

**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BALİSTİK MALZEME ÜRETİMİNE YÖNELİK B_4C+SiC TAKVİYELİ Al 7075
KOMPOZİTLERDE OPTİMUM KATKI ORANININ BELİRLENMESİ**

VOLKAN BAYDAROĞLU

EKİM 2018

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalında Volkan BAYDAROĞLU tarafından hazırlanan
BALİSTİK MALZEME ÜRETİMİNE YÖNELİK B₄C+SiC TAKVİYELİ Al7075
KOMPOZİTLERDE OPTİMUM KATKI ORANININ BELİRLENMESİ

Adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine
getirdiğini onaylarım.

Dr.Öğr.Üyesi Muharrem PUL
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan: : Doç.Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

Üye : Dr.Öğr. Üyesi Sadettin ŞAHİN

Üye (Danışman) : Dr.Öğr.Üyesi Muharrem PUL

.../.../...

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans
derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

BALİSTİK MALZEME ÜRETİMİNE YÖNELİK B₄C+SiC TAKVİYELİ Al 7075 KOMPOZİTLERDE OPTİMUM KATKI ORANININ BELİRLENMESİ

BAYDAROĞLU, Volkan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Muharrem PUL

Ekim 2018

Bu çalışmada SiC (silisyum karbür) ve B₄C (bor karbür) takviyeli Al 7075 esaslı kompozitler, toz metalurjisi yöntemi kullanılarak, %40, %20 ve %10 takviye oranlarında üretilmiştir. Üretimi yapılan numuneler modellenerek sonlu elemanlar methodu ile balistik başarımları incelenmiştir. Kompozitlerin üretiminde 700 MPa presleme basıncı uygulanmıştır. Üretilen kompozit numuneler, 90, 120 ve 150 dakika olmak üzere üç farklı sinterleme süresinde ve 550 °C sabit sıcaklıkta sinterlenmiştir. Sinterlemeden sonra Arşimet Prensibi'ne göre teorik yoğunlukları belirlenmiştir. Daha sonra kompozit numunelerin sertlik ölçümleri ve çapraz kırılma deneyleri yapılmıştır. Son olarak pin on disk yöntemiyle aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kırılma yüzeylerinden SEM görüntüleri çekilerek EDS analizi ile kompozit yapı incelenmiştir. SiC ve B₄C takviye oranlarının artması kırılma dayanımını azaltmıştır. Ancak, kompozit numuneler kendi içinde değerlendirildiğinde, sinterleme süresinin artışı kırılma dayanımını olumlu etkilemiştir. Aşınma yüzeyleri optik mikroskop altında incelenerek mikroyapıları değerlendirilmiştir. Sinterleme süresinin artışına bağlı olarak yoğunluk değerleri artmış, sertlik değerleri ve aşınma direnci azalmıştır. Takviye oranlarının yükselmesi ve sinterleme sürelerinin artışı kompozitlerin aşınma davranışlarını olumsuz etkilemiştir. Kompozit yapı içerisindeki takviye miktarını artmasıyla yoğunluklarda azalma olmuş ancak sertlik değerleri yükselmiştir. En düşük aşınma değeri %20 B₄C takviyeli kompozit numunede elde edilmiştir. %40 takviye oranına sahip 150 dakika sinterlenen kompozit numune yüksek sertliklerine rağmen

en fazla aşınan numuneler olmuştur. Balistik analizlerde %10 takviyeli kompozitler başarımlarını gösteremezken artan takviye oranlarında balistik başarımlar elde edilmiştir. Numunelerin üretimi, sertlik, aşınma ve balistik analizleri beraber değerlendirildiğinde, %40 takviye oranının bu tür kompozitlerde yüksek olduğu ve mekanik özellikler açısından uygun olmadığı, %20 takviye oranının hem üretilebilirlik hem de balistik açıdan optimum sonuç olduğu görülmüştür.



Anahtar kelimeler: Kompozit Zırh, Borkarbür, Silisyumkarbür, Alüminyum, Sinterleme, Mikroyapı, Balistik Performans, Sonlu Elemanlar Methodu

ABSTRACT

DETERMINATION OF OPTIMUM ADDITIVE RATIO IN THE B₄C + SiC REINFORCED Al 7075 COMPOSITES FOR BALLISTIC MATERIAL PRODUCTION

BAYDAROĞLU, Volkan

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Defence Technologies, M. Sc. Thesis

Supervisor: Dr.Öğr.Üyesi Muharrem PUL

October 2018

In this study, SiC (silicon carbide) and B₄C (boron carbide) reinforced AA 7075 based composites were produced at reinforcement rates of 40%, 20% and 10% by using powder metallurgy method. These samples were modeled and their ballistic performance was examined with finite element method. 700 MPa pressing pressure was applied in the production of composites. The composite specimens were sintered at three different sintering temperatures of 90, 120 and 150 minutes at a constant temperature of 550 °C. After sintering, the theoretical densities were determined according to the Archimedesian Principality. Hardness measurements of composite specimens were made and wear tests were carried out using the pin on disk method. Wear surfaces were examined by means of optical microscope and microstructures were evaluated. Depending upon the sintering time increased, the density values increased and the hardness values and wear resistance decreased. The increase of the reinforcement rates and the increase of the sintering times negatively affected the wear behaviors of the composites. As the amount of reinforcement in the composite structure increased, the density decreased but the hardness values increased. The lowest wear value was obtained at 20%B₄C reinforced composite sample. Composite specimens sintered for 150 minutes with a reinforcement ratio of 40% were the most worn samples despite their high hardness. In ballistic analysis, 10% reinforced composites were not able to perform. When the production, hardness, wear and

ballistic analyzes of the samples were evaluated together, it was found that the reinforcement ratio of 40% is high in such composites and not suitable for mechanical properties, 20% of the reinforcement rate is both productivity and ballistic optimum result.



Keywords: Composite Armor, Boroncarbide, Siliconcarbide, Aluminum, Microstructure, Hardness, Sintering, Wear, Ballistic Performance, Finite Element Method

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, bilgi ve birikimleriyle beni yönlendiren, yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın, Dr. Öğr.Üyesi Muharrem PUL'a, yapmış oldukları öneriler ile tezimin geliştirilmesinde katkı sağlayan Sayın Doç.Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK ve Sayın Dr. Öğr.Üyesi Sadetten ŞAHİN hocalarıma, deneysel çalışmalarda yardımcı olan TCDD DATEM İşletme Müdürlüğü personelleri Sayın Met.Müh. Atilla KESKİN ve Sayın Met. Müh. Merve TUĞYANOĞLU'na, tez yazım sürecinde desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım Serhat YILDIZ'a teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER DİZİNİ	xii
KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1.GİRİŞ	1
2.BALİSTİK	9
2.1 Terminal Balistik.....	9
2.2 Zırh Malzemeleri.....	10
2.3 Kompozit Zırhlar.....	12
2.4 Sayısal Modelleme Çalışmaları.....	14
3.KOMPOZİT MALZEMELER.....	21
3.1 Kompozit Malzemenin Tanımı ve Genel Özellikleri.....	21
3.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	21
3.2.1 Matris Malzemesine Göre Kompozitler	22
3.2.2 Takviye Elemanın Şekline Göre Kompozitler	24
3.3 MMK (Metal Matrisli Kompozitler).....	24
3.3.1 Alüminyum Matrisli Kompozitler.....	26
4. KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ	27
4.1 Sıvı Hal İşlemleri	27
4.2 In-Situ İşlemler.....	27
4.3 Katı Hal İşlemleri.....	28
5.MATERYAL VE YÖNTEM.....	30
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	38
6.1 Yoğunlukların Değerlendirilmesi.....	38
6.2 Mikroyapıların Değerlendirilmesi.....	42

6.3 Sertlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	48
6.4 Çapraz Kırılma Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	51
6.5 Aşınma Sonuçlarının Değerlendirilmesi	55
6.6 Balistik Analiz.....	63
6.6.1 Analiz Girdileri	67
6.6.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz	71
7.SONUÇLAR	99
KAYNAKLAR	102



ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

Sayfa

2.1. Balistik limit hesaplarında kullanılan kırılma tanımları [37].....	10
2.2. (a) Çelik zırhda ters tabanca konsepti: merminin kinetik enerjisini zırhı delerek harcaması ve (b) seramik ve polimer kompozitten oluşan çok katmanlı zırh koruma sistemi: seramik tabakanın mermiyi deforme etmesi [39]	12
2.3. Seramik kompozit zırha etki eden penetrasyon mekanizması [41].....	13
2.4. Plakalarda elde edilen Von- Misses gerilmeleri [42]	14
2.5. Farklı kalınlıkta seramik levhaların mermi ile etkileşimi [43].....	15
2.6. Zırh-mermi modeli [44]	16
2.7. Mermilerin farklı zırh numuneleri ile teması [44]	16
2.8. Standart ve seramik takviyeli mermide oluşan hasarlar [45]	17
2.9. Tungsten ile SiC levhanın çarpışma anı gerilim dağılımı [47]	18
2.10. Farklı katman sayısına sahip levhalarda oluşan deformasyon	19
2.11. Sayısal analizde 11 kat Kevlar ve st 37 malzemede deformasyon [50].....	20
3.1.Takviye elemanının şekline göre kompozit çeşitleri [55].....	24
3.2. Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitlerin SEM görüntüleri	25
4.1. Toz metalurjisi yöntemi ile malzeme üretimi	29
5.1. Üretimi tamamlanan SiC ve B ₄ C takviyeli kompozit numuneler	32
5.2. Optik Mikroskop	33
5.3. Taramalı Elektron Mikroskobu	34
5.4. Sertlik Ölçüm Cihazı.....	35
5.5. Standart çapraz kırılma deney aparatı [78]	36
5.6. Abrasif aşınma deney düzeneği	37
6.1. Kompozit numunelerin yoğunluk değerleri	39
6.2.a.%10 SiC-150min (200×) b. %40 B ₄ C - 90 min (200×).....	40
6.2.c.%10 SiC-150 min (1000×)d.%40 B ₄ C- 90 min(1000×).....	40
6.3.Al-SiC EDS Analizi	41
6.4. Al-B ₄ C EDS Analizi	42
6.5. SiC takviyeli kompozitlerin 50x ve 400x büyütmede mikroyapı	43

6.6. B ₄ C takviyeli kompozitlerin 50x ve 400x büyütmede mikroyapı.....	45
6.7. SiC+B ₄ C takviyeli kompozitlerin 50x ve 400x büyütmede mikroyapı	47
6.8. Kompozit numunelere ait sertlik değerleri.....	49
6.9. SiC takviyeli kompozitlerin 200x ve 1000x büyütmede mikroyapı	50
6.10. Kompozit numunelere ait çapraz kırılma yükü değerleri.....	52
6.11. En yüksek ve en düşük kırılma değerlerine sahip kompozit numunelere ait 200× ve 1000× büyütmede mikroyapı görüntüleri	54
6.12. Kompozit numunelere ait aşınma miktarları.....	56
6.13.En fazla ve en az aşınan numunelerin 200x ve 1000x büyütmede mikroyapı görüntüleri	58
6.14. SiC takviyeli kompozitlerin aşınma görüntüleri	60
6.15. B ₄ C takviyeli kompozitlerin aşınma görüntüleri.....	61
6.16. SiC+B ₄ C takviyeli kompozitlerin aşınma görüntüleri	62
6.17. Mermi ve hedef ağ yapısı [68]	68
6.18. Meshleme Parametreleri.....	68
6.19. Hedef ve merminin mesh (ağ) yapısının gösterilmesi	69
6.20. Mermi Hızı	69
6.21. Mermi çekirdeği ve Hedef Ölçüleri	70
6.22. Mermi çekirdeği parametreleri.....	71
6.23. Explicit Dynamics Engineering Data Seçimi	72
6.24. Hedef numuneye ait malzeme özellikleri.....	72
6.25. Çelik mermi malzemesine ait özellikler.....	73
6.26. İmport edilen hedef – mermi modeli.....	73
6.27. Sabitlenen hedef – mermi modeli	73
6.28. Hız değerinin girilmesi.....	74
6.29. Al7075 hedef ile mermi etkileşimi.....	74
6.30. Merminin Al7075 hedefi tam penetrasyonu	75
6.31. Hedefe ait gerilme-zaman grafiği.....	75
6.32. Mermiye ait yavaşlama grafiği.....	76
6.33. %40 SiC + %60 Al7075, Hedef – Mermi Etkileşimi.....	77
6.34. %40 SiC + %60 Al7075, Hedef –Mermi Batma Derinliği	77
6.35. %40 SiC + %60 Al7075 Hedefe ait gerilme-zaman grafiği.....	78
6.36. Mermiye ait yavaşlama grafiği.....	78

