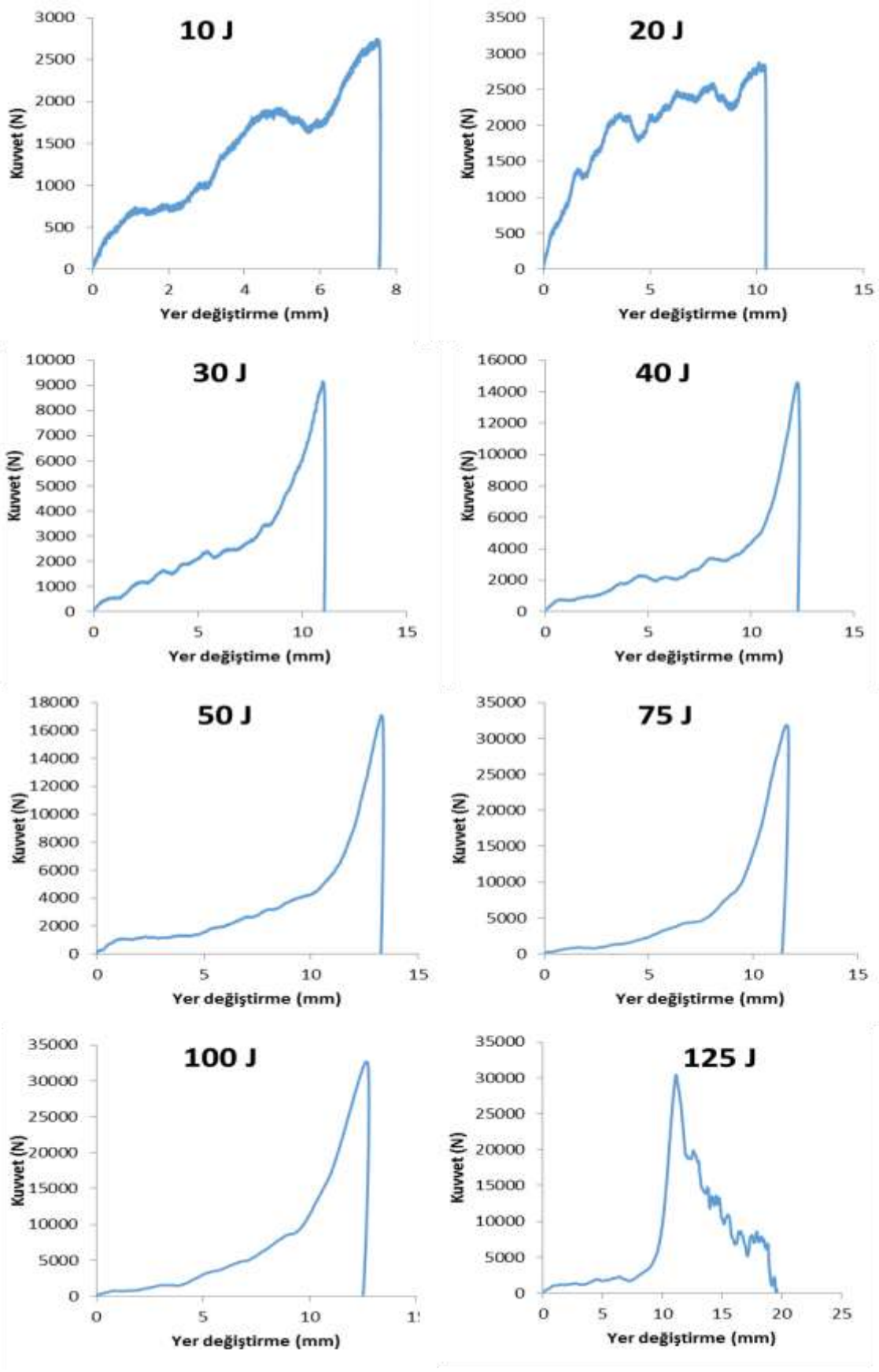


Şekil 4.30. FDKM'nin max. temas kuvveti ile darbe hızı ilişkisi

Castro ve arkadaşları infiltrasyon yöntemiyle Al 1100 ve Al 6061 matrisli 0,46 göreceli yoğunluğa sahip gözenekli yapılar üretmişler ve darbe davranışlarını inlemişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada 16,1 mm çapında yarı küresel darbe ucu kullanarak 60, 120 ve 180 J darbe enerjisi değerlerinde ağırlık düşürme testi uygulamışlardır. Uygulanan kuvvete ve batıcı ucun çökme mesafesine bağlı olarak elde ettikleri grafikler üzerinden deney sonuçlarını yorumlamışlardır. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri arasında kalan bölgenin absorbe edilen enerji olduğu ve artan darbe enerjisi ile arttığını bildirmişlerdir. Ayrıca eğrilerin üst sınırının delinme ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir (Castro vd., 2013). Benzer şekilde Liu ve arkadaşları darbe enerjisi arttıkça, emilen enerjinin çarpma enerjisine kabaca eşit olduğu bir aralık olduğunu ve uygulanan kuvvet ile delici ucun yer değiştirme eğrileri arasında kalan bu eşit enerjili aralığa bağlandığını bildirmiştir. Alt sınır penetrasyon eşiğidir ve penetrasyonun başlangıcını gösterirken üst sınır delinme ile ilişkilidir. Darbe enerjisi delinme noktasının

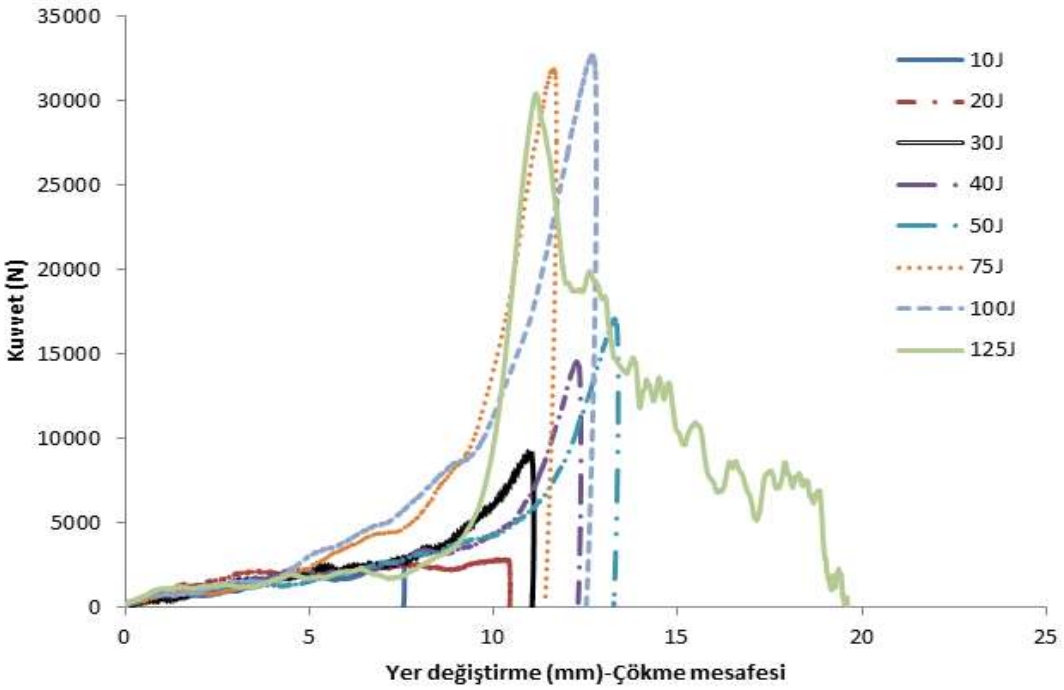
ötesinde arttıkça emilen enerji miktarı kabaca sabit kalır (delinme bölgesinde). Emilen enerji faktörü, delinme bölgesinde darbe enerjisi arttıkça azalır. Kapalı eğri ile çevrelenen alan, test sırasında absorbe edilen enerjidir. (Liu vd., 2000).

Kuvvet-çökme (F-d) eğrileri, darbe olayı esnasında alüminyum köpüğün darbe davranışına ait çarpma ucunun numuneden geri sekmesi, numuneye saplanması ve delme gibi darbe davranışları hakkında bilgi vermektedir (Çinici vd., 2014). Castro ve arkadaşlarının çalışmalarında ifade ettiği şekilde elde edilen veriler kuvvet- yer değiştirme eğrileri üzerinden değerlendirilmiştir. Farklı darbe enerjisi değerlerinde ağırlık düşürme testi sonucu elde edilen kuvvet- yer değiştirme eğrileri Şekil 4.31'de verilmiştir.



Şekil 4.31. Farklı darbe enerjilerine bağlı kuvvet-yer değiştirme grafikleri

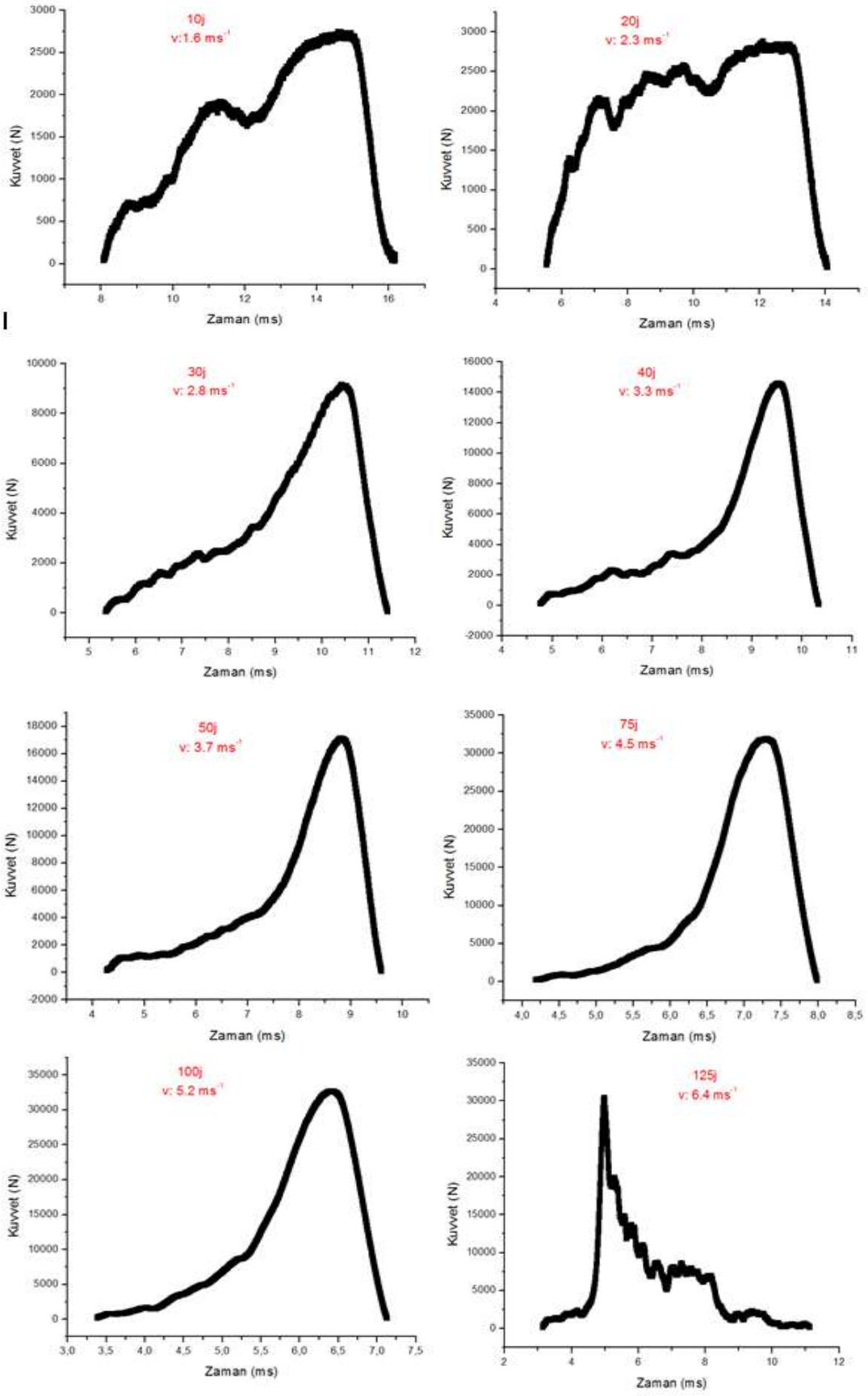
FDKM'ler 10, 20, 30, 40, 50, 75 ve 100 J darbe enerjilerine maruz kaldığında, kısmi penetrasyon oluşur. Bu durumda, kuvvet-yer değiştirme eğrileri doğrusal olarak yükselir, darbe ucu maksimum seviyeye ulaşır ve merkeze geri döner, FDKM boyunca hareket eden darbe ucu kapalı bir halka oluşturur, maksimum yer değiştirme noktasında durur ve ardından geri teper. Kuvvet-yer değiştirme grafiklerinde kapalı eğri ile çevrelenen alan, test sırasında FDKM tarafından absorbe edilen enerjidir. Bu davranış, enerji emici bir malzemenin sergileyeceği davranışını temsil eder (Castro vd., 2013). Darbe enerjisi 125 J'e yükseltildiğinde, tam delinme oluşur ve numune tarafından absorbe edilemeyen aşırı darbe enerjisi tutulamaz ve darbe ucu FDKM'yi aşar. Numune tamamen delindiğinde ise yükte bir azalma meydana gelmiştir. Bu durumda, kuvvet-yer değiştirme eğrisi artık kapalı bir halka değildir ve kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve yer değiştirme ekseni ile sınırlanan alan, delinmiş FDKM tarafından emilen enerjiyi temsil eder (Şekil 4.32). Tüm darbe enerjilerinde maksimum tepe yükünden sonra 7-14 mm'lik bir yer değiştirme gözlemlenmiştir. 100 J'e kadar olan denemelerde artan darbe enerjisine bağlı olarak absorbe edilen enerjide artış tespit edilmiştir. 125 J değerinde yapılan denemede numunelerde delinme ve akabinde parçalanma olmuştur (Şekil 4.34).