6.37. %20 SiC + %80 Al7075, Hedef – Mermi Etkileşimi.....	79
6.38. %20 SiC + %80 Al7075, Hedef –Mermi Batma Derinliği	80
6.39. %20 SiC + %80 Al7075 Hedefe ait gerilme-zaman grafiği.....	80
6.40. Mermiye ait yavaşlama grafiği.....	81
6.41. %10 SiC + %90 Al7075, Hedef – Mermi Etkileşimi.....	82
6.42. Merminin hedefi tam penetrasyonu	82
6.43. %10 SiC + %90 Al7075 Hedefe ait gerilme-zaman grafiği.....	83
6.44. Mermiye ait yavaşlama grafiği.....	83
6.45. %40 B ₄ C + %60 Al7075, Hedef – Mermi Etkileşimi	84
6.46. %40 B ₄ C + %60 Al7075, Hedef –Mermi Batma Derinliği.....	85
6.47. %40B ₄ C + %60 Al7075 Hedefe ait gerilme-zaman grafiği	85
6.48. Mermiye ait yavaşlama grafiği.....	86
6.49. %20 B ₄ C + %80 Al7075 (Hedef) – Mermi Etkileşimi	87
6.50. %20 B ₄ C + %80 Al7075, Hedef –Mermi Batma Derinliği.....	87
6.51. %20 B ₄ C + %80 Al7075 Hedefe ait gerilme-zaman grafiği	88
6.52. Mermiye ait yavaşlama grafiği.....	88
6.53. %10 B ₄ C + %90 Al7075 (Hedef) – Mermi Etkileşimi	89
6.54. Merminin hedefi tam penetrasyonu	90
6.55. %10 B ₄ C + %90 Al7075 Hedefe ait gerilme-zaman grafiği	90
6.56. Mermiye ait yavaşlama grafiği.....	91
6.57. %20 SiC + %20 B ₄ C + %60 Al7075 (Hedef) – Mermi Etkileşimi.....	92
6.58. %20 SiC + %20B ₄ C + %60 Al7075 (Hedef) –Mermi Batma Derinliği	93
6.59. %20 SiC + %20 B ₄ C + %60 Al7075 Hedefe ait gerilme- zaman grafiği	93
6.60. Mermiye ait yavaşlama grafiği.....	94
6.61. %10 SiC + %10 B ₄ C + %80 Al7075 (Hedef) – Mermi Etkileşimi.....	94
6.62.%10 SiC + %10 B ₄ C + %80 Al7075 (Hedef) – Mermi Batma Derinliği	95
6.63. %10 SiC + %10 B ₄ C + %80 Al7075 Hedefe ait gerilme- zaman grafiği	95
6.64. Mermiye ait yavaşlama grafiği.....	96
6.65. %5 SiC + %5 B ₄ C + %90 Al7075 (Hedef) – Mermi Etkileşimi.....	96
6.66. Merminin Hedefi Tam Penetrasyonu	97
6.67. %5 SiC + %5B ₄ C + %90 Al7075 Hedefe ait gerilme- zaman grafiği	97
6.68. Mermiye ait yavaşlama grafiği.....	98

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

2.1. Zırh yapımında kullanılan malzeme özellikleri [38].....	11
5.1. Deney malzemelerinin teknik özellikleri	30
5.2. Kompozit numune karışım oranları	31
6.1. Numunelerin sinterleme süresine göre teorik yoğunluk değerleri	38
6.2. Numune Karışım Oranları ve Özellikleri	64



SİMGELER DİZİNİ

B_4C

Bor Karbür

SiC

Silisyum Karbür

Al_2O_3

Alümina

SiO_2

Silisyumdioksit

MgO

Magnezyumoksit

TiC

Titanyumkarbür

TiB_2

Titanyumdiborür

KISALTMALAR DİZİNİ

TM	Toz Metalurjisi
MMK	Metal Matrisli Kompozit
MA	Mekanik Alaşımlama
AA2014	2014 Alüminyum Alaşımı
AA6061	6061 Alüminyum Alaşımı
AA7075	7075 Alüminyum Alaşımı
HV	Vickers Sertliği
EDS	Enerji Saçınım Spektrometresi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu

1.GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile günümüzde klasik malzemeler ihtiyaçlara cevap verememektedir. Metal gibi klasik malzemelere göre kompozit malzemelerin en belirgin özellikleri hafiflik ve sağlamlıklarıdır. Yapılan çalışmalar neticesinde, bu malzemelerin çekme, darbe dayanımlarının artırılması,yorulma, kimyasal direnç ve elektrik özelliklerinin iyileştirilmesi mümkün olmuş ve kompozit malzemeler yaygın şekilde havacılık, deniz taşıtları, otomotiv, makine, inşaat ve uzay teknolojisi alanlarında kullanılmaya başlanmıştır. Askeri alanda ise özellikle zırh malzemelerinin üretiminde metal ve seramik matrisli kompozitler giderek yaygınlaşmaktadır. Teknolojik gelişme ile birlikte silah sistemlerinde yaşanan yenilikler ve üstün nitelikli silah üretimi bunlara karşı koyabilecek balistik özellikleri yüksek zırh sistemleri çalışmalarını yaygınlaştırmıştır. Seramik kompozit zırh teknolojisi ile monolitik zırh yapılara göre balistik kabiliyetleri yüksek zırhlar üretilmektedir.

Kompozit malzemelerin özellikleri, takviye elamanı sayesinde daha da geliştirilerek, yüksek çekme mukavemeti, ergime sıcaklığı, ısıl kararlılık, kolay üretilebilirlik gibi özelliklerinin artırılması söz konusudur. Alüminyum matrisli kompozitlerin üretilmesinde B_4C , SiC , Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , TiC ve TiB_2 gibi seramik esaslı farklı takviye elemanları kullanılmaktadır. Kompozit malzeme türleri içerisinde MMK (Metal Matrisli Kompozitler) önemli bir yer oluşturmaktadır.

Bu tür kompozitlerde matris malzemesi seçiminde yaygınlıkla alüminyum, magnezyumgibi metaller tercih edilmektedir. Metal matrisli kompozitlerin şekillendirilmesinde; toz metalürjisi, basınçlı döküm, vakumlu ve basınçlı infiltrasyon tekniği, sıcak extrüzyon gibi hem sıcak hem de soğuk şekillendirme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında toz metalürjisi kullanımı son zamanlarda büyük ivme kazanmıştır. Toz metalürjisi yöntemi, karıştırılmış metal tozlarının, oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda, üretilecek parça şekli ve boyutlarına sahip kalıp içinde preslenerek şekillendirme ve ardından belirli bir sıcaklıkta sinterleme ile gerçekleştirilen bir imalat yöntemidir [1].

Al-B₄C kompozitleri üzerinde özellikle otomotiv endüstrisindeki uygulamalarda yapılan çalışmalar yeni olmakla birlikte gitgide artmaya başlamıştır. Bu kompozitlerin üretimindeki ana sorun, matris metali ile takviye partikülleri arasındaki düşük ıslanmadır. Üretim yöntemlerinden biri olan infiltrasyon yöntemi uygulama koşullarının zorluğuna sahip olup, döküm yöntemi ıslanılabilirliğin en düşük elde edildiği yöntemdir. Bunun yanında TM(Toz Metalurjisi) yöntemiyle teorik olarak ara yüzey kinetiğinin kontrolü iyi bir şekilde sağlanabilmektedir. Bu yüzden TM ile yapılan çalışmalar arayüzeydeki ıslatılabilirlik seviyelerini arttırmak üzerine yoğunlaştırılmış olup, gelişmiş fiziki ve mekanik özellikleri verecek olan ekonomik bir yöntem henüz standartlaştırılamamıştır [2].

Ayrıca B₄C tozlarının maliyetinin, SiC veya Al₂O₃ gibi takviye malzemelerine göre daha yüksek olması, B₄C takviyeli malzemeler üzerinde yapılan araştırmaların nispeten sınırlı kalmasına yol açmaktadır [3]. SiC ise genel olarak otomotiv ve ulaştırma endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir takviye malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle fren disklerinin aşınma direncini arttırmada tercih edilmektedir. Literatürde yer alan ve konuyla ilgili yapılan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Günay, M., (2009), yaptığı çalışmada, mekanik özelliklerini incelemek amacıyla kompozit numuneler üretilmiştir. Ağırlıkça %5, %10, %15 SiC takviyeli kompozit numune ve Alumix 231 kodlu dört farklı numune üretilmiştir. Üretilen MMK malzemelerin mikroyapı ve bazı mekanik özellikleri incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri parçacık dağılımının tüm numunelerde homojen olduğunu ancak kompozit numunelerde gözenekliliğin oluştuğunu göstermiştir. En yüksek çapraz kırılma dayanımı matris alaşımından üretilen numunede ölçülürken, en düşük çapraz kırılma dayanımı %15 SiC kodlu numunede ölçülmüştür [4].

Yumak ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada, zırh tasarımında kullanılan kompozit malzemelerin deformasyon karakteristiklerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, zırh tasarımlarından beklenen özelliklerin hafiflik, düşük maliyet ve yüksek hareket kabiliyeti olduğunu ve bu özelliklerin hepsinin bir arada kompozit malzemeler ile sağlanabileceğini ifade etmişlerdir [5].

Savio ve diğ. (2011) AA6063-T6 alaşımıyla desteklenmiş farklı kalınlıktaki bor karbür levhaların 7.62 mm'lik zırh delici ile olan balistik başarımlarını ve mermi hızının bor karbür levhaların balistik başarıma etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda bor karbür levha kalınlığı arttıkça merminin bor karbür içerisine girme derinliğinin azaldığı gözlenmiştir [6].

Hakan Gökmeşe, Bülent Bostan(2013), AA 2014 alaşımına ait tozları toz metalurjisi gaz atomizasyon yöntemiyle üretmişlerdir. En uygun presleme basıncını bulmak amacıyla 250-875 MPa presleme basınç aralığında yapılan testler ile 650 MPa değeri uygun bulunmuş ve bu basıçta numuneler üretilmiştir. Sinterleme uygulamaları ise 550 °C ve 650 °C aralıklarında 1, 2 ve 4 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla gözenekliliğin artış gösterdiği, şekil yönünden düzensiz şekilli olduğu tespit edilmiştir [7].

Hasırcı ve Gül(2010), çalışmalarında, B₄C partikül takviyesi ile Al matrisli kompozit malzeme üretimini toz metalurjisi yöntemiyle gerçekleştirmiş olup ürettikleri numunelerin aşınma davranışlarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Sertlik değerlerinin B₄C parçacık ilavesi ile arttığı, %20 B₄C parçacık takviyeli kompozitin en yüksek sertlik gösterdiği, %10 B₄C parçacık takviyeli kompozitin ise en yüksek aşınma direnci gösterdiği gözlemlenmiştir [8].

Rahimian, Ehsani, Parvin ve Baharvandi(2010), yaptıkları çalışma ile toz metalurjisi yöntemi ile Al₂O₃ partikül takviyeli Al matrisli kompozit malzemeler üreterek, kompozit malzeme üzerinde Al₂O₃ partikül takviyesinin boyutunun, sinterleme süresi ve sıcaklık gibi farklı parametrelerle birlikte etkilerini incelemişlerdir. Kompozit malzemeye bu şartlarda takviye ilavesinin kompozitin mikroyapısına, aşınma direncine, sertliğine olan etkilerini incelemeyi amaçlamışlardır. Takviye boyutunun artması ile sertlik ve dayanım değerlerinde dikkate değer düşmeler gözlemlenmiş, ancak sinterleme sıcaklığı artışı ile sertlik ve dayanım artış göstermiştir [9].

Topçu ve diğ. (2009), yaptıkları çalışmada, B₄C takviyeli Al matrisli kompozit malzemeler toz metalurjisi yöntemi ile üretmiş ve farklı B₄C oranları ile sinterleme sıcaklığının parçaların yoğunluk, sertlik, darbe direnci ve sürünme değerlerine olan

etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde; sinterleme sıcaklığı arttıkça yoğunluk değerlerinin teorik yoğunluğa yaklaştığı, sertlik değerlerinin ise B₄C oranı ve sinterleme sıcaklığı ile doğru orantılı arttığı gözlemlenmiştir [10].

Özkan (2007), yaptığı çalışmada, alüminyum tozları içerisine ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranında SiC seramik tanecikleri ile kompozit malzeme üretmiştir. Takviye elemanı boyut ve oranının artması ile numunelerin yoğunlukları artmış, SiC takviye elemanının oranının artması ve tane boyutunu azalması ile porozite oranlarının arttığı gözlenmiştir. Sertlik değerleri incelendiğinde, SiC oranının ve boyutlarının artması ile numunelerin sertliğinin arttığı görülmüştür [11].

Lillo (2005), çalışmasında, alüminyum alaşımlarına B₄C parçacık takviyesi yaparak yüksek sertlikte ve ağırlıkça nispeten hafif kompozit malzeme üretimini araştırmıştır. Toz metalurjisi yöntemi kullanılarak Al alaşımına B₄C takviyesi ile malzemenin mikroyapı, sertliği, aşınması gibi özellikleri incelenmiştir. Çalışmada %10 B₄C takviyeli Al 6061 matrisli kompozit numunelere 412°C'de 2 saat ısıtılma işlemi uygulanmış ve soğutulmuştur. Yapı içerisinde B₄C ilavesi ile topaklanma ve porozite miktarında artış gözlemlendi. İncelemede elastiklik modülde az miktarda artış, düşük çekme mukavemeti ve düşük ölçüde süneklik gözlemlenmiştir. Sonuçlara göre numunelere ekstrüzyon uygulanmıştır. Mikroyapı incelemesinde B₄C partiküllerinin dağıldığı, fazla gözenekleri yok olduğu, mekanik özelliklerde artış olduğu görülmüştür [12].

Kılıç(2007), yaptığı çalışmada, SiC takviyeli Al matrisli kompozit malzeme üretmiş, farklı SiC oranı ve boyutunun yoğunluk (presleme ve sinterleme sonrası), porozite, sertlik, aşınma dayanımı ve mikro yapısal özelliklere etkisini araştırmıştır. Farklı tane boyutlarında (2,87; 9,21; 14,39 ve 33,17 µm) SiC partikülleri, %5, 10 ve 15 oranında olmak üzere Al tozu ile karıştırılmış, 800 MPa presleme basıncında preslenmiş ve argon kontrollü tüp fırında 650 °C'de 2 saat süre ile sinterlenmiştir. Deneysel bulgular incelendiğinde; SiC partiküllerinin boyutu azaldıkça yoğunluğun arttığı, porozitenin ise azaldığı gözlemlenmiştir. SiC partiküllerinin hacim olarak artışı, porozitenin artmasına neden olmuştur. Sertlik değerlerinin, takviye elemanı boyutunun ve miktarının artması ile arttığı, aşınma dayanımı değerlerinin partikül boyutunun artması ile arttığı, partikül miktarının artışı ile azaldığı görülmüştür [13].