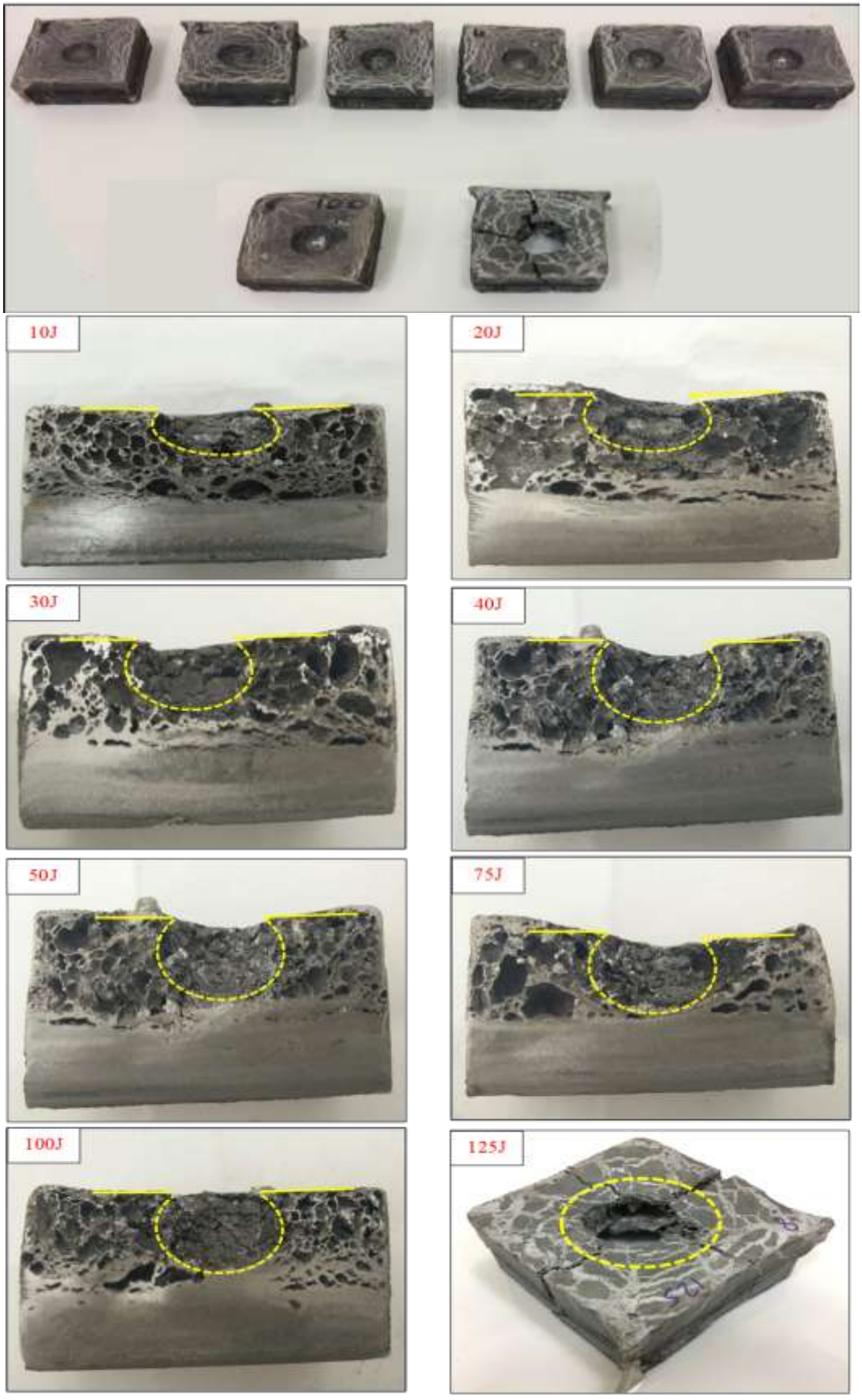
Şekil 4.32. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Şekil 4.33'de farklı darbe enerjilerinde ve darbe hızlarında yapılan testler sonucu elde edilen temas kuvveti-zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 4.33'de verilen grafikler farklı enerjilerde ve hızlara bağlı olarak temas kuvveti süresince numunelerin darbe davranışında meydana gelen değişimi ifade etmektedir. Al matrisli kompozit yapıların önemli ölçüde sünekliğe sahip olduğu ve bu duruma paralel olarak artan çarpma hızı ile temas kuvvetinin ve temas süresinin arttığı buna bağlı olarak da daha fazla enerji sönümlemesi gerçekleştiği bildirilmiştir. Dolayısıyla parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerin artan darbe enerjisi ile daha fazla plastik deformasyona maruz kaldığı ve bu duruma paralel olarak darbe hızı ile metal matrisli kompozit yapının darbe bölgesinin kademeli olarak büyüdüğünü rapor edilmiştir. Bu yüzden parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerin darbe davranışı üzerine darbe hızının önemli bir etkisi vardır (Ekici ve Kaburcuk, 2015). Şekil 4.33'de görüldüğü üzere 1.6-5.2 ms^{-1} hız aralığında, 100 J darbe enerjisine kadar vurucu numunelere saplanırken, 125 J darbe enerjisinde 6.4 ms^{-1} darbe hızında FDKM'lerde delinme meydana gelmiştir. Dolayısıyla düşük hızlarda bu enerji seviyesi (100 J) FDKM'ler için sınır değeri olarak değerlendirilebilir. Çarpma ucunun numunelere saplanma durumunda her darbe enerjisi için kuvvetlerde ani düşüş gözlenmiştir. Bu durum, deformasyon esnasında gözeneklerin birbiri üzerine katlanması sonucu yoğunlaşmış bölgenin oluşmasından kaynaklanmıştır (Şekil 4.34).

Darbe testi uygulanmış numunelerin makro resimleri Şekil 4.34'te sergilenmiştir, darbe enerjisi arttıkça hasar miktarının arttığı ve hasarın darbe ucu tarafından doğrudan etkilenen bölgeden daha büyük bir alana yayıldığı gözlenmiştir. 10, 20, 30, 40, 50, 75 ve 100 J darbe enerjilerinde yapılan deneylerde darbe etkisine maruz kalan bölgelerde FDKM'ler tam bir parçalanma olmadan kısmen sünek bir hasar davranışı sergilemiştir. 10, 20, 30 ve 40 J değerlerinde darbe ucu FDKM'lerin köpük kısmında kalmış ve FDM kısmına ulaşmamıştır. Artan darbe enerjisi ile birlikte batma derinli artmış ve darbe ucu FDM kısma ulaşmıştır. Darbe ucunun batması esnasında köpük kısmın hücre duvarlarının yırtılması darbe direncine katkıda bulunmuştur. 50-100 J değerlerinde yapılan testlerde darbe ucu numune kesiti boyunca hareket etmiş ilk temas ettiği bölgede ve etrafında hasar meydana gelmiştir fakat numunelerde herhangi bir parçalanma veya delinme olmamıştır. 125 J'de yapılan denemede darbe ucu numuneyi tamamen delmiş ve parçalanma meydana gelmiştir. 125 J'de yapılan deneme sonucu incelenen numunelerde özellikle FDM kısmında sünek bir kırılma tespit edilememiştir (Şekil 4.34).



Şekil 4.33. Farklı darbe hızlarında temas kuvveti-zaman grafikleri



Şekil 4.34. Darbe testi uygulanmış numunelerin makro görünütünleri

4.6. Al7075 köpük metaller, FDM ve FDKM'lerin Gama Işını Sönümleme Özellikleri

Tablo 4.2- 4.4'te farklı kalınlıklara sahip Al7075 köpükler (kalınlık: 0.5 inç), FDM (kalınlık: 0.5 inç) ve FDKM'lerin (kalınlık: 1 inç) Cs-137 (662 keV), Co-60 (1173 keV), Na-22 (1275 keV) ve Co-60 (1332,5 keV) radyoizotopları ile yapılan deneylerin sonuçları verilmektedir.

Tablo 4.2. Al7075 köpükler, FDM ve FDKM'lerin Cs-137 (662 keV) kaynağına ilişkin deneysel sonuçlar

Nunune adı	Kalınlık (inç.)	Cs-137 (662 keV)				
		1. Sayım	2. sayım	3. Sayım	4.Sayım	Ortalama sayım
Kaynak	0			359±19		
Al7075 köpük	0.5	327±18	263±16	248±19	207±20	261±18
FDM	0.5	332±18	190±14	268±10	299±11	272±13
FDKM	1	86±9	96±10	68±9	83±10	83±9

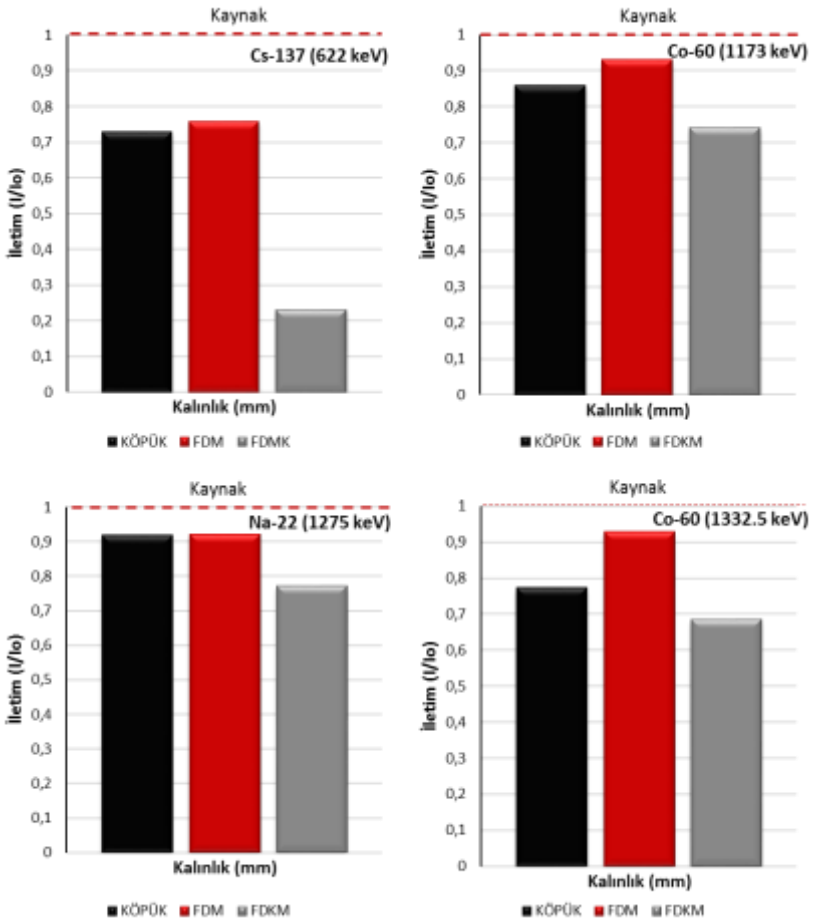
Tablo 4.3. Al7075 köpükler, FDM ve FDKM'lerin Co-60 (1173 keV) kaynağına ilişkin deneysel sonuçlar

Nunune adı	Kalınlık (inç.)	Co-60 (1173 keV)				
		1. Sayım	2. sayım	3. Sayım	4.Sayım	Ortalama sayım
Kaynak	0			517±26		
Al7075 köpük	0.5	457±27	472±25	42624	418±28	443±26
FDM	0.5	476±27	484±26	476±25	484±24	480±26
FDKM	1	390±24	400±24	397±25	347±22	384±24

Tablo 4.4. Al7075 köpükler, FDM ve FDKM'lerin Na-22 (1275 keV) kaynağına ilişkin deneysel sonuçlar