Ayvaz ve Çetinel (2014), yaptıkları çalışmada, TM yöntemiyle üretilen alüminyum esaslı kompozitlerde farklı matris kompozisyonlarının ve B_4C takviye oranlarının mikroyapı, mikrosertlik ve teorik yoğunluğa etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla, üç farklı matris kompozisyonu (Al_5Cu , Al_5Mg ve $Al_{2.5}Cu_2 Mg$) ve ağırlıkça dört farklı B_4C (%5,10, 20 ve 30) oranı kullanılmıştır. Ayrıca üretim şartlarının etkisinin incelenebilmesi amacıyla iki farklı basınç (200 ve 400 MPa) kullanılmıştır. Numuneler atmosferik gaz ortamında üç farklı sinterleme süresinde (60, 120 ve 240 dk.) sinterlenmiştir. Üretilen alüminyum esaslı kompozitlerin teorik yoğunluk, mikrosertlik değerleri ölçülmüştür ve optik mikroskop yardımıyla mikroyapı karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışma ile presleme basıncı arttıkça teorik yoğunluk ve mikrosertliğin arttığı, B_4C takviye elemanının oranındaki artış teorik yoğunluğu düşürürken, mikrosertliğinin arttığı, 60 dk. sinterleme süresinin sinterleme mekanizması için yetersiz kaldığı ve porozitelerin tam olarak kapanmadığı tespit edilmiştir [14].

Gomez ve diğ.(2009), yaptıkları çalışmada, AA6061 alaşımına B_4C ve SiC olmak üzere iki farklı takviye elemanı ilavesinin kompozit yapılarıdaki mekanik özelliklere etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda artan takviye miktarı ile birlikte yoğunluk değerlerinde azalma, %10 takviye oranında takviye malzemeler için karışımın homojenliğinin sağlandığı, numunelerde ara yüzey oluşumuna rastlanılmadığı, T6 ısıtma işlemi etkisi ile sertlik ve dayanım özelliklerinde artış sağlandığı, artan takviye oranının aşınma miktarını azalttığı görülmüştür. B_4C takviyeli kompozitin SiC takviyeli kompozite nazaran, dayanım, sertlik, süneklik ve aşınma direnci özelliklerinin daha yüksek olduğu görülmüştür [15].

Uthayakumar ve diğ.(2013), yaptıkları çalışmada %5 SiC ve %5 B_4C ile takviye edilmiş alüminyumun pin-on-disk cihazıyla kuru sürtünme aşınma özelliklerinin incelemişlerdir. Hibrit kompozitlerin aşınma davranışları 1m/s -5 m/s hızları arasında 20-100 N'luk yük skalasında değerlendirilmiştir. SiC ve B_4C parçacıklarının aşınma mekanizmalarına etkisi detaylı metalurjik muayeneler ile ortaya konmuştur. Deneysel çalışmalar hibrit kompozitlerin 60 N'a kadar 1 m/s ile 4 m/s hız skalasında aşınma direnci özelliklerini koruduklarını göstermiştir [16].

Lim ve diğ. (2003), Mg esaslı ve SiC parçacıkları ile takviye edilmiş kompozitlerin aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Deneyler pin-on-disk cihazıyla 10 ve 30 N yükler altında 0,2-5 m/s kayma hızlarında sertleştirilmiş takım çeliğine karşı yapılmıştır. Kompozitler, düşük yük altında iyi aşınma direnci göstermiş fakat SiC partiküllerinin aşınma direnci üzerine etkisi artan yükte olmamıştır. SEM incelemeleri abrasiv, oksitlenme, tabakalaşma, adhesiv, tokluğu ve erime aşınma mekanizmalarını göstermiştir [17].

Tang ve diğ.(2008),Al5083 alüminyum alaşımlı B₄C partikül takviyeli kompozitlerin aşınma davranışlarını kuru kayma yöntemiyle pin-on-disk cihazıyla incelemişlerdir.%5 ve %10 oranında B₄C katkılı numuneleri 0,6 m/s ve 1,25 m/s aralığında değişen hızlarda 3,98 ve 6,37 MPA basınç aralıklarında aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. %10 B₄C Kompozit numunelerin aşınma oranının %5 B₄C katkılı numunelerin aşınma oranından yaklaşık %40 daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Kompozit numune pim olarak hazırlanmış, karşı malzeme olarak da AISI 1045 çeliğinden hazırlanmış disk kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, aşınma genel olarak iki aşamada meydana gelmiştir [18].

Rao ve diğ. (2011), yaptıkları çalışmada, AA7010, AA7009 ve AA2024 yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının kompozit sürtünme aşınma özelliklerine matris alaşımı olarak SiC etkisini değişik basınçlarda ve sabit 3,35 m/s hız ile kuru kayma yöntemiyle incelemişlerdir. Aşınma direncinin SiC parçacıklar etkisi ile yükseldiği görülmüştür [19].

Jena ve diğ. (2010) yüksek dayanımlı zırh çeliği ve Al-7017 alaşımının farklı kalınlık ve ısıtıl işlem koşullarında 7.62 mm'lik mermiler karşısındaki balistik başarımını incelemişlerdir. Test sonuçlarına dayanarak merminin şeklinden hedefin balistik başarımı hakkında yorum yapılabileceği, 200°C'de menevişlenmiş çeliğin en yüksek balistik başarımı sağladığı, yüksek dayanım, sertlik ve uzama sertleşmesi oranının balistik başarımı artırdığı görülmüştür [20].

Wan ve diğ.(2007), oda sıcaklığında, pin-on-disk aşınma deney cihazında Ti₃Si(Al)C₂ ve SiC takviyeli Ti₃Si(Al)C₂bileşiklerinin, kuru sürtünme ve aşınma davranışını incelemişlerdir. Deney esnasında kompozit numuneler, çelik bilyeye yataklık eden AISI

52100 karşısında ve yük miktarı 5-20 N aralığında değiştirilerek aşındırılmıştır. $Ti_3Si(Al)C_2$ bileşiğinin yüksek sürtünme katsayısı 0,61-0,90 arasında ölçülmüştür. Bileşikteki SiC içeriğinin artışıyla sürtünme katsayıları ve aşınma oranları önemli derecede düşmüştür. SiC içeriğinin hacimce oranı %10 - %30 arasında tutulduğunda aşınma katsayısı 0,38-0,50 arasındaki değerlere kadar düşerken aşınma miktarı da buna bağlı olarak düşmüştür. $Ti_3Si(Al)C_2$ bileşiğinin yüksek seviyedeki aşınma direncinin sebebi sert SiC parçacıklarının, yumuşak matriksin plastik deformasyonunu ve kırılgenliğini engellemesidir [21].

Tjong ve Lau(2000), TiB_2 partikülleriyle güçlendirilmiş bakır matriksli kompozitlerin abrasiv aşınma davranışını incelemiştir. Saf bakır ve TiB_2 ile güçlendirilmiş kompozitleri eşit sıcaklık ve eşit basınçta hazırlamıştır. Bu numunelerin abrasiv aşınma davranışı, numunenin 240 elek ebatlı SiC partiküllü zımparaya karşı, pin-on-disk yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Saf bakır yumuşaklığından dolayı yüksek abrasiv aşınma kaybı sergilemiştir. Sadece %5 TiB_2 partikülü ilave edilmesi sonucunda aşınma direncinde ciddi bir iyileşme görülmüştür. SiC aşındırıcılarının mikro kesmesine direnen güçlendirme partiküllerinin hacimsel oranı arttıkça aşınma direnci de artmıştır [22].

Zhan ve diğ. (2008) SiC takviye elemanını Ni kaplayarak arayüzeyssel modifikasyonun SiC/Cu kompozit malzemelerin mekanik ve aşınma özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Ni kaplı SiC takviyeli kompozit malzemelerde porozite oluşumunun azaldığı, sertlik ve mekanik özelliklerde daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir [23].

Zhu ve diğ. (2008) $Al/Al_2O_3-TiB_2$ kompozitlerin aşınma direncini pin-on-disk aşınma testi yöntemiyle belirlemeye çalışmışlardır. Karışıma eklenen farklı B_2O_3/TiO_2 oranlarının aşınma üzerine etki ettiğini bulmuşlardır. Artan B_2O_3 ve TiB_2 oranının aşınma direncini artırdığı sonucuna ulaşmışlardır [24].

Metal Matrisli Kompozitlerin aşınma davranışları konusunda yapılan çalışmalarda; farklı matris malzemeleri ve takviye elemanları kullanıldığı görülmüş olup, takviye elemanının kompozit içerisindeki dağılımı, mikroyapıya etkisi, gözeneklilik, sertlik,

aşınma davranışı ve kopma dayanımı gibi mekanik özellikler üzerindeki tesiri, karıştırma zamanı ve hızının etkisi gibi konularda birçok araştırmaya yer verildiği görülmüştür[25-36].

Yapılan çalışmada, Al7075 matris malzemeye farklı takviye oranlarında SiC ve B₄C takviyesinin kompozit yapı üzerindeki mekanik etkileri incelenmiş ve üretilen kompozit numunelerin sonlu elemanlar yöntemi ile balistik performansları analiz edilmiştir. Al 7075 esaslı kompozitler toz metalurjisi yöntemi kullanılarak, %40, %20 ve %10 gibi takviye oranlarında üretilmiştir. Kompozitlerin üretiminde 700 MPa presleme basıncı ve 90, 120, 150 dakika olmak üzere üç farklı sinterleme süresi ve 550 °C sabit sıcaklıkta uygulanmıştır. Üretilen kompozit numuneler üzerinde, yoğunluk, sertlik ve abrasif aşınma deneyleri yapılarak elde edilen değerler mikroyapı görüntüleri eşliğinde değerlendirilmiştir. Üretilen numunelerin Ansysprogramında zırh malzemesi olarak sayısal modellemesi yapılmış sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak 7,62 mm çapında modellenen mermi ile 800 m/s yüksek hızda mermi-zırh balistik incelemeleri yapılmıştır.

Son yıllarda balistik araştırmalarda nümerik simülasyonların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Genellikle bu uygulamalar modellemenin ve sınır şartların eksiksiz tanımlandığı simülasyonlarda yararlı sonuçlar vermektedirler. Karmaşık geometrilerin ve yükleme şartlarının belirlenmesinde 3boyutlu modelleme kodları kullanılır. Genellikle sonlu elemanlar analizi olarak Explicit yöntem kullanılır. Explicit yöntem darbe dinamiğinin zamana göre değişimini ifade eder. Bu çalışmada non-linear analiz programı olan ANSYS/ Explicit Dynamics programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlarla yapılan darbe dinamiği çalışmaları balistik bilimine yeni bir bakış açısı getirmiştir.

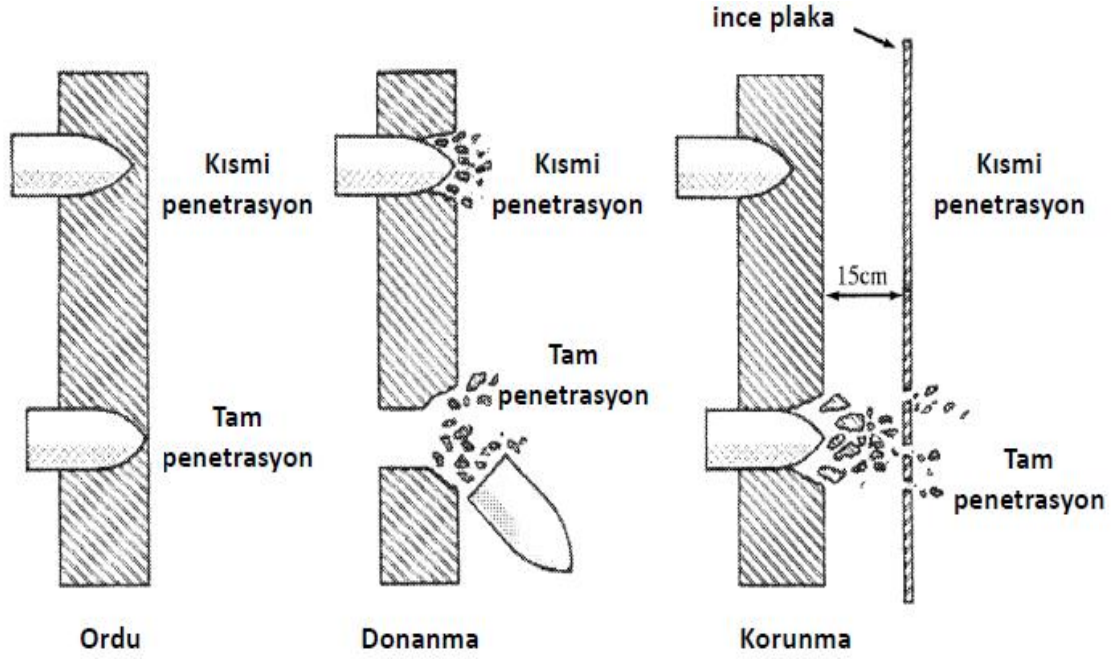
2.BALİSTİK

Balistik genel itibarıyla bir itici güç tarafından fırlatılan mermi hareketini ve bu hareketi etkileyen koşulları inceleyen bilim dalıdır. İç balistik, dış balistik ve terminal balistiği olmak üzere üç gruba ayrılır. İç balistik, merminin namlu içi hareketini dış balistik merminin ateşlendikten sonra uçuşu sırasında hava direnci, mermi çekirdeğine etki eden yerçekimi, merminin çarpması ve dengesi ile ilgilenir. Çalışmamızda sonlu elemanlar yöntemi yardımı ile ilgilendiğimiz kısım ise mermi ile hedefin çarpışma dinamiği ile ilgilenen, mermi ve hedefin çarpıştıktan sonra etkileşimlerini inceleyen terminal balistiklerdir.

2.1 Terminal Balistik

Mermi çekirdeğinin hedefle temasından durma anına kadar hedef üzerindeki delme gücü, enerjiyi hedefe iletmesi gibi etkilerini inceler. Terminal balistik, yapılan çalışmalarda özellikle zırh malzemeleri üretiminde kompozit ve seramik malzemelerin kullanımı ile yaygın bir araştırma konusu olmuş ve bu konuda her geçen gün aşama kaydedilmiştir. Zırh malzemeleri ile ilgili yapılan deneylerde genellikle farklı kalınlıklarda malzemeler incelenerek malzemelerin balistik başarımları incelenmektedir. Teknolojinin gelişmesi ile balistik koruyucu özelliğe sahip malzemelerde de iyileştirmeler ve atılımlar görülmüş tasarımcıya yüksek performanslı malzemeler sunulmuştur.