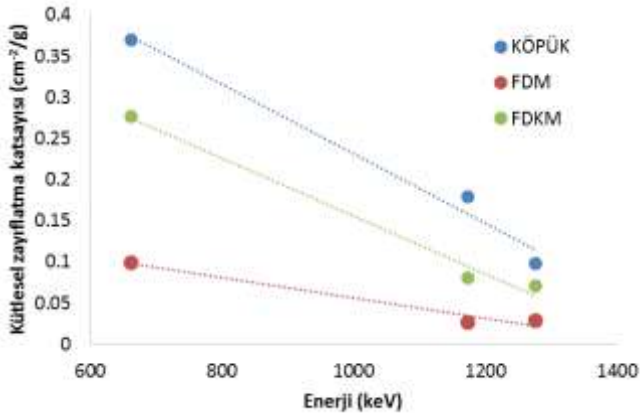
Nunune adı	Kalınlık (inç.)	Na-22 (1275 keV)				
		1. Sayım	2. sayım	3. Sayım	4.Sayım	Ortalama sayım
Kaynak	0			309±18		
Al7075 köpük	0.5	303±17	288±16	267±16	280±15	284±16
FDM	0.5	284±17	296±17	277±16	283±16	285±17
FDKM	1	242±15	244±15	255±15	211±17	238±15

Tablolar üzerindeki veriler kullanılarak iletim/kalınlık grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.35). Grafiklerde görüldüğü gibi numunelerdeki kalınlık artışı geçirgenliği düşürmektedir. Bu durum literatür ile uyum içerisindedir (Büyük, 2015). Bütün kaynaklar altında 1 inç kalınlığa sahip FDKM'ler 0,5 inç kalınlığa sahip Al7075 köpükler ve FDM'lere kıyasla daha fazla gama ışını zayıflatmıştır. Numune kalınlıkları arasındaki fark 2 kat olmasına rağmen Cs-137 (662 keV) radyoizotop kaynağı ile yapılan deneylerde FDKM'ler FDM ve Al7075 köpüğe kıyasla yaklaşık 3.2 kat daha fazla gama ışını zayıflatmıştır. Diğer radyoizotrop kaynaklarında ise bu değer yaklaşık 1,2 kat kadardır. Aynı kalınlığa sahip Al7075 köpükler ile FDM'ler karşılaştırıldığında ise kapalı gözenekli köpük yapıların daha fazla gama ışını zayıflattığı görülmektedir. Fakat bu fark Cs-137 (662 keV) radyoizotop kaynağı ile yapılan deneylerde max. %4 kadardır. Chen vd., (2014) tarafından yapılan çalışmada içerisine ikincil fazların enjekte edildiği kapalı ve açık gözenekli köpüklerin nispeten bulk malzemelere kıyasla daha etkili bir koruma sağladığı vurgulanmıştır.



Şekil 4.35. Farklı radyoizotop kaynakları için iletim/kalınlık grafikleri

Şekil 4.36'da görüldüğü gibi her üç türdeki numune için foton enerjisindeki artış ile birlikte deneysel olarak elde edilen kütle zayıflatma katsayısı azalma eğilimindedir. Başlangıçta maksimum değere sahip olan kütle zayıflatma katsayısı foton enerjisindeki artış ile birlikte düşmüştür. Al7075 köpük malzemelerde elde edilen kütlesel zayıflatma katsayısı diğer numunelere kıyasla daha fazladır. Bu durum doğrudan yoğunlukla ilişkilidir. Köpük numunelerin yoğunluk değerleri ortalama 0.72 g/cm^3 iken FDKM'lerde 1.29 g/cm^3 ve FDM'lerde 2.32 g/cm^3 olarak belirlenmiştir. Uzun vd., (2016) tarafından yapılan çalışmada AlSi7 köpükler için kütlesel zayıflatma sayılarının artan enerji ile birlikte karmaşık bir korelasyon içerisinde olduğu vurgulanmıştır.

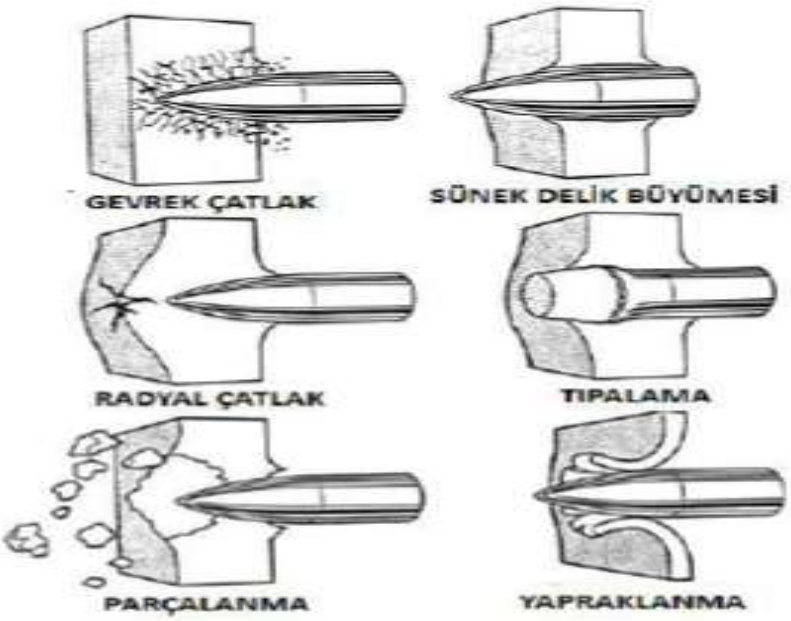


Şekil 4.36. Numunelere ait kütlesel zayıflatma katsayısı - enerji grafiği

4.7. FDM ve FDKM'lerin Balistik Performansı

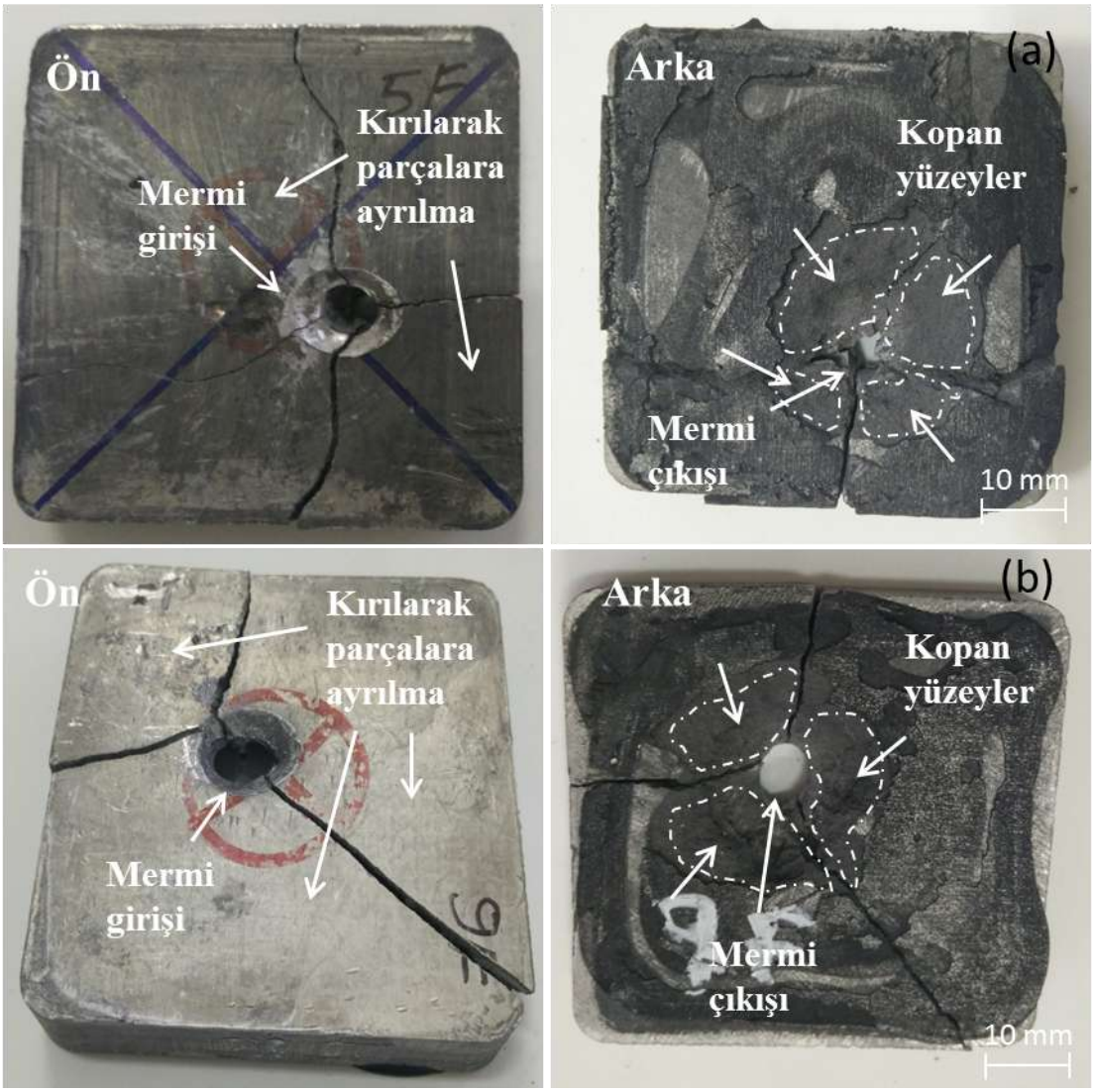
4.7.1. Makro hasar analizi

Şekil 4.37'de hedef ve çekirdek arasındaki etkileşim sonucu oluşan muhtemel kırılma mekanizmaları gösterilmiştir. İnce kalınlıktaki zırh malzemelerinde, çekirdek hedefi delip geçer ve hedefin çekirdek üzerindeki etkileri incelenir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlarda hedefin çekirdek üzerindeki etkileri iyi tanımlanırsa, gerçek bir zırh tasarımı için çok büyük faydalar sağlayacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.37. Farklı darbe durumlarında muhtemel kırılma şekilleri

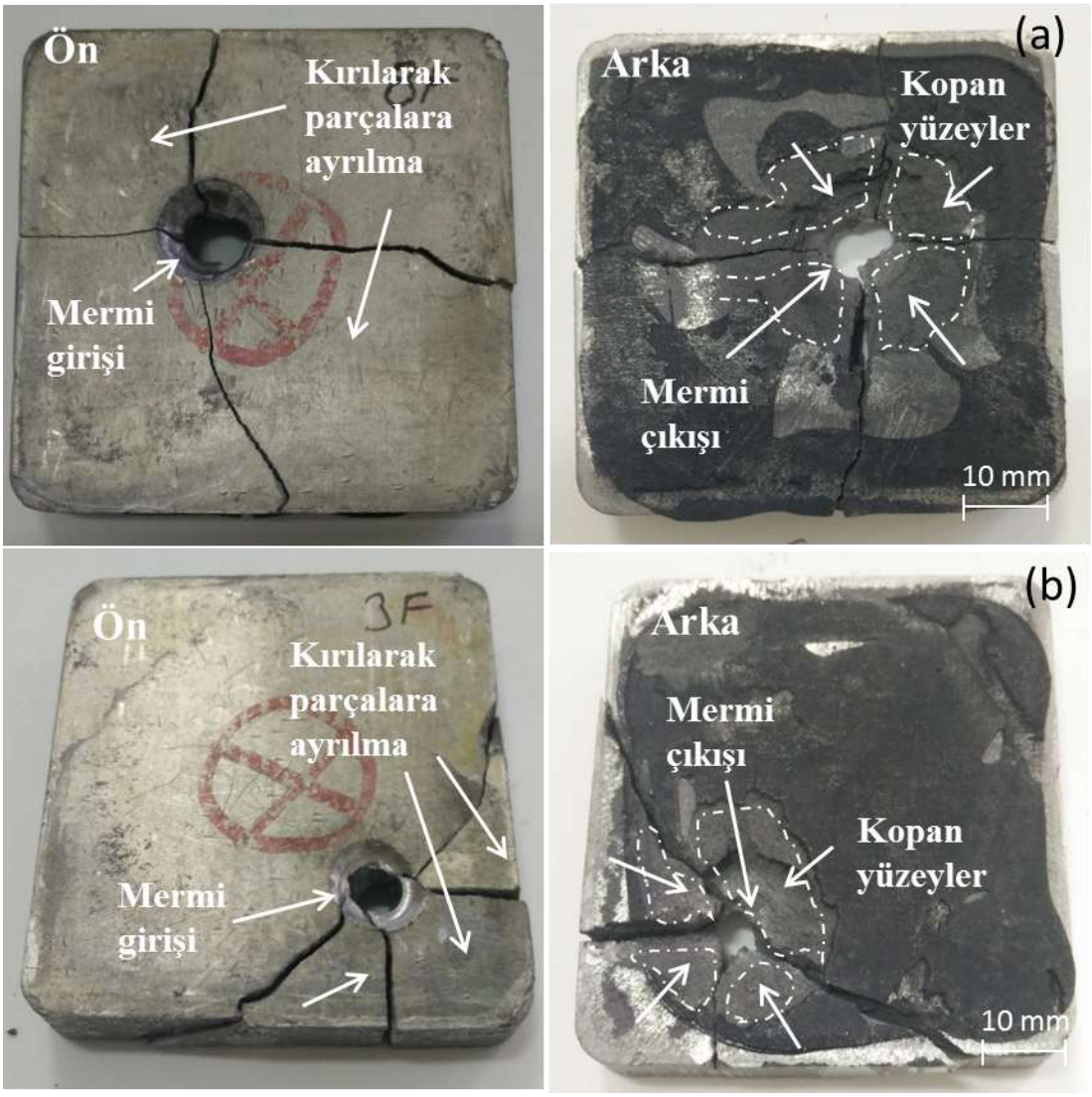
Balistik testlerde test numunelerin arka kısmına Al levha konularak atışlar yapılmıştır. Çekirdeğin malzemeyi deldikten sonra Al levhayı delip delmeme durumuna göre değerlendirme yapılmıştır. Balistik atışlarda arka kısımda yer alan Al levhada iz meydana geldiğinde CP olarak adlandırılmaktadır. Al levhada iz meydana gelmemiş ise PP olarak adlandırılır. Şekil 4.38'de yer alan hasar mekanizmasını incelediğimizde parçalanarak kopma ve gevrek çatlak oluşma durumu gözlemlenmiştir. PP_1 ve PP_2 atışlarına baktığımızda malzemenin hem ön kısmında hem de arka kısmında çekirdek deliği oluğu görülmektedir. Burada FDM'lere temas eden çekirdek parçalanmalara ve delinmeye sebep olurken arka kısımda yer alan Al levhayı delmediği gözlemlenmiştir. Dolayısı ile bu atışların başarılı olduğu yani arka kısımda yer alan Al levhayı delmediği görülmüştür. PP_1 ve PP_2 atışlarında çekirdeğin temas ettiği ilk yüzeylerde çekirdek çapı kadar bir deliğin oluştuğu görülmüştür. Ayrıca çekirdeğin meydana getirdiği deliğinin etrafından dış yüzeylere doğru kırılmalarım meydana geldiği dikkat çekmektedir. Çekirdeğin çıkış kısımlarında ise malzemenin yüzeyinden kopmalar oluşmuştur. Bü yüzeylerde meydana gelen delikler çekirdek geçişinden ziyade kırılma kaynaklıdır. Bu durumun FDM'lerin arka yüzeylerinde B_4C miktarındaki oransal artıştan dolayı meydana gelen kırılganlık miktarındaki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir.