Merminin hedefe çarpmasından durmasına kadar olan sürede hedefin davranışı ve meydana gelen hasarlar balistik darbe konusu altında incelenir ve hedefin balistik başarımları belirlenir. Merminin hedefi / zırhı tahrip etmesinde penetrasyon ve perforasyon olayları gerçekleşir. Hedefte tamamen delinme olmadan merminin hedefe nüfuz etmesi penetrasyon, merminin hedefi delip geçmesi perforasyon olarak ifade edilir.



Şekil 2.1. Balistik limit hesaplarında kullanılan kırılma tanımları [37]

Zırhlarda balistik performans; merminin şekli, zırh malzemesinin sertliği veya tokluğu, zırh malzemesinin kalınlığı, çarpma hızı gibi fiziksel ve malzeme parametrelerine bağlıdır. Zırh –mermi sistemlerinin balistik performanslarını değerlendirmek için en sık kullanılan parametre balistik limittir. Balistik limit, merminin zırhta tamamıyla delme gerçekleştirmediği ve çarpma sonucunda hızının sıfıra düştüğü kinetik enerji seviyesidir. Balistik limit zırhın dayanma ölçütüdür, yüksek olması zırhın başarımı ile doğru orantılıdır.

2.2 Zırh Malzemeleri

Çelik gibi zırh malzemelerinin tek başlarına hem hafif hem de balistik başarımı yüksek olması oldukça güçtür. Bu yüzden kompozitler bu tip zırhlara karşı en önemli alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Temel olarak iki ana başlık altında zırh malzemeleri ele alınabilir. Bunlar, bütüncül zırhlar ve kompozit zırhlardır. Zırh malzemesi korumayı; merminin kinetik enerjisini plastik deformasyon ya da çatlak oluşumuyla sönmüleyip

onu yavaşlatarak, mermiyi parçalayarak, aşındırarak veya hedeften saptırarak gerçekleştirebilmektedir. Günümüzde zırh malzemesi olarak yaygın olarak metaller, seramikler ve kompozitler kullanılmaktadır.

Zırh malzemesi kullanımında, zırh malzemesinden aranan temel özellikler balistik korumayı sağlamasının yanı sıra hafif özellikte olmasıdır. Ulaşılan düşük yoğunluk ile zırhlı personelin ya da teçhizatın hareket kabiliyeti ve hızı artmaktadır. Bu nedenle zırh teknolojisindeki araştırma ve bulgular sürekli daha düşük yoğunlukla daha yüksek performansın elde edilebilmesine hizmet etmektedirler. Çelik üstün özellikleri sebebiyle halen en önemli zırh malzemeleri arasındadır. Ancak günümüzde kompozit malzemeler düşük yoğunluğu nedeniyle çeliğe göre daha yaygın kullanım alanı bulmaktadır.

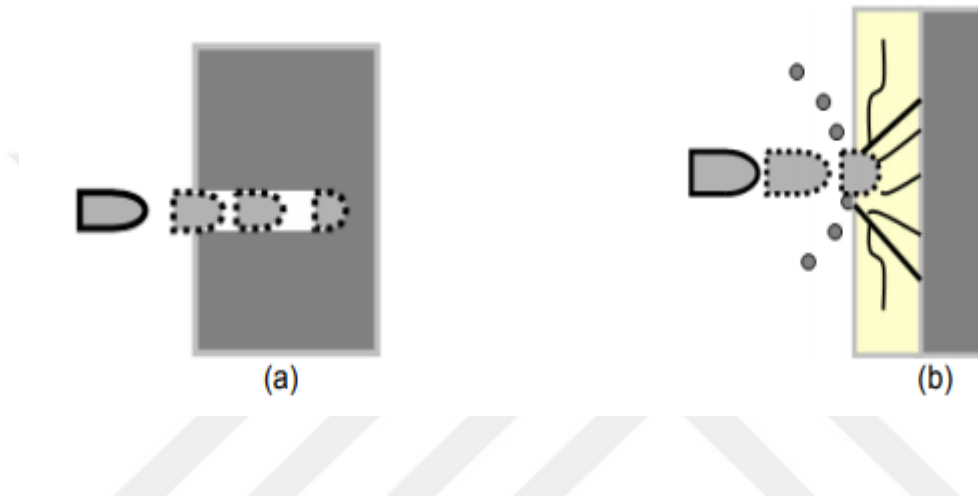
Çizelge 2.1. Zırh yapımında kullanılan malzeme özellikleri [38]

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (VHN)	Elastisite Modülü (GPa)	Erime Noktası (°C)	Fiyat Sıra
Zırh Çeliği (RHA)	7.9	<670	180	1600	1
Alumina (Al ₂ O ₃)	3.9	2000	350	1800	2
Bor Karbür (B ₄ C)	2.5	3700	450	2450	4
Silisyum Karbür (SiC)	3.2	2600	390	2100	3
Titanyum Diborür (TiB ₂)	4.5	2600	575	2980	5

Zırh yapımında balistik başarıımı etkileyen faktörleri belirlemek oldukça zordur. Malzeme kalınlığı ve yapısı, maruz kalınan mermi hızı ve geometrisi, darbe sönümleme kabiliyeti, temas açısı, çevre şartları balistik kabiliyet üzerinde önemli bir etkiye sahip olmakta olup, katmanlı kompozitlerde; bahsedilen etkilere ilave olarak katmanlar arası ara yüzey, katman sayısı, katman. Kalınlıkları ve katman kalınlık oranları balistik başarıımı etkileyen faktörlerdir.

2.3 Kompozit Zırhlar

Kompozit zırh malzemesi olarak çoğunlukla polimer, metal ve seramik esaslı sistemler üzerinde çalışılmaktadır. Bunlar arasında seramik esaslı veya takviyeli zırh sistemleri yüksek sertlik değerlerine sahip olduklarından zırh teknolojilerinde sıklıkla kullanılmaktadırlar.

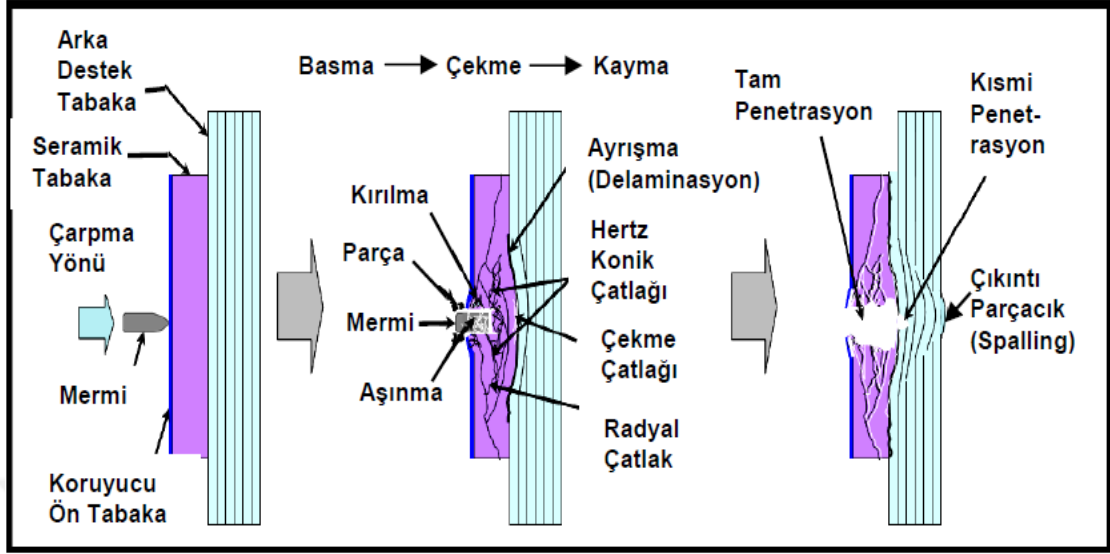


Şekil 2.2.(a) Çelik zırhda ters tabanca konsepti: mermi kinetik enerjisini zırhı delerek harcaması ve (b) seramik ve polimer kompozitten oluşan çok katmanlı zırh koruma sistemi: seramik tabakanın mermiyi deforme etmesi [39]

Seramik malzemelerde kırılma olayı;

- Mermi hasara uğraması,
- Hedef ile mermi temas ettiği andan itibaren konik bir yapının ortaya çıkması,
- Seramiğin destek plakaya temas etmesiyle, destek plakada akmanın meydana gelmesi,
- Seramiğin hareketinin devam etmesiyle, destek plakada aksenal kırıkların meydana gelmesi,

Seramik malzeme mermi ile ilk temas anında mermi kinetik enerjisini azaltır ve mermi kafasına hasar verir. Bu başlangıç anında kinetik enerji sönümlemesi olur. İkinci asamada sünek yapıdan oluşan destek plakası geriye kalan kinetik enerjiyi absorbe eder ve mermi durdurulmasını sağlar [40].



Şekil 2.3.Seramik kompozit zırha etki eden penetrasyon mekanizması [41]

Çalışmamızda takviye elemanları olarak kullandığımız B_4C ve SiC aşınmaya oldukça dirençli sert malzemelerdir. Seramik ve kompozit zırh yapımında son yıllarda oldukça yaygın kullanılmaktadırlar. Matris malzemesi $Al7075$ yüksek dayanıma sahip alüminyum alaşımlı malzemeler düşük yoğunlukları ve yüksek gerilme dayanımları nedeniyle zırh tasarımlarında tercih edilmektedirler.

Zırh malzemelerinin seçimi ve tasarımında önemli noktalardan birisi de sadece koruma etkili değil aynı zamanda hafiflikte sağlayabilmektir. Zırh malzemesinin seçiminde; fiyat, balistik performans, kullanım alanı, dayanım/ağırlık oranı gibi parametreler etkindir. B_4C ve SiC gibi yüksek aşınma direncine sahip malzemeler ile Al alaşımlarının oluşturduğu kompozit zırh yapılar homojen kompozit yapı elde edilebildiği takdirde mükemmel bir zırh malzemesi oluştururlar.

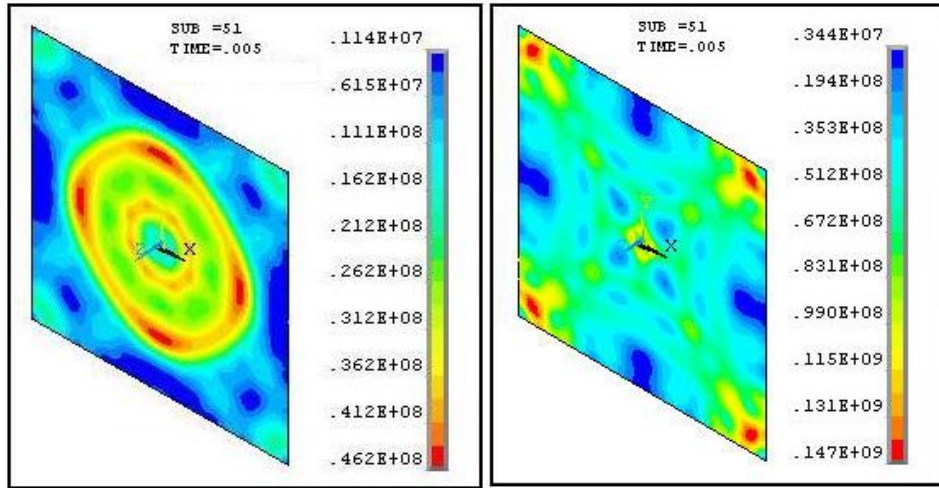
Zırha çarpan bir merminin enerjisi malzeme yapısına bağlı olarak elastik ve plastik deformasyonla veya kırılma ile sönmölenmektedir. Çelik veya Al alaşımlı sünek yapıda

zırhlar plastik deformasyona uğrarken kırılma davranış gösteren seramik ve kompozit malzemelerde etkin mekanizma kırılmadır.

2.4 Sayısal Modelleme Çalışmaları

Çeşitli darbe yükleri altındaki malzemelerin davranışları bu davranışların sonlu elemanlar yöntemi ile incelendiği bazı çalışmaların özetleri sunulmuştur. Yapılan bu çalışmalarda; darbe yükleri altında malzemelerin balistik başarımı, kırılma mekaniği gibi konular sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiş olup çalışma kapsamında ürettiğimiz numunelerin balistik başarımlarının incelenmesinde kaynak oluşturmuşlardır.

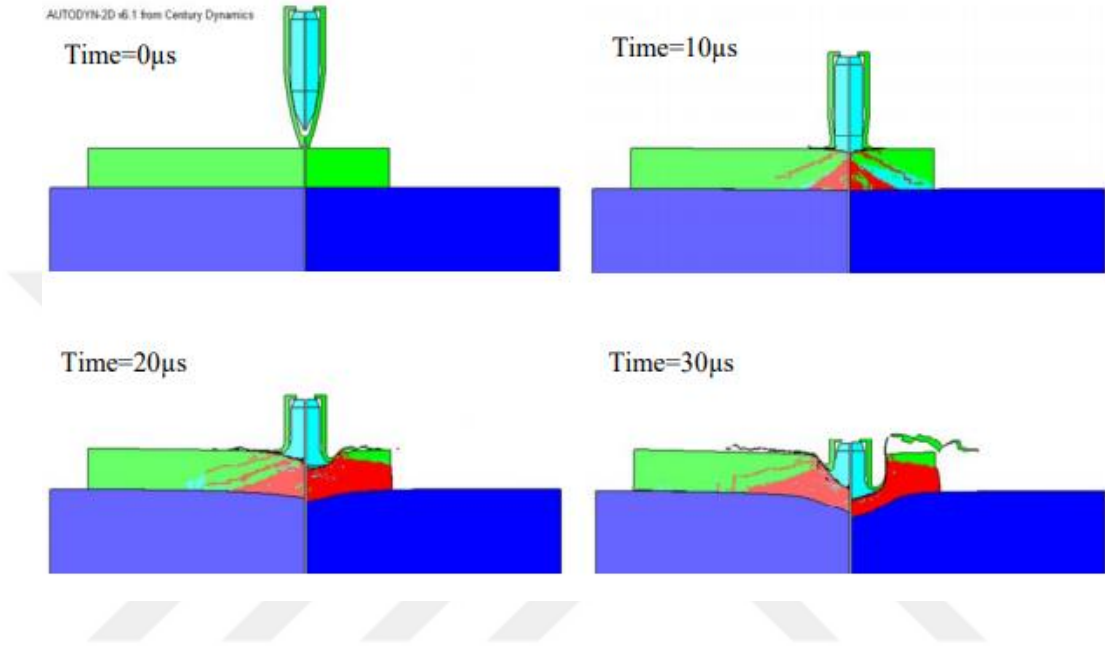
Gök ve Kişioğlu (2010), farklı malzeme özelliklerine sahip plakaların darbe altında davranışlarını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Titanyum alaşımı, 1018 Çelik plaka, Nikel alaşımı hedef malzemeleri olarak simüle edilmiş Ansys /Ls-Dyna programı ile mermi ile etkileşimi incelenmiştir. Fırlatılan merminin plakalarda oluşturduğu deformasyon ve gerilmeler elde edilmiştir [42].



Şekil 2.4. Plakalarda elde edilen Von- Misses gerilmeleri [42]

Hazell ve diğ. (2008) farklı kalınlıktaki seramik levhaların balistik başarımını değerlendirmişlerdir. Çeşitli boyutlarda, farklı geometrilerde ve farklı üretim

yöntemleriyle elde edilen SiC seramik levhaların balistik performanslarını araştırmışlardır. Autodyn 2D sonlu elemanlar programı 4 adet plakada simülasyon çalışmaları yapmışlardır. Seramik plakanın kalınlıkları arttıkça balistik direncinin iyileştiği sonucuna varmışlardır [43].

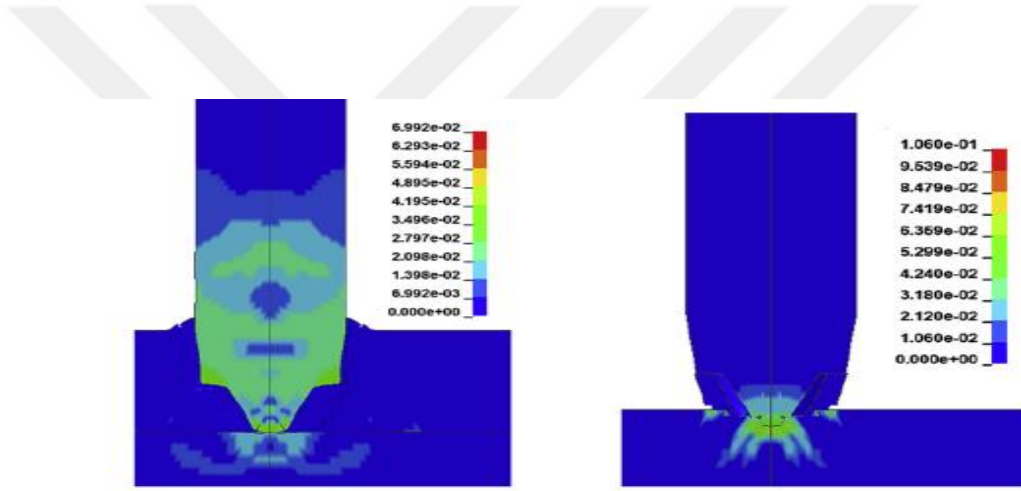


Şekil 2.5.Farklı kalınlıkta seramik levhaların mermi ile etkileşimi [43]

Hu, Wang ve diğ. (2017) farklı kalınlıklarda ürettikleri fiber katkılı seramik ile takviyelendirilmiş çelik kompozit levhaların yüksek hızda balistik testlerini kendi üretimleri olan seramik katkılı bir mermi ve standart bir mermi ile deneysel olarak gerçekleştirmiş ve sayısal modelleme yöntemi ile Ansys programında balistik başarımlarını simüle etmişlerdir. İki farklı yapıda mermi için ve farklı kalınlık ve özelliklerde numuneler için numerik ve deneysel olarak benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Seramik katkılı merminin numunelerde daha fazla nüfuz ettiği, kalınlık artışı ile numunelerin balistik başarımlarının arttığı hem deneysel hem de numerik analizlerde görülmüştür [44].



Şekil 2.6.Zırh-mermi modeli [44]



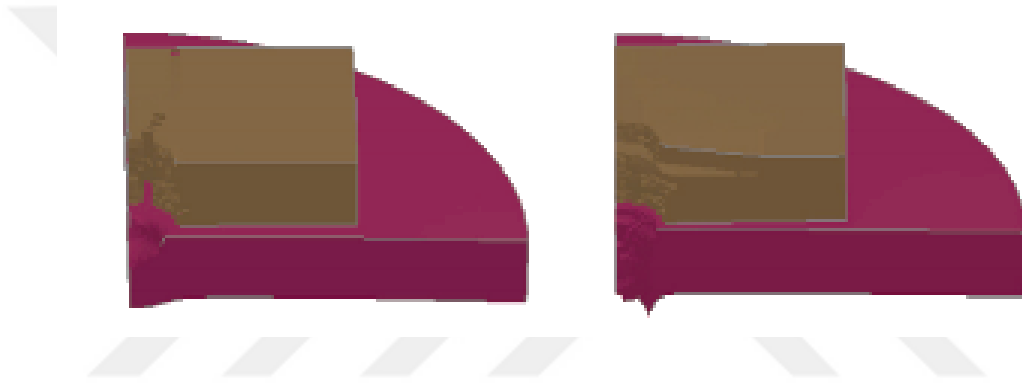
Şekil 2.7.Mermilerin farklı zırh numuneleri ile teması [44]

Yi, Yin ve diğ. (2017) ürettikleri seramik takviyeli kompozit mermi ile farklı kalınlıkta seramik takviyeli numunelerin balistik performanslarını değerlendirmişlerdir. Standart mermi ile yapılan atış ve numerik analiz ile seramik takviyeli mermi ile yaptıkları atış ve analizleri karşılaştırmışlardır. Buna göre seramik takviyeli merminin hasar vermede oldukça başarılı olduğu görülmüştür [45].



Standart mermi [45]

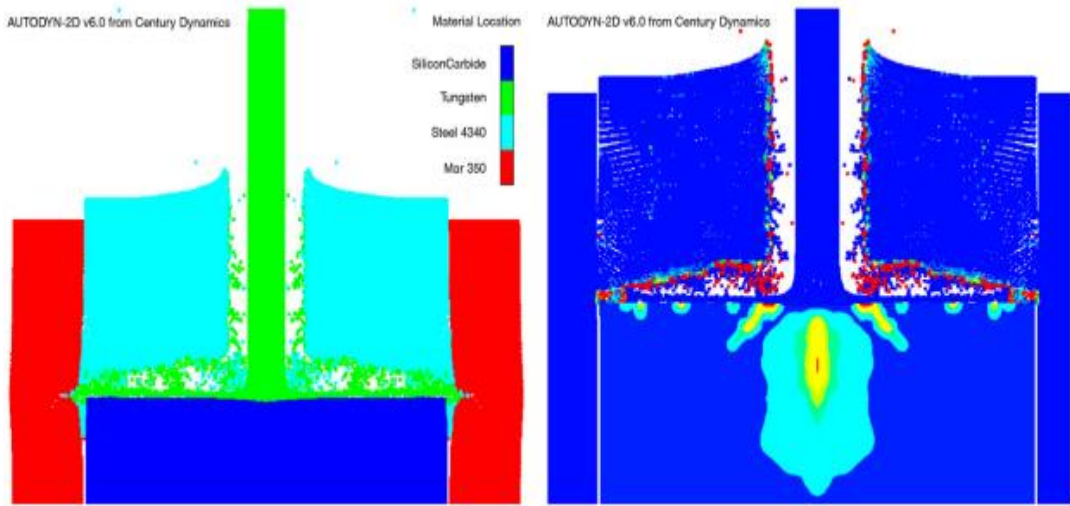
Seramik takviyeli kompozit mermi[45]



Şekil 2.8. Standart ve seramik takviyeli mermide oluşan hasarlar [45]

Chi, Serjouei ve diğ. (2013) farklı kalınlıklarda Alüminyum matrisli Alümina ile takviye edilmiş kompozit malzemelerin balistik özelliklerini incelemişlerdir. Merminin kompozit zırh yapıları üzerinde balistik limitini belirlemek amacıyla Autodyn programı ile nümerik analizler yapılmıştır [46].

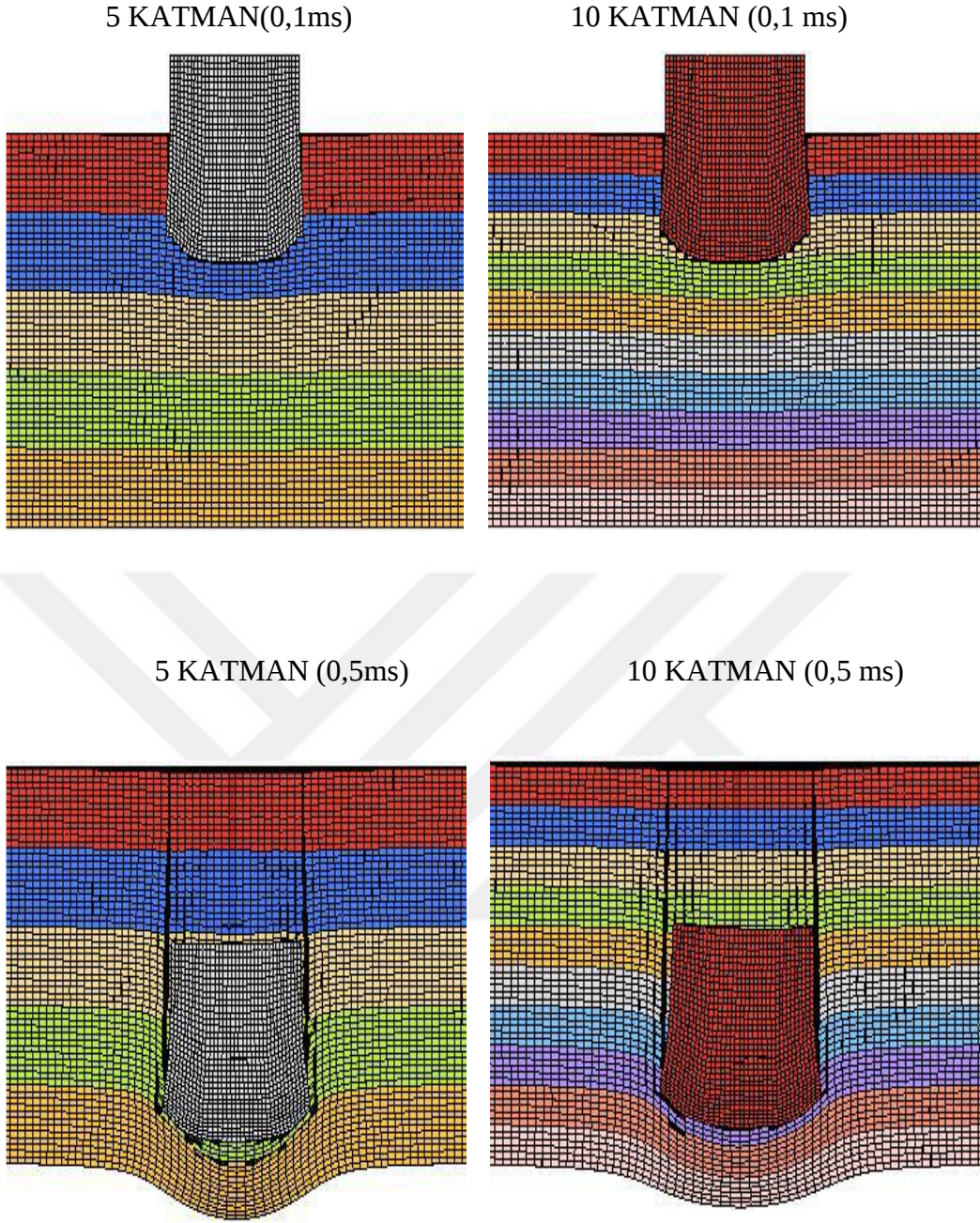
Quan ve diğ. (2006) seramik malzemelerde hasar mekanizmalarını incelemişlerdir. Deneyler 30^0 , 45^0 ve 60^0 temas açıları ile gerçekleştirilmiştir. Tugsten ve Molibden fırlatıcı malzemeler ile SiC seramik takviyeli zırh malzemesinde yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar benzer sonuçlar vermiştir [47].



Şekil 2.9. Tungsten ile SiC levhanın çarpışma anı gerilim dağılımı [47]

Özer ve diğ. (2013) çalışmalarında yüksek hızlı darbe etkisi altında Titanyum, TI 6%AL4%V ve Çelik 4340 levhalarının artan levha kalınlığı ve değişen vurucu geometrisine bağlı olarak dinamik davranışları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre 1 mm kalınlıktaki zırh levhalar bütün vurucu tiplerinde delinirken 2 m kalınlıktaki levhalarda yalnızca sivri uçlu vurucu tipinde delinme görülmüştür. Levhaların deformasyon miktarlarına bakıldığında her üç vurucu tipinde de TI6%AL4%V levhalar içeriğindeki alüminyumun da etkisiyle en yüksek değerlere sahiptir [48].

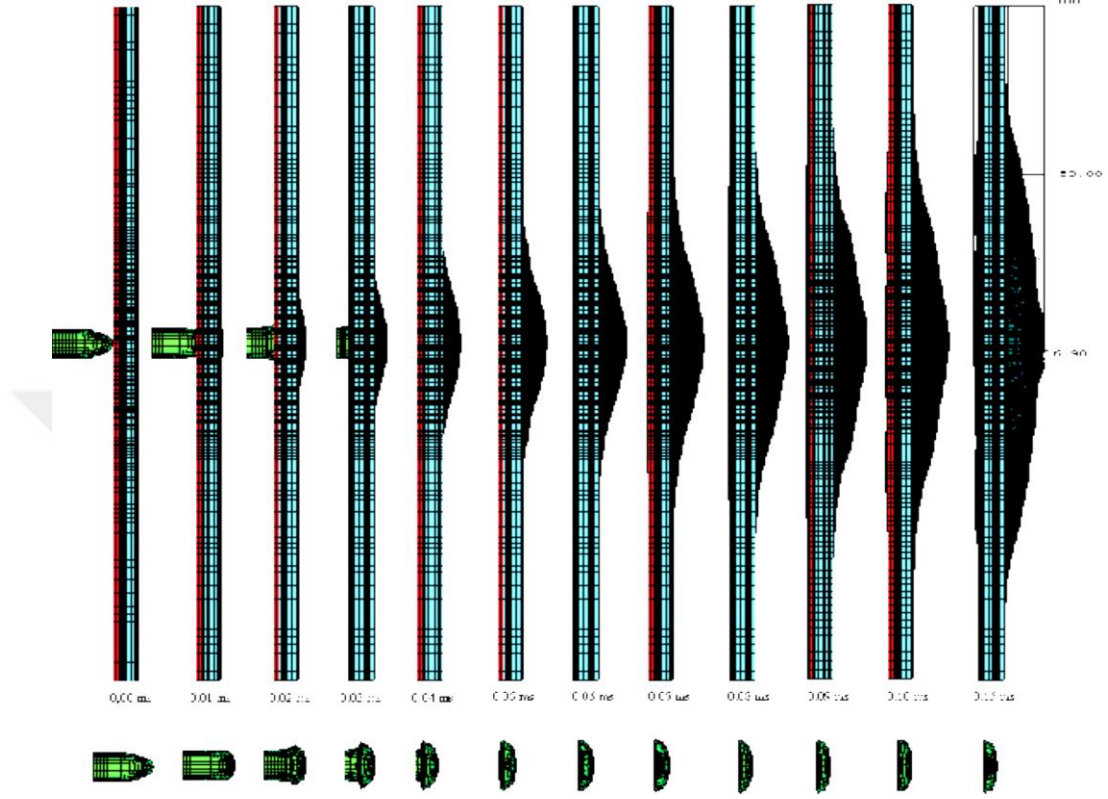
Aydın ve Acar (2017) Seramik (SiC) ve metal (Al) bileşenlerden oluşan fonksiyonel derecelendirilmiş plakaların kalınlık değişimi boyunca balistik performanslarını incelemişlerdir. Analizler de LS-DYNA sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş plakaların daha fazla katman sayısı ile üretilmesinin plaka dayanımına ilave bir katkı sağlamayacağı şeklinde yorumlanabilir [49].



Şekil 2.10.Farklı katman sayısına sahip levhalarda oluşan deformasyon kesitgörüntüleri [49]

Demircioğlu ve diğ. (2011) 9 mm mermi tehdidine karşı Kevlar ve st37 sac malzeme kullanılarak elde edilen zırhmalzemesine balistik test uygulamışlardır. Aynı zamanda sonlu elemanlar programı Autodyn kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlarla deneysel

Çalışma karşılaştırılmıştır. Kevlar ve saç malzemeden oluşan zırh numuneleri, Kevlar 5 kat yapıldığında delinmiş olup katman sayısı arttığında iyileşme görülmüştür [50].



Şekil 2.11.Sayısal analizde 11 kat Kevlar ve st 37 malzemede deformasyon [50]

Krishnan ve diğ. (2010) balistik deneyler ve sonlu elemanlar analizi yardımıyla monolitik Alüminyum zırh malzeme ve seramik takviyeli Alüminyum kompozit zırh malzemenin balistik dayanımını incelemişlerdir. Katman kalınlığının balistik başarımlarına etkisinin incelendiği çalışmada analiz çalışmasının deney sonuçlara benzer çıktılar verdiği görülmüştür [51].

3.KOMPOZİT MALZEMELER

3.1 Kompozit Malzemenin Tanımı ve Genel Özellikleri

Belirli istenilen özelliklere sahip bir malzeme elde etmek için, özellikleri ve kimyasal bileşenleri birbirinden farklı, birbiri içerisinde makro anlamda çözünemeyen iki ya da daha fazla malzemenin birleştirilmesi ile meydana gelen yeni malzemeye kompozit malzeme denir. Bileşenlerden biri takviye fazı diğeri ise matris olarak adlandırılmaktadır.

Kompozit malzeme üretiminden önce tasarım aşamasında, ürünün hangi alanda kullanılacağı ve kullanıma yönelik özel gereksinimlerin neler olacağının belirlenmesi gereklidir. Kompozit bir parçanın tasarım aşamasında maliyet, ham malzeme özellikleri, çevre koşullarının üretime etkisi, imalat yöntemi, kalite kontrol yöntemleri gibi bir dizi faktör birlikte değerlendirilmelidir[52].

Kompozit malzemelerin kullanılan matris ve takviye elemanına bağlı olarak; yüksek mukavemet, kolay şekillendirebilme, elektriksel özellikler, ısıya ve ateşe dayanıklılık, titreşim sönümleme, korozyon ve kimyasal etkilere dayanıklılık, kalıcı renklendirme gibi tek bileşenle elde edilemeyecek üstün özellikleri bulunmaktadır.

3.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri, matris malzemelerine ve takviye elemanların şekillerine göre iki şekilde sınıflandırmak mümkündür

Matris malzemesine göre;

- Polimer matrisli kompozitler
- Seramik matrisli kompozitler
- Metal matrisli kompozitler

Takviye elemanının şekline göre;

- Tek filament
- Uzun ve kısa elyaf (fiber)
- Parçacık
- Laminant (katmanlı)

3.2.1 Matris Malzemesine Göre Kompozitler

Matris malzemelerine göre kompozitler üç ana gruba ayrılır;

- Polimer matrisli kompozitler
- Seramik matrisli kompozitler
- Metal matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozit malzeme kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bu durum karbon, polietilen, aramid gibi yüksek performans gösteren fiberlerdeki gelişmeler ve matris malzemesi olarak kullanılan polimerlerdeki gelişmeler neticesinde ortaya çıkmıştır.

Polimerlerin üretimi yüksek basınç ve sıcaklık gerektirmez dolayısıyla parça üretimi görece kolaydır. Düşük sıcaklık sayesinde takviye elemanlarda herhangi bir bozunma görülmez.

Seramik matrisli kompozitler; yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi dayanım göstermekle birlikte, rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Ayrıca yalıtkanlık özellikleri de çok güçlüdür.

Sert ve kırılgan özellik gösteren seramik malzemeler, az miktarda kopma uzamasına uğrarlar, düşük tokluk gösterirler ve ani ısı değişimlerine karşı dayanıksızdırlar. Bu nedenlerden dolayı liflerle takviye edilirler. Yüksek elastisite modülüne sahiptir ve çalışma sıcaklıkları da yüksektir.

Sürekli fiberli,süreksiz fiberli ve partiküllü olmak üzere üç tip seramik matrisli kompozit malzeme grubu bulunmaktadır.Sürekli fiberlerin tokluk değerleri diğer gruplara nazaran çok daha yüksektir ve tercih edilme sebebidir.

Metal esaslı kompozit malzemeler,istenilen özelliklerde malzeme üretmek amacıyla en az biri metal olan birden fazla malzemenin uygun yöntemlerle bir araya getirilmesi ile oluşturulur. Metal esaslı kompozit malzemeler, malzemelerin tek başlarına alaşımlarla elde edilemeyen özelliklerini sağlamak için, ana metal matris içinde sürekli fiber, kısa fiber, whisker veya partikül şeklinde takviye fazı içerirler.

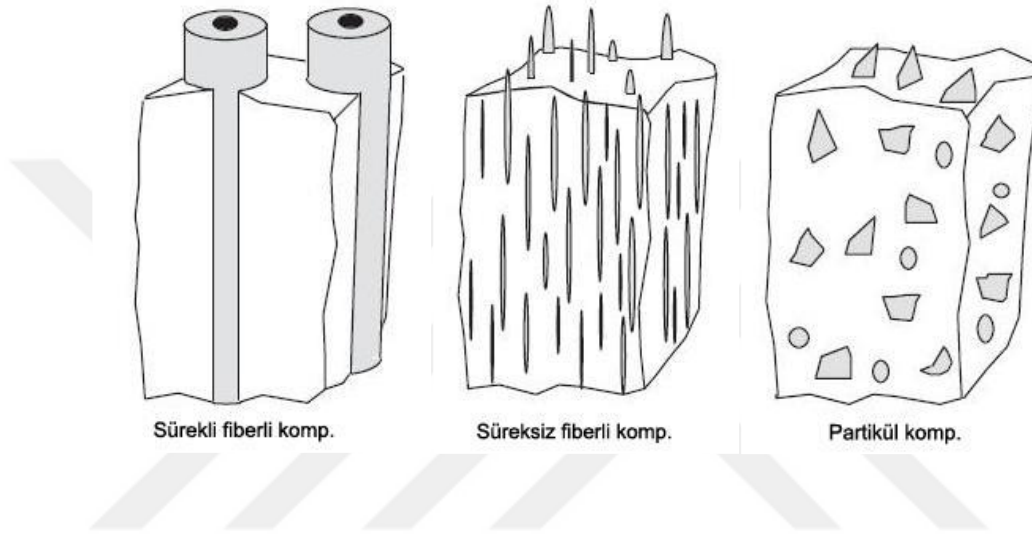
MMK malzemeler düşük yoğunluk, yüksek elastiklik modülü, yüksek dayanım, daha iyi yüksek sıcaklık özellikleri, düşük ısıl genleşme, daha düşük aşınma direnci gibi özellikleriyle blok metallere göre birçok avantaj sağlamaktadır.MMK'lerde ana yapı her zaman metal malzemedan oluşmakta olup, bu malzemeler genellikle saf halde değil, alaşım olarak yapıda bulunmaktadır. Ana yapı malzemesi olarak alüminyum, titanyum, bakır, nikel, magnezyum ve çelik kullanılabilir.

Anayapı malzemesinin kompozit içerisindeki görevi; üzerine gelen yükün takviye malzemesine iletilmesi ve bütüncül yapının korunabilmesini sağlamaktır. Bir metalin anayapı malzemesi olabilmesi için takviye malzemesi ile iyi bağ yapabilmesi, takviye malzemesi ile ısıl genleşme katsayılarının çok farklı olmaması, düşük yoğunluğa sahip olması ve üstün mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir.

MMKmalzemelerin en önemli üstünlüklerinden biriside matris alaşımlarına göre daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirleridir. Seramik takviye malzemesi ilavesinin matris alaşımının yüksek sıcaklık mukavemetini artırdığı tespit edilmiştir. MMK malzemelerin bir başka avantajı matris alaşımına göre kullanılan seramik takviye malzemesinin düşük yoğunluktan dolayı kompozitinde yoğunluğunun düşmesidir [53].

3.2.2 Takviye Elemanın Şekline Göre Kompozitler

Kompozit malzemeler, yeni özelliklerini içerisindeki takviye elemanlarından kazanmaktadır. Matris malzemesi ile uyumlu bir takviye elemanı sayesinde istenilen üstün özellikleri elde etmek mümkündür. Takviye oluşturmak için oksit, karbür veya nitrür bileşimleri yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. Takviye elemanının şekline göre kompozit çeşitleri [54]

3.3 MMK (Metal Matrisli Kompozitler)

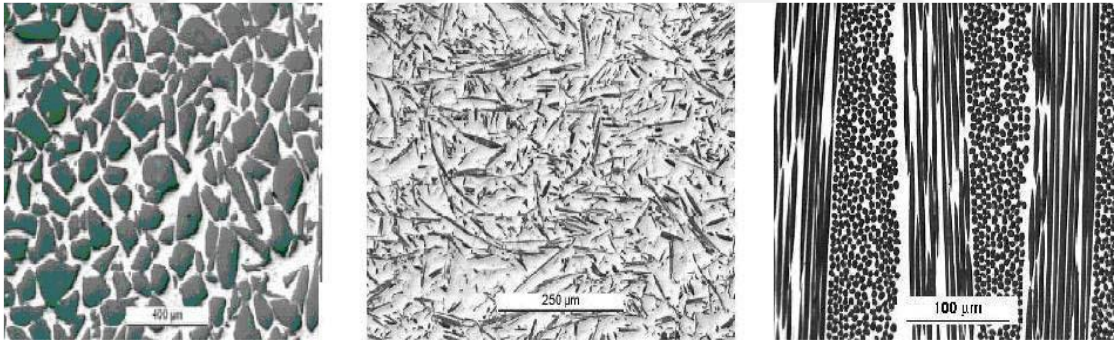
Hafif metaller, kompozitler için matris malzemesi olarak çok cazip olmaktadır. Bunlar plastiklerden daha yüksek elastik modül, dayanım ve tokluğa sahip olup yüksek sıcaklıklarda özellikleri de daha iyidir.

MMK malzemelerde çok yaygın olarak kullanılan matris malzemesi, düşük yoğunluklu, iyi tokluk ve mekanik özelliklere sahip olan alüminyum, magnezyum gibi hafif metaller ve alaşımlarıdır. Bu nedenle hafif yapı konstrüksiyonlarda tercih edilirler.

Atmosfere karşı korozyon dayanımının da çok yüksek olması diğer karakteristik özelliklerinden biridir.

MMK malzemeler, alışlagelmiş mühendislik malzemelerine göre yüksek dayanım, düşük ağırlık oranı, güçlendirilmiş mekanik ve ısı özellikler ve kolay şekillendirilmelerinden dolayı çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. MMK'ler, uzay ve havacılık, otomotiv ve demiryolu araçları, elektronik sistemler, güç iletimi, aşınma dirençli malzemeler gibi endüstriyel alanlarda giderek artan bir oranda kullanılmaya devam etmektedir [55].