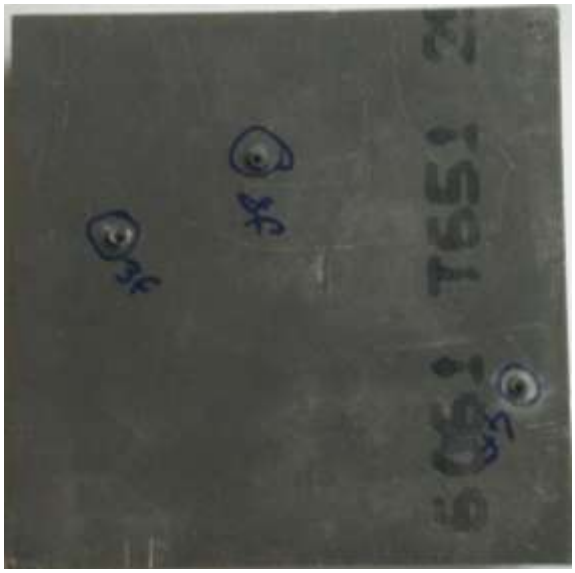
Şekil 4.38. FDM delinmeyen numunelerin ön ve arka kısmından alınan makro resimler (a) PP_1 ve (b) PP_2

Şekil 4.39'da yer alan (FDM için) CP_1 ve CP_2 atışlarını incelediğimizde oluşan hasar mekanizmasının parçalanarak kopmaya uyduğu görülmektedir. Her iki atışta da çekirdek ön taraftan girmiş arka kısımdan çıkmıştır. Çekirdeğin malzemeye teması neticesinde malzemenin dört parçaya bölündüğü görülmektedir. PP_1 ve PP_2 atışlarına göre CP_1 ve CP_2 atışları daha yüksek hızlara sahiptir. Her iki durumu kıyasladığımızda CP_1 ve CP_2 atışlarının FDM'lerde daha çok parçalanmaya sebep olduğu görülmektedir. Malzemede meydana gelen bu bölünmeler çekirdeğin ilk temas ettiği yüzeyden etrafa doğru yayılan çatlaklar şeklinde görülmüştür. Dolayısı ile çatlaklar çekirdeğin deldiği kısımdan başlayarak etrafa doğru yayılmıştır. Malzemenin ön kısmındaki delik çapı küçük iken çıkış kısmındaki delik çapı daha büyüktür. Ayrıca çıkış kısımlarında yüzeylerden parçacıkların koptuğu gözlemlenmiştir. Bu durum malzemenin gevrek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.40'da FDM

numunelerin balistik testlerinde arka plaka olarak kullanılan Al plakanın resmi verilmiştir. Resimde delinen numunelerin plaka üzerinde meydana getirdiği izler görülmektedir.

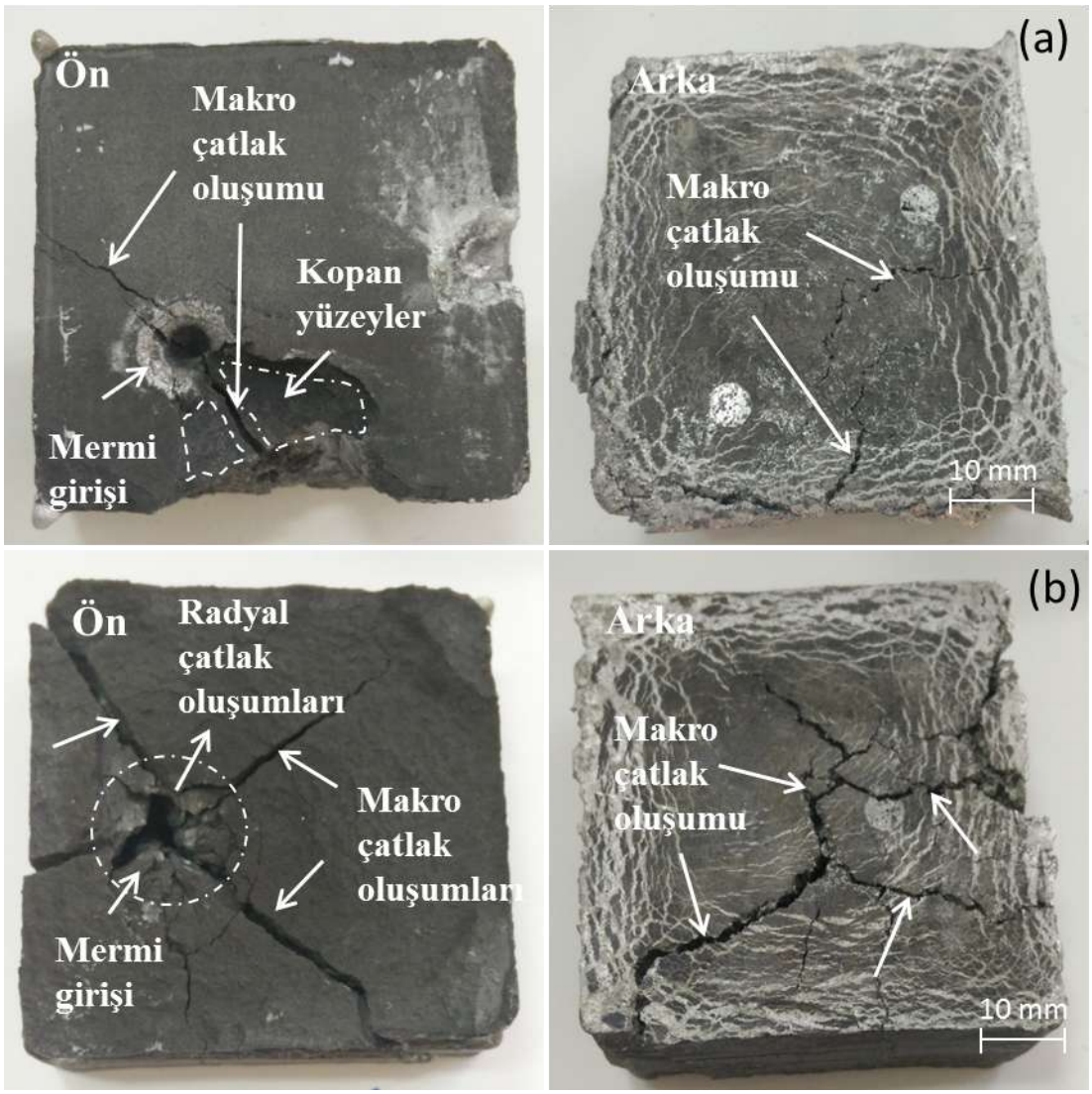


Şekil 4.39. FDM delinen numunelerin ön ve arka kısmından alınan makro resimler (a) CP_1 ve (b) CP_2



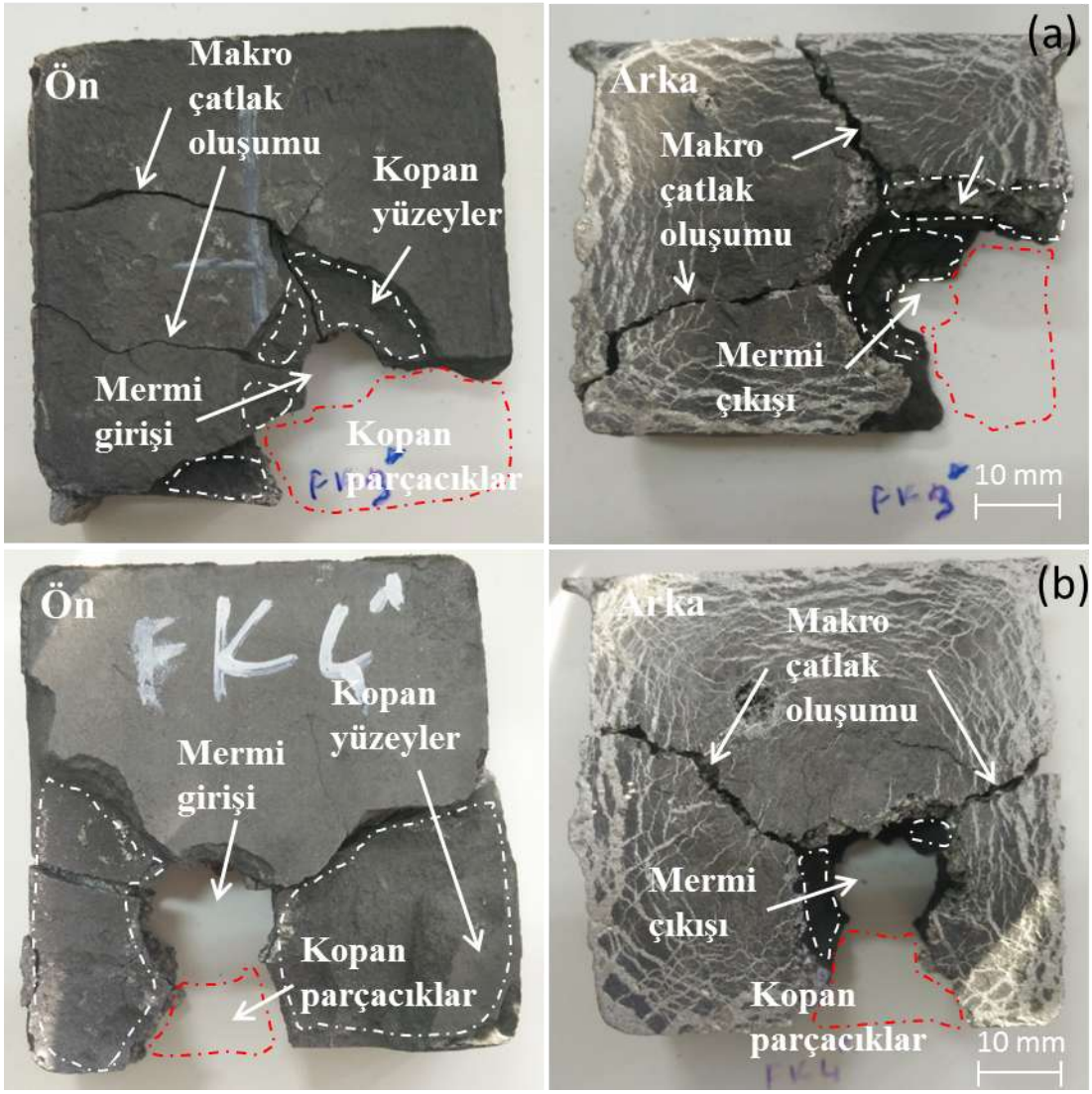
Şekil 4.40. FDM numunelerin balistik testlerinde kullanılan Al arka plaka

FDKM'lere iki farklı türde atış yapılmıştır. Birincisi FDKM'nin %60 B_4C yüzeyine çekirdek gelecek şekilde ikincisi ise köpük yüzeyine çekirdek gelecek şekilde atış yapılmıştır. İlk olarak %60 B_4C olan yüzeylere yapılan atışları ele alacak olursak 2 adet PP atışı 2 adet de CP atışı yapılmıştır. Şekil 4.41-a'da verilen atış PP_1 Şekil 4.41-b'de verilen atış ise PP_2 olarak nitelendirilmektedir. PP_1'e baktığımızda çekirdeğin ön yüzeyden girdiğini arka kısımdan ise çıkmadığı görülmüştür. Buradaki hasar mekanizması radyal çatlak oluşumuna benzemektedir. Çekirdeğin ilk temas yüzeyinde açmış olduğu delik etrafında radyal çatlakların oluştuğu görülmüştür. Ayrıca bu radyal çatlaklardan etrafa doğru yayılan makro çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. Bunların yanı sıra giriş deliğinin etrafında yüzeyden bazı parçacıklar kopmuştur. FDKM'nin arka yüzeyinde yer alan köpük yüzeyine baktığımızda ise çekirdeğin oluşturmuş olduğu deformasyondan dolayı makro çatlaklar oluşmuştur. Şekil 4.41-b'de atış hızı daha yüksek olan PP_2 atışına ait resme baktığımızda ise çekirdeğin giriş kısmında radyal çatlaklardan dolayı parçacıklanma oluştuğunu ve makro boyutta çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. PP_1'e kıyasla PP_2'de daha çok çatlaklar oluşmuştur. Bununla birlikte malzemenin arka kısmında meydana gelen çatlak miktarının daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun çekirdek hızının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Artan hızla birlikte deformasyonda artmıştır.

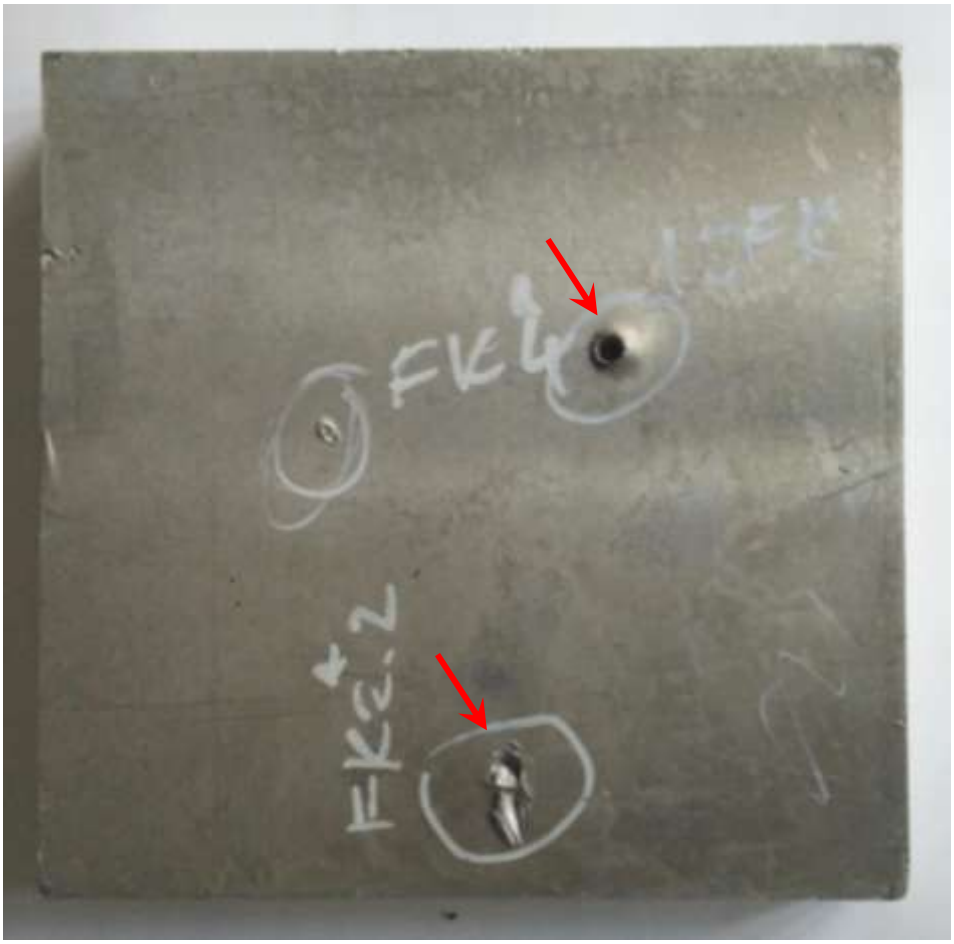


Şekil 4.41. FDKM (FK*) delinmeyen numunelerin ön ve arka kısmından alınan makro resimler (a) PP_1 ve (b) PP_2

Şekil 4.42'de yer alan daha yüksek hızlı atış neticesinde CP ile sonuçlanan FDKM'lere baktığımızda hasar mekanizmasının parçalanma şeklinde olduğu tespit edilmiştir. CP_1 ve CP_2 atışlarına baktığımızda çekirdeğin bir yerden girip diğer taraftan çıktığı anlaşılmıştır. CP_1 atışında çekirdeğin ilk temas ettiği yüzeyde FDKM'ler paçalara ayrılmıştır. Ayrıca giriş deliğinin etrafında yüzeyden parça kopmaları meydana gelmiştir. Benzer bir durum CP_2 atışında da vardır. Çekirdeğin arka çıkış kısmına baktığımızda ise parça bölünmelerinin oluştuğu görülmüştür. Şekil 4.43'te FDKM numunelerin %60 B_4C içeren yüzeylerden yapılan atışlarla yapılan balistik testlerde arka plaka olarak kullanılan Al plakanın resmi verilmiştir. Resimde delinen numunelerin plaka üzerinde meydana getirdiği izler görülmektedir.

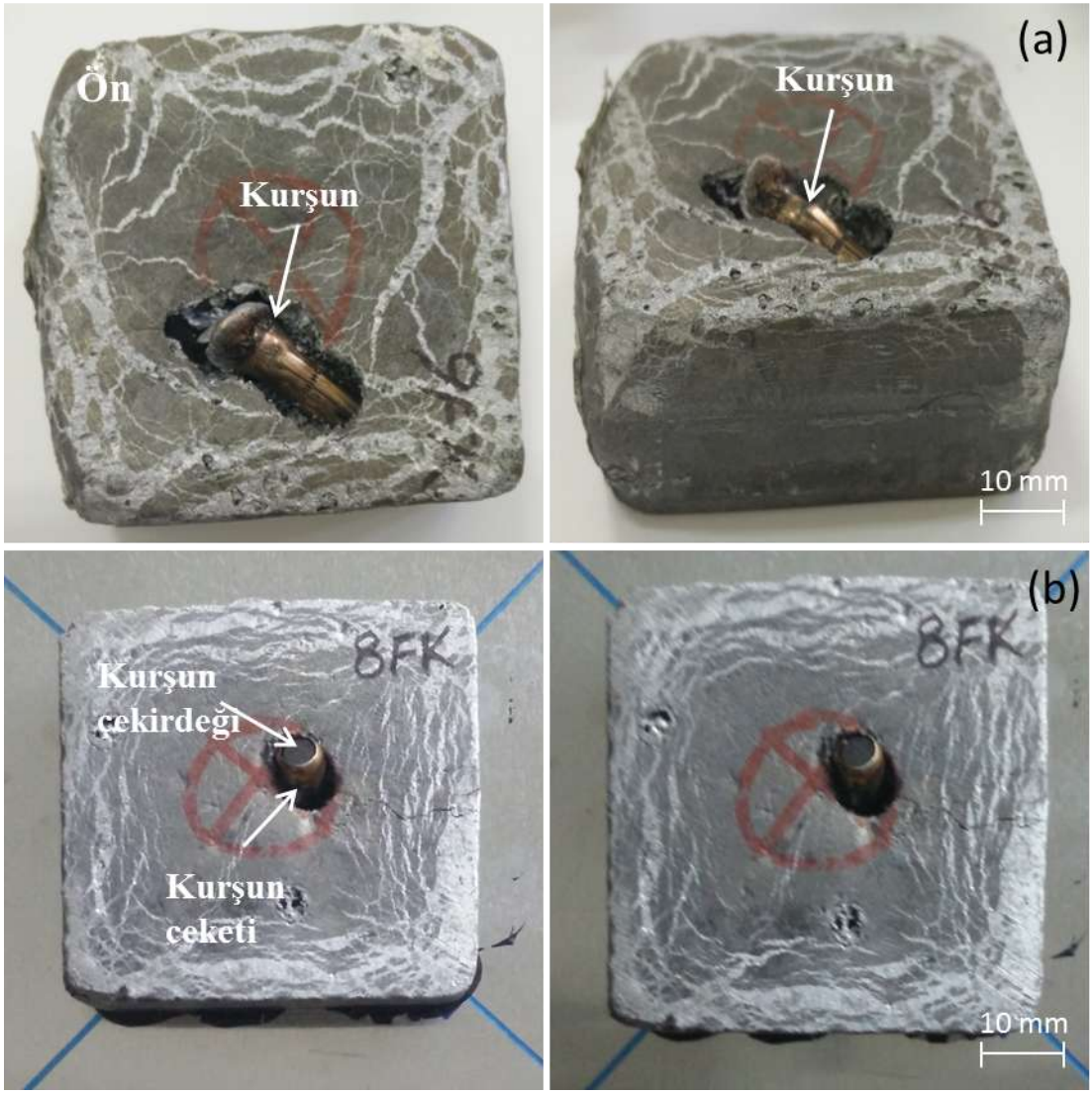


Şekil 4.42. FDKM (FK*) delinen numunelerin ön ve arka kısmından alınan makro resimler (a) CP_1 ve (b) CP_2