MMK'lerde anayapı her zaman metal malzemedan oluşmakta olup, bu malzemeler genellikle saf halde değil, alaşım olarak yapıda bulunmaktadır. Ana yapı malzemesi olarak alüminyum, titanyum, bakır, nikel, magnezyum ve çelik kullanılabilir. Anayapı malzemesinin kompozit içerisindeki görevi üzerine gelen yükün takviye malzemesine iletilmesi ve bütüncül yapının korunabilmesini sağlamaktır. Bir metalin anayapı malzemesi olabilmesi için takviye malzemesi ile iyi bağ yapabilmesi, takviye malzemesi ile ısı genleşme katsayılarının çok farklı olmaması, düşük yoğunluğa sahip olması ve üstün mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir [56].



Şekil 3.2. Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitlerin SEM görüntüleri, a- Parçacık b- Kısa fiber c -Sürekli fiber [57]

3.3.1 Alüminyum Matrisli Kompozitler

Metal malzemeler içinde Al ve alaşımları, gerek saf olarak gerekse alaşım olarak en yaygın olarak kullanılan malzeme gruplarından birisidir.

Al alaşımlarının yaygın kullanılmasının nedenleri;

- Dayanım / özgül ağırlık oranının yüksek olması,
- Elektrik iletkenliğinin yüksek olması,
- Atmosfere ve diğer ortamlara karşı korozyon direncinin iyi olması,
- Plastik deformasyon kabiliyetinin iyi olması

Alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki en büyük etken anayapı ve takviye elemanı ara yüzeyidir. Bundan dolayı; düşük basınçta sıvı fazda üretim yapılmak istenir ise ıslatmanın düzgün gerçekleşmesi, anayapı ve takviye malzemesi ara yüzeyinde reaksiyon gerçekleşmemesi ve dolayısıyla gevrek yeni fazların oluşmasının önlenmesi, ana yapı ve takviye malzemenin iyi bağ yapması sağlanmalıdır.

Seramik partiküller, alüminyum esaslı kompozitlerde en çok kullanılan takviye malzemeleridir. Takviye malzemesi olarak en çok kullanılan seramik partiküller B_4C , SiC , Si_3N_4 ve Al_2O_3 'dir.

Partikül takviyeli MMK malzemelerin yaygın olarak kullanımının en önemli nedenlerinden biri de aşınma karakteristikleridir. Aşınma, malzemenin yüzeyinde zamanla meydana gelen malzeme kaybıdır.

SiC , Al_2O_3 , TiC , B_4C gibi oldukça sert partiküller, metal matrisin aşınma direncini arttırırken, grafit partiküller de yağlayıcı özellik sağlarlar. Yapılan çalışmalar, partikül takviyeli Al matrisli kompozitlerde aşınma direncinin, takviye elemanı miktarı ile doğru orantılı olarak arttığını göstermektedir.

4. KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Matris ve takviye elemanların iyi bağ kurabilmeleri kompozit malzemenin istenilen üstün özelliklerde elde edilebilmesi için elzemdir. Kompozit yapının kalitesi seçilen üretim yöntemi ile matris ve takviye elemanın iyi ıslanabilmesine bağlıdır. Üretim yöntemleri, üç gruba ayrılmaktadır.

- Sıvı hal işlemleri
- In-situ işlemleri
- Katı hal işlemleri

4.1 Sıvı Hal İşlemleri

Sıvı hal üretim yöntemi genel olarak kullanılacak ana matris malzemenin ergitilerek takviye elemanı ile bir araya getirilmek suretiyle matris ve takviye elemanı arasında bağ oluşturulmasıdır. Yaygın olarak şu yöntemler uygulanır;

- İnfiltrasyon
- Sıkıştırırmalı döküm
- Basınçlı döküm
- Yarı katı döküm
- Karıştırırmalı döküm
- Püskürtme çökmesi

4.2 In-Situ İşlemler

İn-situ üretim tekniğinde malzeme içerisinde farklı fazların oluşturulması ve bu fazlardan bazılarının matris elemanı olarak diğer fazların ise takviye elemanı olarak davranması ile kompozit üretimi sağlanır.

4.3 Katı Hal İşlemleri

Metal matrisli kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerin başında katı hal üretim yöntemleri gelmektedir. Katı hal üretim yöntemlerinde, matris malzemesine ergime sıcaklığı altındaki bir sıcaklıkta farklı işlemler uygulanarak kompozit malzemeler üretilmektedir. Bu yöntemler sayesinde, sıvı hal üretim yöntemlerine göre mekanik özellikleri daha iyi kompozit üretimi mümkün olmaktadır. Ancak, katı hal yöntemlerinde üretim maliyetleri diğer yöntemlere göre daha fazla olmaktadır [58]. Yaygın olarak şu yöntemler uygulanır;

TM (Toz Metalurjisi)

Difüzyonla bağlama

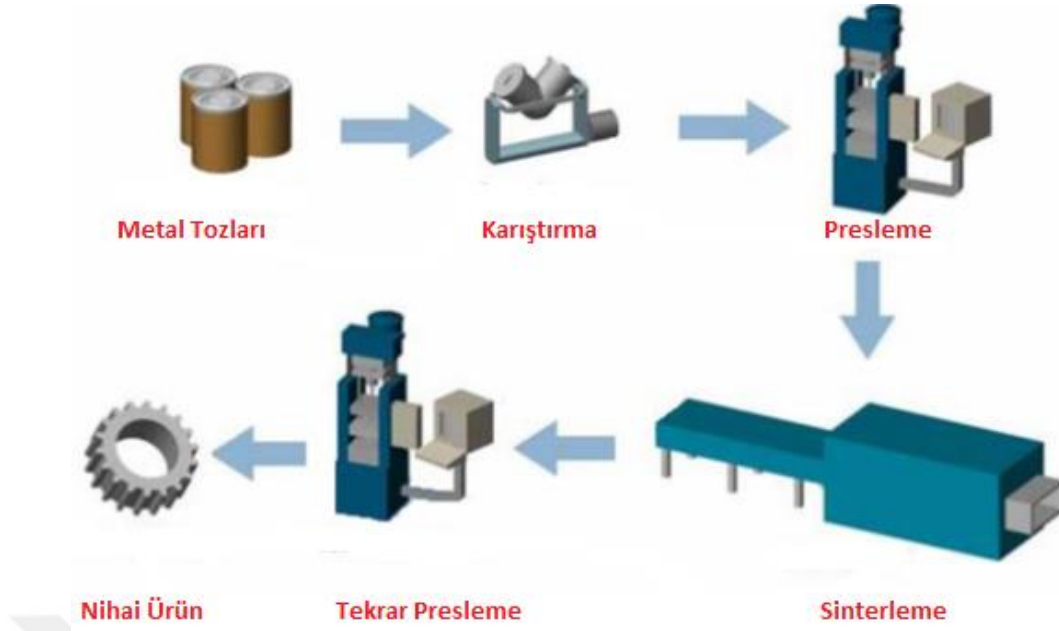
Haddeleme

Toz metalürjisi yöntemi, katı hal üretim yöntemleri içerisinde en yaygın kullanılan yöntemdir. Toz metalürjisi ile toz halindeki matris ve takviye elemanları eş zamanlı karıştırılarak mekanik olarak alaşımlanmaktadır. Daha sonra üretilen bu kompozit tozlar bir pres vasıtasıyla preslenmektedir. Preslemeden sonra sinterleme işlemi yapılmaktadır.

4.3.1 Toz Metalurjisi Yöntemi

TM çok küçük partikülleri birbirine bağlayarak parça haline getirme işlemidir. Toz halinde parçalar yüksek basınçta preslenerek nispeten yüksek sıcaklıklarda sinterlenerek parça üretilir. Toz halindeki metaller, alaşımlar, seramik ve polimer malzemeler önce birbirleriyle karıştırılıp belirli bir basınç altında şekillendirilirler. Ardından bu parçalar matris malzemenin ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta sinterlenir ve parçacıkların temas yüzeyleri arasında kuvvetli bir bağ oluşması sağlanır ve böylece istenilen özellikte kompozit üretimi gerçekleştirilir.

Toz metalürjisi oldukça karmaşık, hassasiyeti yüksek parçaların üretiminde kolaylıkla kullanılır. Malzeme kaybı oldukça azdır bununla beraber belirli derecede gözenek (porozite) ve geçirgenlik elde edilir.



Şekil 4.1. Toz metalurjisi yöntemi ile malzeme üretimi

Toz metalurjisi, süreksiz takviyeli MMK'lerin üretiminde kullanılan en yaygın yöntemdir. Yöntemin uygulanmasına ilişkin şematik gösterim Şekil 4.1.' de verilmiştir. Buna göre, matris ve takviye fazı tozları karıştırılarak istenilen şekildeki kalıba dökülür. Daha sonra tozların bağlanması için sıkıştırma kuvveti uygulanır. Toz metalurjisinin birçok üstünlüğü yanında bazı eksiklikleri de mevcuttur. Yüksek mukavemetli, aşınma direnci yüksek çelikler kalıp üretiminde kullanıldığından, toz metalurjisinde kullanılan kalıplar oldukça maliyetlidir.

Toz metalurjisi yönteminin döküm, dövme gibi geleneksel yöntemlere alternatif olması, en az 10000 parça gibi yüksek üretim miktarları ile mümkündür. Az miktarda üretim bu yöntemi ekonomik olmaktan çıkarır. Uygun boyut, şekil ve paketleme özelliklerine sahip metal tozunu güçlü ve yüksek performanslı bir şekle dönüştüren toz metalurjisinde temel basamaklar; toza şekil verilmesi veya sıkıştırma işlemi ve sinterleme yolu ile tozların ısı birleştirilmesidir.

5.MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında matris elemanı olarak 74 µm tane büyüklüğünde Al7075, 44 µm tane büyüklüğünde B₄C ve 63 µm tane büyüklüğünde SiC tozları kullanılmıştır. Çizelge5.1’de kullanılan deney malzemelerine ait bazı teknik özellikler verilmiştir.

Çizelge 5.1. Deney malzemelerinin teknik özellikleri

Al 7075							
%Fe	%Si	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Ti	%Cr
0,50	0,40	1,21-2,0	0,30	2,1-2,9	5,1-6,1	0,20	0,18-0,28
Erime noktası °C		Sertlik knoop		Yoğunluk g/cm ³		Parçacık Şekli	
635		191		2,81		yuvarlak	
SiC							
	%Si	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%SiO ₂	%P ₂ O ₅	%SO ₃	%C
	61-66	0,7-1,2	0,6-1,1	0,02	0,07	0,3	22-26
Erime noktası °C		Sertlik knoop		Yoğunluk g/cm ³		Parçacık Şekli	
2730		2480		3,21		köşeli	
B ₄ C							
%B				%C			
78,28				21,72			
Erime noktası °C		Sertlik knoop		Yoğunluk g/cm ³		Parçacık Şekli	
2760		2750		2,52		köşeli	

Al 7075, SiC ve B₄C tozları ile Çizelge 5.2’de belirlenen ağırlık oranlarında toz karışımlar hazırlanmıştır. Karışımların hazırlanmasında pervaneli karıştırıcı kullanılmıştır. Her numune için 600 rpm hızda 1 saat süreyle karıştırma işlemi yapılarak kompozit yapı içerisinde homojen bir dağılım elde edilmiştir. Kompozitlerin karışımların ağırlık-hacim oranları Eşitlik 1’e göre hesaplanmıştır.

$$V_f = \frac{M_P/P_P}{\frac{M_m}{P_m} + \frac{M_P}{P_P}}(1)$$

Burada;

V_f = Parçacık hacim oranı

M_P = Parçacık ağırlığı (g)

P_P = Parçacık yoğunluğu (g/cm³)

M_m = Matris ağırlığı (g)

P_P = Matris yoğunluğu (g/cm³)

Çizelge 5.2. Kompozit numune karışım oranları

NUMUNE 1 %40 SiC + %60 Al7075	NUMUNE 2 %20 SiC + %80 Al7075	NUMUNE 3 %10 SiC + %90 Al7075
NUMUNE 4 %40 B ₄ C + %60 Al7075	NUMUNE 5 %20 B ₄ C + %80 Al7075	NUMUNE 6 %10 B ₄ C + %90 Al7075
NUMUNE 7 %20 SiC + %20B ₄ C + %60 Al7075	NUMUNE 8 %10 SiC + %10B ₄ C + %80 Al7075	NUMUNE 9 %5 SiC + %5 B ₄ C + %90 Al7075

Kompozit karışımlar hidrolik preste 700 MPa basınç altında sıkıştırılmış ve 35 mm çapında 15 mm kalınlığında numuneler üretilmiştir.

Üç farklı sinterleme süresi üzerinde inceleme yapılacağı için, her numuneden üç adet üretilerek toplamda 27 adet kompozit numune elde edilmiştir. Daha sonra kompozit numuneler 550 °C’de, argon atmosferi altında, 90, 120 ve 150 dakika olmak üzere üç farklı sinterleme süresinde ısıtılma işlemi tabi tutulmuştur. Sinterleme işlemi sonrası elde edilen kompozit numunelere ait toplu görünüş Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Üretimi tamamlanan SiC ve B₄C takviyeli kompozit numuneler

Sinterleme işleminden sonra numunelerin havadaki ağırlığı, daha sonra da sudaki ağırlığı hassas terazi ile ölçülmüş ve Arşimet Prensibine göre Eşitlik (2) kullanılarak (%) cinsinden teorik yoğunlukları belirlenmiştir.

$$Dg = \frac{W_a}{W_a - W_b} \times D_{H_2O} \quad (2)$$

Burada;

D_g = Numunenin görünür yoğunluğu (g/cm^3)

D_{H_2O} = Suyun yoğunluğu (g/cm^3)

W_a = Kuru numunenin havadaki ağırlığı (g)

W_b = Numunenin su içindeki asılı ağırlığı (g)

Kompozit numunelere ait mikroyapıları incelemek amacıyla ilk olarak numunelerin yüzey hazırlama işlemi yapılmıştır. Bu amaçla sırasıyla 400, 800, 1200, 2400 mesh zımparalama, 3 μm parlatma ve dağlama işlemi yapılmıştır. Daha sonra hazırlanan kompozit numunelerin, *Nikon ECLIPSE MA200* model optik mikroskopta 50x ve 400x olmak üzere iki farklı büyütmede görüntüleri çekilmiştir. İlave olarak, *FEI QUANTA 400F* model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile 200x ve 1000x büyütmede görüntüler çekilmiştir. Şekil 5.2 ve 5.3'te görüntülerin çekildiği optik ve SEM mikroskoplarına ait fotoğraflar verilmektedir.