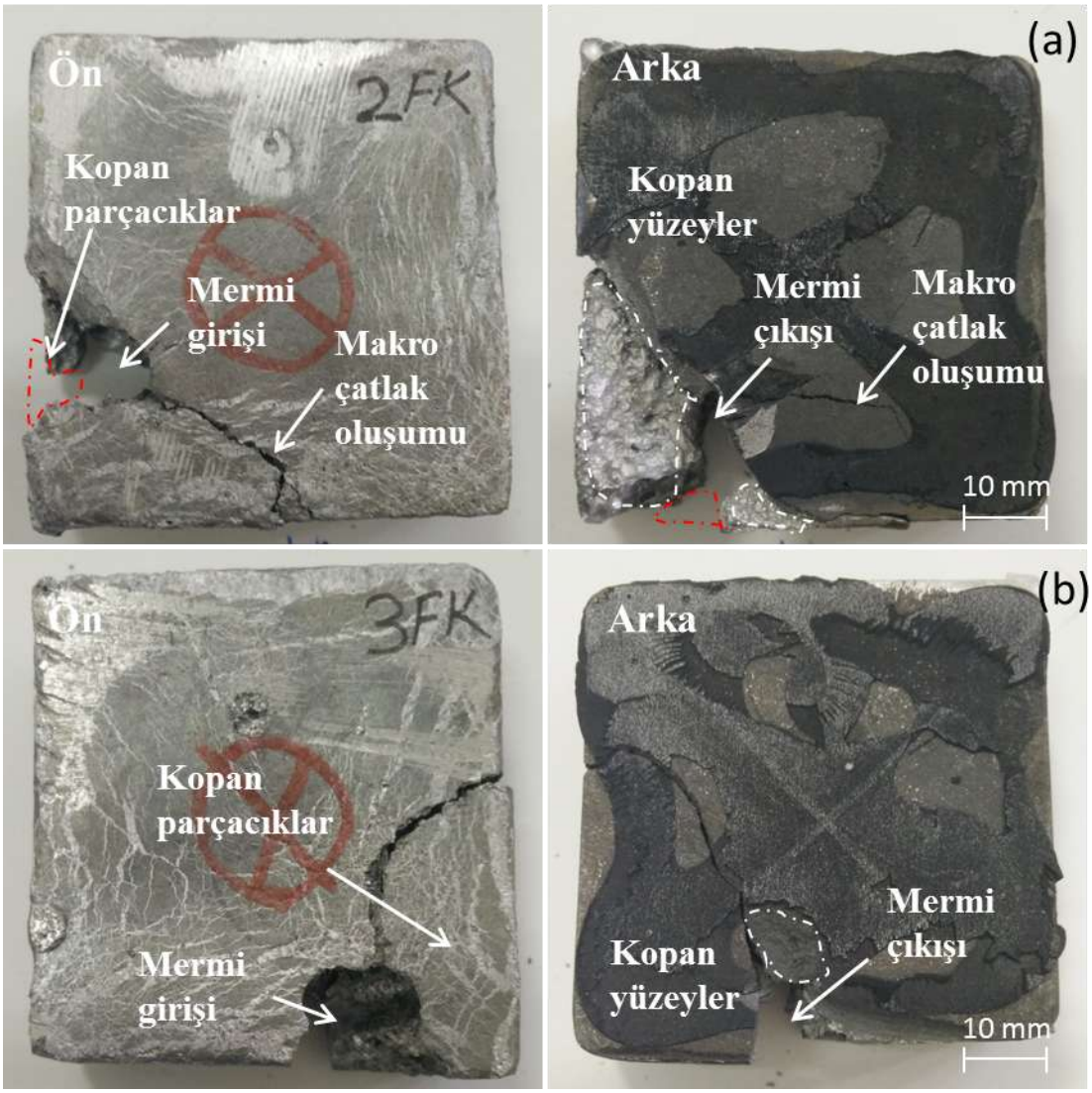


Şekil 4.43. FDKM (FK*) numunelerin balistik testlerinde kullanılan Al arka plaka

FDKM'lerin köpük yüzeyinden yapılan atışlarda ise 2 adet PP ve 2 adet CP hesaplanmıştır (Şekil 4.44 ve Şekil 4.45). İlk olarak delmeyen (PP_1 ve PP_2) atışlara baktığımızda çekirdeğin Al köpük yüzeyine saplanıp kaldığı tespit edilmiştir. Bu durumun Al köpüğün darbe enerjisini sönümlemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Malzemenin arka kısmına baktığımızda ise hiçbir çatlağın oluşmadığı görülmüştür. Hızların artırılması ile yapılan delen atışlarda (CP_1 ve CP_2) çekirdek bir yerden girmiş diğer taraftan çıkmıştır. Hasar mekanizması olarak parçalanarak kopmaya benzemektedir. Şekil 4.46'da FDKM numunelerin Al yüzeylerinden yapılan atışlarla yapılan balistik testlerde arka plaka olarak kullanılan Al plakanın resmi verilmiştir. Resimde delinen numunelerin plaka üzerinde meydana getirdiği izler görülmektedir.



Şekil 4.44. FDKM (FK) delinmeyen numunelerin ön ve arka kısmından alınan makro resimler (a) CP_1 ve (b) CP_2



Şekil 4.45. FDKM (FK) delinen numunelerin ön ve arka kısmından alınan makro resimler (a) CP_1 ve (b) CP_2



Şekil 4.46. FDKM (FK) numunelerin balistik testlerinde kullanılan Al arka plaka

4.7.2. V50 Hız Limitleri

Üretimi gerçekleştirilen FDM ve FDKM'lere 3 farklı şekilde atış yapılmıştır. MIL-DTL-46063 numaralı standartta V50 hız limitinin belirlenebilmesi için en az dört atış yapılması gerektiği belirtilmiştir. Yapılan atışlar ve elde edilen veriler Tablo 4.5'te verilmiştir. Delen (CP) ve delmeyen (PP) atışlara ait 4 farklı hıza bağlı olarak V50 hız limitleri hesaplanmıştır. V50 hız limiti hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmaktadır (Eşitlik 4.1).

$$V50 = \frac{\mathrm{CP1+CP2+PP1+PP2}}{4} \qquad \text{(Eş 4.1)}$$

Tablo 4.5. Balistik test malzeme ve atış parametreleri (0 derece açılarda).

Malzeme	Test numune ölçüleri (mm)			çekirdeğin ilk temas ettiği yüzey	Balistik test standart atışı	Atış no	Hız	Sonuç	V50 hız limiti (m/sn)
	Genişlik	Boy	Kalınlık						
FDKM	60	60	12	%60 B_4C	7.62 -51 mm AP MKE	1	404,9	CP	378,9
						2	382,9	CP	
						3	372,0	PP	
						4	355,9	PP	
FDM	60	60	24	%60 B_4C	7.62 -51 mm AP MKE	1	397,1	CP	359,5
						2	363,9	CP	
						3	335,3	PP	
						4	341,6	PP	
FDKM	60	60	24	Al7075 köpük	7.62 -51 mm AP MKE	1	433,6	CP	371,5
						2	396,9	CP	
						3	331,3	PP	
						4	324,5	PP	

MIL-DTL-46063 numaralı standarda göre yapılacak olan balistik deneylerde çekirdek türü ve parça kalınlığına göre V50 hız limitleri belirlenmiştir. Standarta göre zırh malzemelerinin kalınlıklarına bağlı olarak yapılacak olan atış açıları değişmektedir. Kalınlıkları 1 inç'e kadar olan malzemeler için 30 derece, 1 inç ve daha fazla kalınlıktaki malzemeler için ise 0 derecelik açıların kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Standartta 7.62-51 mm AP M2 zırh delici çekirdekler ile yapılacak atışlar için verilen hız limitleri 0,5 inç kalınlığındaki numunede V50=437 m/sn (1435 fps). 1 inç kalınlığındaki numune için 0 derecelik açılarda bu değer 633 m/sn (2077 fps) olarak verilmiştir. 0^o derece olarak yapılan balistik testler sonucunda FDKM'nin B4C yüzeyi için balistik hız limiti V50=378.9 m/sn, FDM'ye yapılan atış için V50=359.5 m/sn ve FDKM'nin köpük yüzeyine yapılan atış için V50=371.5 m/sn olarak tespit edilmiştir (Tablo 4.5).

FDM'nin kademelerinin alan yoğunluğu: 100 cm x 100 cm x 0,2 cm = 2000 cm^3

1. kademe için:
%40Al7075+%60 B_4C için; yoğunluk: (2,81x40/100)+(2,52x60/100)=2,64 g/cm^3

Alan Yoğunlu: 2000x2.64=5272 gr=5.272 kg/m^2

2. kademe için:
%50Al7075+%50 B_4C için yoğunluk: (2,81x50/100)+(2,52x50/100)=2,67

Alan Yoğunlu: 2000x2.67=5330 gr = 5,330 kg/m^2

3. kademe için:
%60Al7075+%40 B_4C için yoğunluk: (2,81x60/100)+(2,52x40/100)=2,69

Alan Yoğunluğu: 2000x2.69= 5388 gr = 5,388 kg/m^2

4. kademe için:
%70Al7075+%30 B_4C için yoğunluk: (2,81x70/100)+(2,52x30/100)=2,72

Alan Yoğunlğu: 2000x2.72= 5446 gr = 5,446 kg/m^2

5. kademe için:
%80Al7075+%20 B_4C için yoğunluk: (2,81x80/100)+(2,52x20/100)=2,75

Alan Yoğunlğu: 2000x2.75= 5504 gr = 5,504 kg/m^2

6. kademe için:
%90Al7075+%10 B_4C için yoğunluk: (2,81x90/100)+(2,52x10/100)=2,78

Alan Yoğunlğu: 2000x2.78= 5562 gr = 5,562 kg/m^2

FDM'nin toplam alan yoğunluğu: 5.272+5,330+5,388+5,446+5,504+5,562 = 32,502 kg/m^2

FDKM için alan yoğunluğu FDM ve Köpüğün alan yoğunluklarının toplamına eşittir. Dolayısıyla;

Köpüğün alan yoğunluğu;

100 cm x 100 cm x 1.2 cm = 12 000 cm^3

Köpüğün Alan yoğunluğu = 12 000 x 0.52 = 6240 gr = 6.240 kg/m^2

FDKM'nin toplam alan yoğunluğu = 6,240+32,502 = 38,742 kg/m^2

Çalışmada 1 inç kalınlığında FDM üretilmiş olsaydı alan yoğunluk 32,502x2=65,004 kg/m^2 olacaktı. Halbuki 1 inç kalınlığında üretilen FDKM'lerin alan yoğunluğu 38,742 kg/m^2 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle standartlara göre hesaplanan V50 hız limitleri 0,5 inç kalınlığına göre değerlendirilmiştir. 0 derecelik atışlarda her 3 malzeme türünde V50 hız limiti önemli oranda farklılık arz etmemektedir. Buna karşın bu değerler arasında en yüksek hız limitine sahip olan FDKM-(FK*) için MIL-DTL-46063 numaralı standarda göre yapılan 30 derecelik atışlarda V50 hız limitlerinde farklılık gözlenmiştir. Bu sonuçlar belirtilen standart ile

karşılaştırıldığında V50 hız limitlerinde artış söz konusudur. Standartta V50 hız limiti 437 m/sn iken FDKM-(FK*) için bu değer 469,6 m/sn'dir. Ayrıca atış açılarına bağlı olarak V50 hız limitlerinin değiştiği de dikkat çekicidir.

Tablo 4.6. Balistik test malzeme ve atış parametreleri (30 derece açıda)

Malzeme	Test numune ölçüleri (mm)			çekirdeğin ilk temas ettiği yüzey	Balistik test standart atışı	Atış no	Hız	Sonuç	V50 hız limiti (m/sn)
	Genişlik	Boy	Kalınlık						
FDKM	60	60	12	%60 B_4C	7.62 -51 mm AP MKE	1	484,1	CP	469,6
						2	475,7	CP	
						3	462,3	PP	
						4	456,4	PP	

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1. Köpürebilir Al7075 ve Al7075+%7 Si malzemelerde maksimum bağıl yoğunluk değeri yaklaşık %99 (450^{o}C, 200 MPa) olarak elde edilmiştir.
2. Yakşaşık %97 ve üzeri oranda bağıl yoğunluğa sahip numunelerde önemli ölçüde genleşme gözlenmemiştir.
3. Al7075+%7 Si malzemelerde en yüksek genleşme değerine %446 ile 450^{o}C sıcaklıkta ve 200 MPa basınçta ulaşılmıştır. En düşük presleme sıcaklıklarında üretilen aynı kompozisyona sahip malzeme grubunda kaydadeğer genleşme gözlenmemiştir.
4. Al7075 köpürebilir malzemede en yüksek sıcaklık ve basınçlarda dahil önemli bir genleşme gözlenmemiştir. Bağıl yoğunluk değerleri %97'yi aşan numuneler olmasına rağmen hacimsel genleşme değerleri Al7075+%7 Si köpürebilir malzemelere kıyasla oldukça düşüktür. Al7075 malzemelerde en yüksek genleşme değerine %100 ile 450^{o}C sıcaklıkta ve 300 MPa basınçta ulaşılmıştır.
5. İlave edilen Si tozlarının Al7075 malzemelerin genleşme davranışını geliştirdiği tespit edilmiştir.
6. Al7075+%7 numunelere ait gözenek morfolojisinin Al7075 numunelere kıyasla daha homojen olduğu tespit edilmiştir.
7. Uygulanan tüm sıcaklık ve basınç değerlerinde artan B_4C miktarına bağlı olarak gözenekli yapının artması ile FDM'lerde kademeler arası geçiş bölgelerinin tespiti zorlaşmıştır.
8. FDM'lerin XRD sonuçlarına göre sabit presleme basıncında sıcaklığın artmasıyla birlikte pik şiddetinin arttığı tespit edilmiştir. Bu durumun kristalografik kafes yapısının daha düzenli hale gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca B_4C parçacıkları ile Al7075 alaşımı arasında oluşabilecek bileşikleri/fazları belirlemek için gerçekleştirilen XRD analizlerinde Zn4B6O13 bileşiğine rastlanmıştır.
9. Artan presleme sıcaklığına paralel olarak FDM'lerin kademelerinin sertliğinde artış gözlenmiştir. Benzer şekilde geçiş bölgelerindeki sertlik değerleri partikül oranının artışına bağlı olarak artmıştır. Sabit sıcaklıklarda presleme basıncının artması geçiş bölgelerinin sertlik değerini artırmıştır. Üretilen FDM'lerin hem geçiş bölgelerinde hemde kademelerinde en yüksek sertlik değerine 450^{o}C sıcaklıkta yapılan deneylerde ulaşılmıştır.
10. FDKM'lere uygulanan düşük hızlı darbe testleri boyunca artan darbe enerjisine paralel olarak darbe hızı lineer bir artış sergilemiştir. 50J darbe enerjisine kadar toplam çökme miktarının belirgin şekilde arttığı tespit edilmiştir. 75 ve 100J'de yapılan

denemelerde ise toplam çökme miktarında nispeten bir azalma belirlenmiştir. Uygulanan tüm darbe enerjilerinde maksimum temas yükünden sonra darbe ucunda 7-14 mm'lik bir yer değiştirme gözlemlenmiştir. 1.6-5.2 ms^{-1} hız aralığında, 100 J darbe enerjisine kadar vurucu numunelere saplanırken, 125 J darbe enerjisinde 6.4 ms^{-1} darbe hızında FDKM'lerde delinme meydana gelmiştir. Dolayısıyla düşük hızlarda bu enerji seviyesi (100 J) FDKM'ler için sınır değeri olarak belirlenmiştir. 100 J'e kadar olan denemelerde artan darbe enerjisine bağlı olarak absorbe edilen enerjide artış tespit edilmiştir.

11. Cs-137 (662 keV) radyoizotop kaynağı ile FDKM'ler (1 inç kalınlık) FDM ve Al7075 köpüğe (0.5 inç kalınlık) kıyasla yaklaşık 3.2 kat daha fazla gama ışını zayıflatmıştır. Diğer radyoizotrop kaynaklarında (Co-60 (1173 keV) - Na-22 (1275 keV)) ise bu değer yaklaşık 1,2 kat kadardır.
12. Al7075 köpük malzemelerde elde edilen kütlesel zayıflatma katsayısının düşük yoğunluklara sahip olmalarından dolayı diğer numunelere kıyasla daha fazla olduğu testip edilmiştir.
13. Yapılan balistik testler sonucunda malzemelerde parçalanma türünde hasar mekanizması meydana gelmiştir.
14. Balistik performansın belirlenmesi amacıyla yapılan 0 derecelik atışlarda V50 hız limitleri açısından en yüksek balistik performans FDKM'lerin %60 B4C yüzeyinden yapılan atışlarda elde edilmiştir. 30 derecelik atışlarda ise FDKM'lerin V50 hız limiti MIL-DTL-46063 standardında belirtilen değerden yaklaşık %7 daha yüksek değer elde edilmiştir.

6. KAYNAKLAR

Akkaş, A., 2014. “Radiation Shielding Effect of Boron Carbide Aluminum Metal Matrix Composite”, Proceedings of the 4th International Congress APMAS2014, April 24-27, Fethiye, Turkey.

Aly, S.Y., Li, Q.M., 2008. “Critical Impact Energy for the Perforation of Metallic Plates, Nuclear Engineering and Design”, Volume 238, Issue 10, 2521–2528.

Amjad, S., 2001. “Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams”, Yüksek Lisans, University of Cambridge, 2-9.

Ashby, M.F., Evans, A., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., Wadley, H.N.G., 2000. “Making Metal Foams”, Metal Foams, Butterworth Heinemann, USA, 6-11.

ASTM E10-84, Standard Test Method For Brinell Hardness Of Metallic Materials, ASTM International, Philadelphia, USA 1989; vol. 03.01, Sec. 3, pp. 1-32.

Babcsan, N., Banhart, J., Leitmelet, D., 2005. ‘‘Metal Foams–Manufacture and Physics of Foaming’’, International Conference Advanced Metallic Materials, Smolenice, Slovakia, 5-15.

Banhart, J., 2000. “*Properties And Applications For Cast Aluminium Sponges”,* Adv. Eng. Mat., 2: 168.

Banhart, J., 2001. “*Manufacture, Characterisation And Application Of Cellular Metals And Metallic Foams”,* Progress in Materials Science, 46: 559-632.

Banhart, J., 2003. “Aluminium Foams: On the Road to Real Applications”, Mrs Bulletin, 290-295.

Banhart, J., 2005. “Aluminium Foams for lighter vehicles”, International Journal of Vehicle Design, 37, 114-125.

Banhart, J., Baumeister, J., 1998. “Deformation Characteristics Of Metal Foams” J.Mater.Sci., 33: 1431-1440.

Bart-Smith, H., Bastawros, A. F., Mumm, D. R., Evans, A. G., Sypeck, D. J., Wadley, H. N. G., 1998. “Compressive Deformation And Yielding Mechanisms İn Cellular Al Alloys Determined Using X-Ray Tomography And Surface Strain Mapping,” Acta Materialia, 46(10), 3583-3592.

Baumgärtner, F., Duarte, I., Banhart, J., 2000. “Industrialization of powder compact foaming process”, Advanced Engineering Materials, 2(4), 168-174.

Baykara, T., 1997. “Çağdaş Savunma Teknolojilerinde İleri Malzemeler ve Türkiye İçin Bir Değerlendirme” Savunma Sanayindeki Teknolojik Gelişmeler Sempozyumu, Ankara.

Bazle, A.G., Travis A.B., Bruce K.F., Chin-jye Y., Dennis C.T., Harald H.E., John W.G., 2001. “Alüminium Foam İntegral Armor: A New Dimension İn Armor Design”, Composite Structures 52,381-395.

Bonaccorsi, L., Proverbio, E., 2006. “Powder Compaction Effect on Foaming Behaviour of Uniaxial Pressed PM Precursors”. Advanced Engineering Materials, 8(9), 864-869.

Breen, C., Guild, F., Pavier, M., 2005. “Impact of thick CFRP laminates: the effect of impact velocity”. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 36(2), 205-211.

Büyük, B., 2004. “Gama transmisyon tekniği ile Cs-137 gama kaynağı kullanılarak farklı metaller için kalınlık tayini, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Enerji Enstitüsü, İstanbul.

Buyuk, B., 2014a “An investigation On Gamma Attenuation Behaviour of Titanium Diboride Reinforced Boron Carbide Silicon Carbide Composites”, Radiation Physics and Chemistry 97, 354-359.

Buyuk, B., 2014b. “Gamma and Neutron Attenuation Behaviours of Boron Carbide–Silicon Carbide Composites’ Annals of Nuclear Energy -Volume 71, Pages 46–51.

Buyuk, B., 2015 “TiB_2 Katkılı B_4C–SiC Kompozit Malzemelerinde Co-60 Gama Radyoizotop Kaynağı Karşısındaki Davranışlarının İncelenmesi”, Pamukkale Univ. Muh. Bilim Derg. 21(1),24-29.

Çalık, A. 2009. “Borun radyasyon zırh malzemesi olarak kullanılmasının araştırılması”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), 13-15 Mayıs, Karabük, Türkiye.

Campana, F., Pilone, D., 2009. ‘‘Effect of Heat Treatments on the Mechanical Behaviour of Aluminium Alloy Foams’’, Scripta Materialia, 60:679–682.

Cantwell, W. J., Morton, J. 1991. “The impact resistance of composite materials—a review”. Composites, 22(5), 347-362.

Castro, G., Nutt, S. R., Wenchen, X., 2013. “Compression and low-velocity impact behaviour of aluminium syntactic foam”. Materials Science and Engineering: A, 578, 222-229.

Cerit, A. A., 2004. “Partikül Ve Fiber Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitin Balistik Performansının İncelenmesi”, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.

Chen, S., Bourham, M., Rabiei, A., 2014. “Novel light-weight materials for shielding gamma ray”, Radiation physics and chemistry, 96, 27-37.

Chittineni, K., Woldesenbet, E., 2010. “Characterization of İntegrated Functionally Gradient Syntactic Foams”, J Eng Mater-Trans ASME, 132, 011005–7.

Çinici, H., 2012. “Toz Metalurjisi Yöntemi İle Al Esaslı Parçacık Takviyeli Sandviç Metalik Köpük Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-179.

Çinici, H., Gökmen, U., Uzun, A., Karakoç, H., Göde, C.,. Türker, M., 2014. “Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen AlSi7 Köpüklerin Düşük Hızlı Darbe Enerjileri Altında Penetrasyon Davranışının İncelenmesi”. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(2), 395-400.

Cui, L., Forero Rueda, M.A., Gilchrist, M.D. 2009a. “Optimisation of Energy Absorbing Liner for Equestrian Helmets. Part II: Functionally Graded Foam Liner”. Mater. Des., 30, 3414–3419.

Cui, L., Kiernan, S., Gilchrist, M.D., 2009b. “Designing the Energy Absorption Capacity of Functionally Graded Foam Materials”, Mater Sci Eng A, 507, 215–225.

Davies, G.J., Zhen, S., 1983. “Metallic Foams: Their Production, Properties And Applications” J. Material Sci., 18: 1899-1911.

Demir, F., 2010. “Determination of Mass Attenuation Coefficients of Some Boron Ores at 59.54 Kev by Using Scintillation Detector”. Applied Radiation and Isotopes, 68(1):175–179.

Demir, T., 2008. “Metal ve Katmanlı Zırh Malzemelerin 7,62 mm’lik Zırh Delici Mermiler Karşısında Balistik Başarımlarının İncelenmesi” TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Drolet, J.P., 1977. “Metallic Foams” International Journal of Powder Metalurgy & Powder Technology, 13: 35-44.

Duarte, I., Banhart, J., 2000. “A study of aluminium foam formation—kinetics and microstructure”, Acta Materialia, 48(9), 2349-2362.

Ekici, R., Kaburcuk, M., 2015. "Low-velocity impact behavior of Al 6061/SiC particulate metal matrix composites", Journal of Composite Materials, 49, 853-871.

Elbir, S., Yilmaz, S., Toksoy, A. K., Guden, M., Hall, I. W., 2003. ‘‘Sic-Particulate Aluminum Composite Foams Produced By Powder Compacts: Foaming and Compression Behavior’’, Journal of Materials Science, 38 (23), 4745-4755.

Erdem, M., Türker, M., 2011. “7039 Alüminyum Alaşımının Kaynak Öncesi ve Sonrası Mekanik ve Balistik Özelliklerinin Araştırılması”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 26, No 1, 17-26.

Esmaeelzadeh, S., Simchi, A., Lehmhus, D., 2006 ‘‘Effect Of Ceramic Particle Addition On The Foaming Behavior, Cell Structure And Mechanical Properties Of P/M $AlSi_7$ Foam’’, Materials Science and Engineering A, 424, 290–299.

Gama, B.A., Bogetti, T.A., Fink, B.K., Yu, C.J., Claar, T.D., Eifert, H.H., Jr Gillesie, J.W., 2001. “Aluminum Foam İntegral Armor: A New Dimension İn Armor Desing”, Composite Structures 52, 381-395.

Gebhardt, E., Becker M., Dorner, S., 1955. “Aluminium, Effect of alloying additions on the viscosity of aluminium”, 31, 315-321.

Gellert, E.P., Cimpoeru, S.J., Woodward, R.L. 2000. “A Study of the Effect of the Target Thickness on the Ballistic Perforation of Glass-Fibre-Reinforced Plastic Composites”, Elsevier International Journal of Impact Engineering.

Gergely, V., Clyne, B., 2000. “The FORMGRIP Process:Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors”, Advanced Engineering Materials, (4): 175-178.

Gökmen, U., 2016. "Sıcak Ekstrüze Edilmiş Al 2024 Matrisli B_4C/Al_2O_3 Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu”, Politeknik Dergisi, 19(4), 445-453.

Güden, M., Elbir, S., Yılmaz, S., 2001. “Kompozit alüminyum köpüklerin hazırlanması ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi”, II. Makine Malzemesi ve Imalat Teknolojisi Sempozyumuna Sunulmuş Bildiri.

Gupta, N., 2007, “A Functionally Graded Syntactic Foam Material for High Energy Absorption under Compression”, Mater. Lett., 61, 979–982.

Hintz, C., Wagner, I., Sahm, P.R., Stojanov, P., 1999. ‘‘Investment Cast Near Net Shape Components Based On Cellular Metal Materials’’, 1st International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures, Bremen, 153-159.

Hubbell, J.H., Selzer S. M. 1995. “Tables of X-Ray Attenuation Coefficients and Mass Absorption Coefficients 1KeV to 20 MeV for Element Z=1 to 92 and 48 Additianal Substances of Dosimetric Interest”, NIST, Gaithersburg, MD.

Iacob, G., Ghica, V. G., Buzatu, M., Buzatu, T., Petrescu, M. I., 2015. “Studies on wear rate and micro-hardness of the Al/Al_2O_3/Gr hybrid composites produced via powder metallurgy”. Composites Part B: Engineering, 69, 603-611.

Jing, L., Wabg, Z., Shim, V.P.W., Zhao, L., 2014, “An Experimental Study Of The Dynamic Response Of Cylindrical Sandwich Shells With Metallic Foam Cores Subjected To Blast Loading”, International Journal of Impact Engineering 71, 60-72.

Kara, S., 2012. “Çelik Esaslı Zırh Malzemesinin 307si Elektrodu İle Kaynak Edilebilirliğinin ve Mikroyapı Üzerindeki Etkisinin Deneysel Araştırılması” Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Karagöz, Ş., 2005. “Zırh Çelikleri”, Zırh Teknolojileri Semineri, Milli Savunma Bakanlığı Ar-Ge & Teknoloji Daire Bakanlığı, Ankara.

Karagöz, Ş., Atapek, H., 2007. “Bor Katkılı Zırh Çeliklerin Kırılma Davranışı” 8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı, Istanbul/Turkey.

Karagöz, Ş., Atapek, Ş.H. ve Yılmaz, A., 2010. “Su Verilmiş ve Temperlenmiş Beynitik Bir Zırh Çeliğinin Balistik Davranışı: Hasar Üzerine Modelleme ve İncelemeler”, Savunma Teknolojileri Dergisi, Sayı: 053, 62-66.

Kulkarni, S.B., Ramakrishnan, P., 1973. “Porous and cellular materials for structural applications” Int.J. Powder Met., 9: 41-45.