Şekil 5.2. Optik Mikroskop



Şekil 5.3. Taramalı Elektron Mikroskobu

Deneylerin ikinci aşamasında, Brinell yöntemi kullanılarak sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri EN ISO 4498 [59] ve TS EN ISO 6506-1 [60] standartlarına uygun olarak, Qness Q250M model sertlik ölçme cihazında yapılmıştır. Şekil 5.4'te sertlik ölçümlerinin yapıldığı cihaz görülmektedir.

Sertlik ölçümlerinde 2,5 mm çaplı bilya uç, 62,5 kg yük ve 14 saniye deney süresi uygulanmıştır. Sertlik ölçümlerinde her numune üzerinde 5 farklı noktadan ölçüm yapılarak ortalama değer hesaplanmıştır. Kompozit numunelerin sertlik değerleri TS EN ISO 6506-1 standardındaki Eşitlik 3 kullanılarak belirlenmiştir.

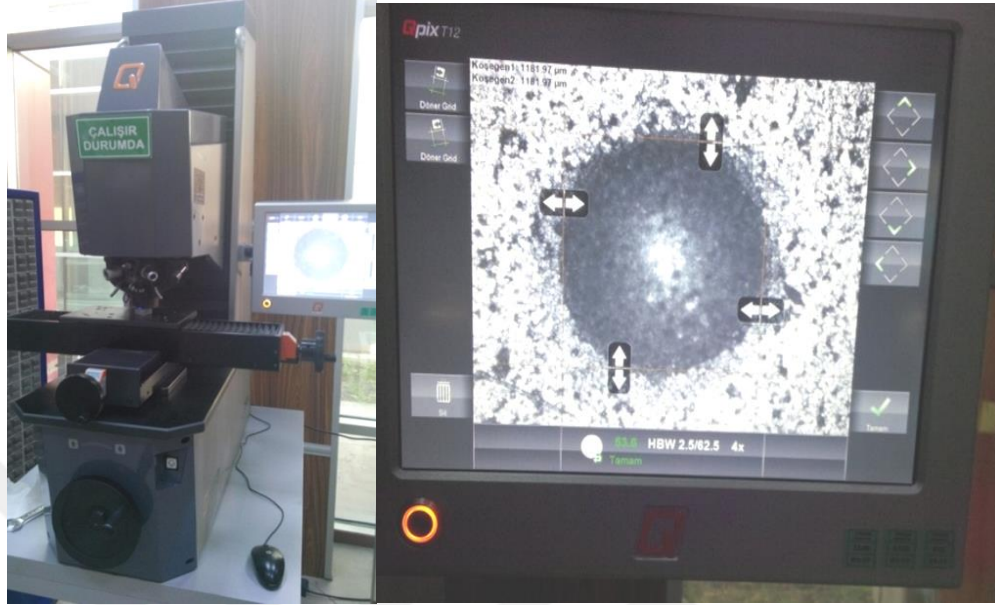
$$HBW = 0,102 \times \frac{2F}{\pi D^2 (1 - \sqrt{1 - d^2 / D^2})} \quad (3)$$

Burada;

F= Deney kuvveti (N)

D=Bilye çapı (mm)

d= İzçapı (mm)



Şekil 5.4. Sertlik Ölçüm Cihazı

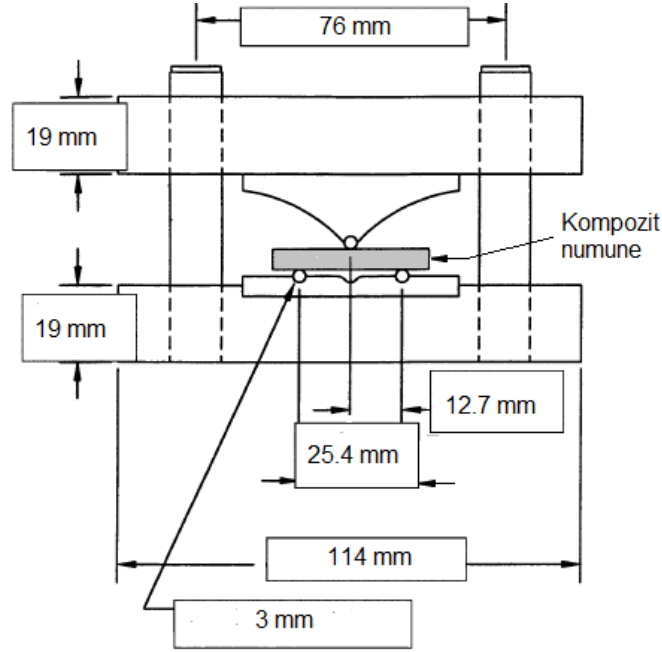
Üretilen kompozitlerin mekanik davranışlarını belirlemek amacıyla çapraz kırılma (üç nokta eğme) deneylerini yapmak üzere ASTM-B 312[61] ve ASTM-B 528-05 [62] standardına uygun olarak, her takviye oranı için, 6,35×12,7×31,7 mm ölçülerinde numuneler hazırlanmıştır.

Kompozit numuneler, şematik olarak Şekil 5.5'te gösterilen standart çapraz kırılma deney aparatında kırılma deneyine tabi tutulmuştur. Kırma işlemi 0,05 kN/sn yükleme hızıyla ELE marka hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Presten elde edilen yük değerlerine (P) göre numunelerin çapraz kırılma mukavemetleri Eşitlik 4'te verilen formül ile hesaplanmıştır:

$$TRS = \frac{3 \times P \times L}{2 \times t^2 \times w} (4)$$

Burada;

TRS : Çapraz kırılma mukavemeti	(MPa)
N : Deney parçasının kırıldığı anda ölçülen yük	(N)
L : Destekler arası uzaklık	(mm)
t : Deney parçasının yüksekliği	(mm)
w : Deney parçasının genişliği	(mm)

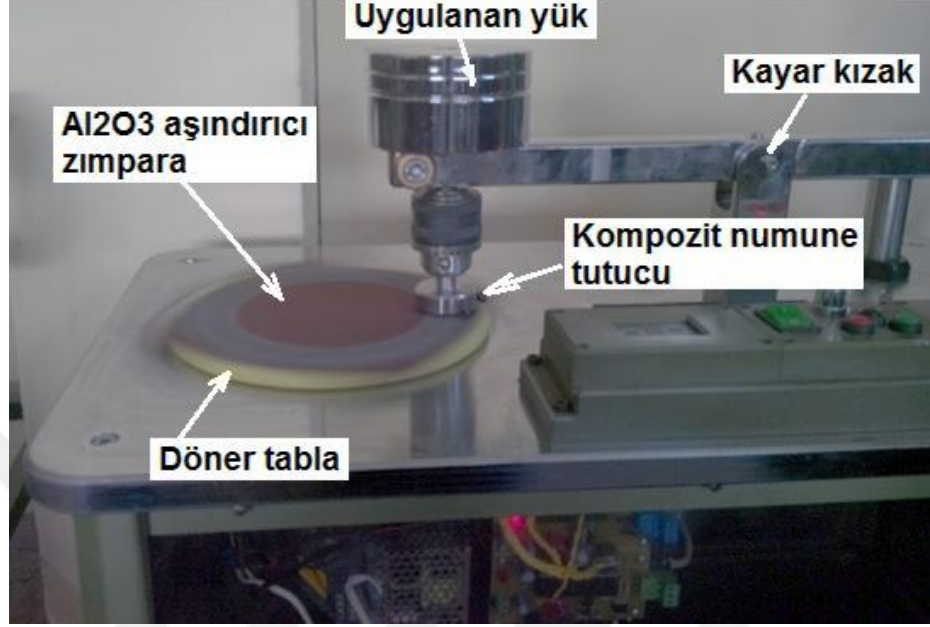


Şekil 5.5. Standart çapraz kırılma deney aparatı [63]

Çapraz kırılma deneylerinden sonra, kompozit numunelerin kırılma yüzeylerinden taramalı elektron mikroskopunda (SEM) $200\times$ ve $1000\times$ büyütmede görüntüler çekilmiştir. Kırılma dayanımı değerleri ile kırılan yüzeylere ait görüntüler birlikte değerlendirilmiştir.

Son aşama deneyler, kompozit numunelerin aşınma davranışlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri, pin on disk yöntemi ile 50 N yük uygulanarak yapılmıştır. Aşınma deneylerinde, $63\ \mu\text{m}$ aşındırıcı tane boyutuna sahip, Al_2O_3 zımpara kullanılmıştır. Her kompozit numune, 0,5 m/s kayma hızında ve 60 s süre boyunca

deneye tabi tutularak aşınma kayıpları kaydedilmiştir. Şekil 5.6'da aşınma deneyleri sırasında çekilmiş bir fotoğraf verilmektedir.



Şekil 5.6. Abrasif aşınma deney düzeneği

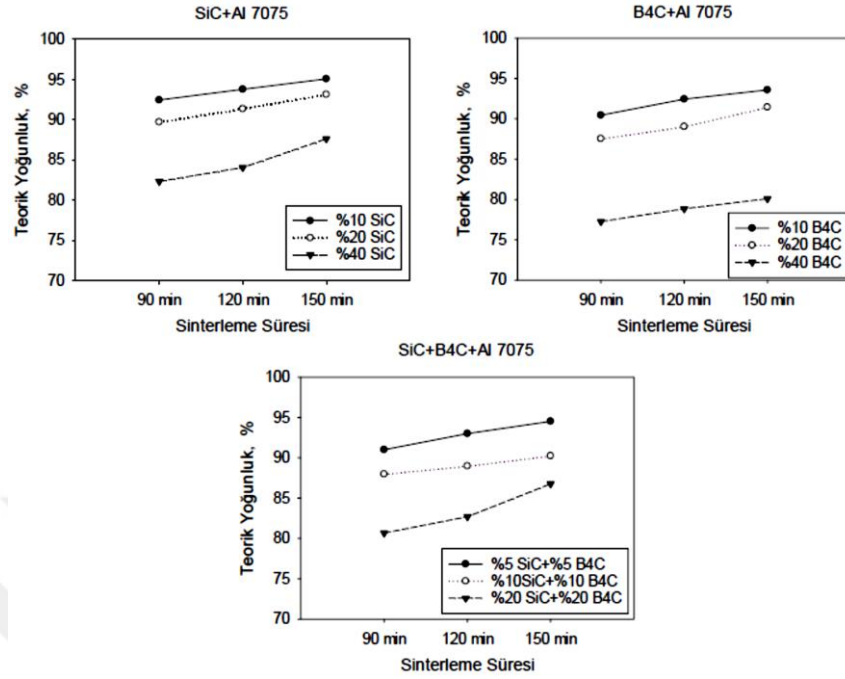
6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1 Yoğunlukların Değerlendirilmesi

Üretimi yapılan kompozit numunelerin Arşimet prensibi kullanılarak elde edilen teorik yoğunluk değerleri Çizelge 6.1 ve Şekil 6.1’de verilmektedir.

Çizelge 6.1. Numunelerin sinterleme süresine göre teorik yoğunluk değerleri

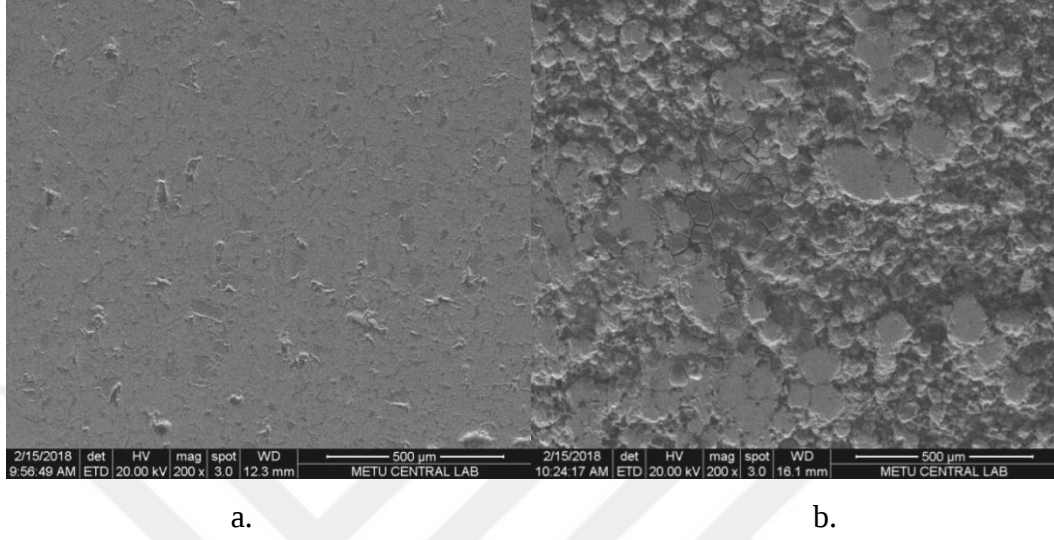
Takviye oranı	90 min	120 min	150 min
%10 SiC	92,457	93,785	95,086
%20 SiC	89,714	91,358	93,145
%40 SiC	82,318	84,056	87,631
%10 B ₄ C	90,456	92,451	93,587
%20 B ₄ C	87,542	89,045	91,456
%40 B ₄ C	77,264	78,856	80,085
%5 SiC+%5 B ₄ C	91,012	93,008	94,523
%10 SiC+%10 