Lee, L. J., Huang, K. Y., Fann, Y. J., 1993. “Dynamic responses of composite sandwich plate impacted by a rigid ball”. Journal of Composite Materials, 27(13), 1238-1256.

Leonard, K.J., Busby, J.T., Zinkle, S.J., 2007. “Aging Effects on Microstructural and Mechanical Properties of Select Refractory Metal Alloys for Space Reactor Applications”, J. Nucl. Materials, 366, 1-2, 336-352.

Li, W., Huang, G., Bai, Y., Dong, Y., Feng, S., 2014. “Dynamic response of spherical sandwich shells with metallic foam core under external air blast loading – Numerical simulation”, Composite Structures, 116, 612–625.

Liu, D., Raju, B. B., Dang, X., 2000. “Impact perforation resistance of laminated and assembled composite plates”. International Journal of Impact Engineering, 24(6), 733-746.

Liu, W., Chen, Z., Cheng, X., Wang, Y., Amankwa, A. R., Xu, J., 2016. Design and ballistic penetration of the ceramic composite armor. Composites Part B: Engineering, 84, 33-40.

Liu, X.R., Tian, X.G., Liang, B., 2014. “Sandwich plates with functionally graded metallic foam cores subjected to air blast loading”, International Journal of Mechanical Sciences, 84, 61–72.

Lyman, T., 1961. “Properties and Selection of Metals”, American Society for Metals, Metals Handbook: 8th Ed., Vol. 1

Mahamood M.R., Esther T., Member, A., IAENG, S., Mukul, P. Sisa., 2012. “Functionally Graded Material: An Overview”, Proceedings of the World Congress on Engineering Vol III WCE.

Manganello, S. J., Wilson, A. D. 1993. “Direct Quenching and its Effects on High-Strength Armor Plate”. The Minerals, Metals & Materials Society, 235-241.

Mehboob, H., Chang, S.H., 2014. “Evaluation of The Development of Tissue Phenotypes: Bone Fracture Healing Using Functionally Graded Material Composite Bone Plates”, Composite Structures, 117, 105–113.

Miao, D., Rabiei, A., 2014. “Introduction of a New Type of Metal Foam (Metallic Bubble Wrap)”, Procedia Materials Science, 4, 8–12.

Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., Kitahara, A., 2000. ‘‘**ALPORAS Aluminum Foam: Production Process, Properties, and Applications’’,** Adv. Eng. Mat., 2(4), 179-183.

Nemat-Alla, M. M., Ata, M. H., Bayoumi, M. R., Khair-Eldeen, W., 2011, “Powder Metallurgical Fabrication and Microstructural İnvestigations of Aluminium/Steel Functionally Graded Material,” Materials Sciences and Applications, 2, 1708-1718.

Oak Ridge National Laboratory 1966, Radiation Sheilding and Information Center, Report 10 , Oak Ridge, TN.

Özgültekin, S., 2012. “Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzeme Kombinasyonlarının İncelenmesi” Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Paulin, I., Šuštaršič, B., Kevorkijan, V., Škapin, S., ve Jenko, M., 2011. “Synthesis of aluminium foams by the powder-metallurgy process: compacting of precursors”. Materiali in tehnologije, 45(1), 13-19.

Prakash, G.O., Sang, H., Embury, J. D., 1995. “Structure and Properties of Al-Si Foam”, Mater. Sci. Eng., A 199: 195-203.

Prichard, J. C., Hogg, P. J., 1990. “The role of impact damage in post-impact compression testing”. Composites, 21(6), 503-511.

Razali, N., Sultan, M. T. H., Mustapha, F., Yidris, N., Ishak, M. R., 2014. “Impact damage on composite structures–a review.” The International Journal of Engineering and Science, 3(7), 8-20.

Reglero, J.A., Rodriguez-Perez, M.A., Solorzano, E., De Saja, J.A. 2011. “Aluminium Foams As A Filler for Leading Edges: Improvements in the Mechanical Behaviour under Bird Strike İmpact Tests”, Materials and Design, 32, 907–910.

Safri, S. N. A., Sultan, M. T. H., Yidris, N., Mustapha, F., 2014. “Low Velocity and High Velocity Impact Test on Composite Materials–A review”. Int. J. Eng. Sci, 50-60.

Sang, B., Duck,Y.K., Ahn, K., Park, S.H., 1998. “A Study on the Foaming Properties of Porous Aluminum by Used Aluminum Alloy”, Metallurgical and Materials Transactions A**,** 29, 2497-2503.

Seitzberger, M., Rammerstorger, F.G., Degischer, H.P., 1997. “Crushing of Axially Compressed Steel Tubes Filled with Aluminium Foam”, Acta Mechanica, 125, 95-103.

Shapovalov, V., 1993. “Porous and Cellular Materials for Structural Applications” Phys. Metals Metallogr., 76: 335–337.

Shiomi, M., Imagama, S., Osakada, K., Matsumoto, R., 2010. “Fabrication of aluminium foams from powder by hot extrusion and foaming”, Journal of Materials Processing Technology, 210, 1203–1208.

Shiqiang, L., Zhihua, W., Guiying, W., Longmao, Z., Xin, L., 2014. “Dynamic Response Of Sandwich Spherical Shell With Graded Metallic Foam Cores Subjected To Blast Loading”, Composites: Part A 56, 262–271.

Singh, V.P., Badiger, N.M., 2015. “γ-ray İnteraction Characteristics for Some Boron Containing Materials” VACUUM - 113, 24–27.

Stöbener, K., Lehmhus, D., Avalle, M., Peroni, L., Buse, M., 2008. ‘‘Aluminum Foampolymerhybrid Structures (APM Aluminum Foam) in Compression Testing’’, International Journal of Solids and Structures**,** 45, 5627-5641.

Sudhakar, I., Madhusudhan Reddy, G., Srınıvasa Rao, K., 2016. “Ballistic Behavior of Boron Carbide Reinforced AA7075 Aluminium Alloy Using Friction Stir Processing – An Experimental Study and Analytical Approach” Defence Technology, 12(1), 25-31.

Taheri, A.H., Hassani, B., Moghaddam, N.Z., 2014. “Thermo-Elastic Optimization of Material Distribution of Functionally Graded Structures by an Isogeometrical Approach”, International Journal of Solids and Structures, 51, 416–429.

Tan, S., 2003. “Optimization of Macrostructure in Aluminium Foams” (Doctoral dissertation, Middle East Technical University).

U. S. Military Specification, “MIL-A-12560H(MR)–Armor Plate, Steel, Wrought, Homogenous”, 1990.

U. S. Military Specification, “MIL-A-46100D(MR) –Armor Plate, Steel, Wrought, High-Hardness”, 1988.

Un, A., ve Sahin, Y. (2011). Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic and electron numbers, mean free paths and kermas for PbO, barite and some boron ores. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 269(13), 1506-1511.

Uzun, A., Gökmen, U., Cinici, H., Kurnaz, A., ve Cetiner, M.A., 2016. “Kapalı Gözenekli AlSi7 Köpükler ve AlSi7 Bulk Malzemelerin Gama Işınlarına Karşı Zırhlama Özelliği”. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 722-726.

Varol, T., Canakci, A., Ozsahin, S., 2013. “Artificial neural network modeling to effect of reinforcement properties on the physical and mechanical properties of Al2024–B_4C composites produced by powder metallurgy”. Composites Part B: Engineering, 54, 224-233.

Wilkins M. L., 1978. “Mechanics Of Penetration And Perforation” Int. J. Eng. Sci.,16, 793-807.

Wood, J.T., 1997. ‘‘Production And Applications of Continuously Cast, Foamed Aluminum’’, Fraunhofer USA metal foam symposium, Delaware, 31-35.

Yanen, C., 2016. “Tabakalı Hibrit Kompozitlerin Bireysel Zırh Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması” Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yavaş, O.M., 2009. “Hafif Saldırılara Karşı Bireysel Savunma Amaçlı Kompozit Malzeme Tasarımı ve Balistik Dayanımı” Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Zhang, X., Zhang, H., 2013. “Optimal Design Of Functionally Graded Foam Material Under İmpact Loading”, International Journal of Mechanical Sciences, 68, 199–211.

Zhao, Y.Y., Sun, D.X., 2001. “A Novel Sintering-Dissolution Process for Manufacturing Al Foams”, Scripta Mat**.**, 44: 105-110.

Zhu, J., Lai, Z., Yin, Z. , Jeon, J. , Lee, S., 2001. “Fabrication of ZrO_2–NiCr Functionally Graded Material by Powder Metallurgy”, Materials Chemistry and Physics, 68, 130–135.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. HENİFİ ÇİNİCİ
Proje No:	214M112
Proje Başlığı:	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Al7xxx/B4c Köpük Metallerin Üretimi, Darbe Enerjileri Altinda Penetrasyon Davranişi, Balistik Ve Radyasyon Zirhlama Performansinin Belirlenmesi
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	UĞUR GÖKMEN, ARİF UZUN
Danışmanlar:	MEHMET ATIF ÇETİNER
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	GAZİ Ü. TEKNOLOJİ F. METALURJİ MALZEME MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/06/2015 - 01/06/2017
Onaylanan Bütçe:	304700.0
Harcanan Bütçe:	199262.62
Öz:	Bu proje çerçevesinde yapılan çalışmada zırh malzemesi olarak kullanmak amacıyla, toz metalurjisi yöntemiyle altı kademesi Al7075 ve B4C?den ve bir kademesi Al7075 köpükten oluşan yedi kademeli fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzeme (FDKM) üretilerek mekanik, radyasyon geçirgenlik ve balistik özellikleri incelenmiştir. Üretilen FDKM?lerin bir yüzeyi %100 alüminyum köpük, diğer yüzeyi ise fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve %10 - %60 arasında değişen B4C içerikli altı kademeli kompozit yapıdan oluşmuştur. Matris malzemesi olarak Al7075 serisi Al tozu, köpürtücü madde olarak TiH2 ve takviye elemanı olarakta B4C tozları kullanılmıştır. Karıştırılan tozlar farklı sıcaklıklarda (250, 350 ve 450°C) ve farklı basınçlarda (200,300 ve 400 MPa) sıcak presleme yöntemiyle sıkıştırılarak blok numuneler elde edilmiştir. Elde edilen toz metal blok numuneler 7500C sıcaklıkta köpürtme işlemine tabi tutularak FDKM?ler üretilmiştir. Üretilen FDKM?lerin kademeleri ve kademeler arasındaki arayüzeyin sertlik ölçümleri yapılmıştır. Üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden (FDM) çapraz kırılma (TRS) numuneleri hazırlanarak ASTM B528 standardına göre çapraz kırılma testleri yapılmıştır. Ayrıca düşük hızda darbe enerjilerini belirlemek için FDKM?lerin köpük yüzeylerine ISO 7765 standardına uygun olarak 1.6-6.4 m/s arasında değişen darbe hızlarında darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Uygulanan darbe enerjisi değerleri 10-125 Joule aralığındadır. Deneyler esnasında çapı 25.7 mm olan yarı küresel darbe ucu kullanılmıştır. Numunelerin balistik performansını belirlemek amacıyla MIL-DTL-46063H standardına göre farklı hızlarda 7,62 mm?lik zırh delici mermiler ile hedef üzerine atışlar yapılmıştır. Balistik testler için öncelikle 12,7 mm kalınlığında Al7075/B4C?den oluşan FDM?lere atışlar yapılmıştır. Daha sonra ise 25,4 mm kalınlığındaki FDKM?lere atışlar yapılarak V50 balistik sınır değerleri belirlenmiştir. Al7075 köpükler, FDM ve FDKM?lerin gama ışını geçirgenlik deneyleri Ge dedektörlü gama ölçüm sistemiyle yapılmıştır. Deneylerde gama radyoizotop kaynakları olarak Cs-137 (662 keV), Co-60 (1173 keV) ve Na-22 (1275 keV) radyoizotopları kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların sonucu olarak artan presleme sıcaklığına ve basıncına paralel olarak FDM?lerin kademelerinin sertliğinde artış gözlenmiştir. En yüksek sertlik değerine 450oC sıcaklıkta yapılan deneylerde ulaşılmıştır. 100 J?e kadar olan denemelerde artan darbe enerjisine bağlı olarak absorbe edilen enerjide artış tespit edilmiştir. 125 J darbe enerjisinde 6.4 ms-1 darbe hızında FDKM?lerde delinme meydana gelmiştir. FDKM?ler, FDM ve Al7075 köpüğe kıyasla yaklaşık 3.2 kat daha fazla gama ışını zayıflatmıştır. 0 derecelik atışlarda V50 hız limitleri açısından en yüksek balistik performans FDKM?lerin %60 B4C yüzeyinden yapılan atışlarda elde edilmiştir. 30 derecelik atışlarda ise FDKM?lerin V50 hız limiti MIL-DTL-46063 standardında belirtilen değerden yaklaşık %7 daha yüksek değer elde edilmiştir.
Anahtar Kelimeler:	Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme, zırh malzemesi, FDKM, Al köpük, B4C, Al7075
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK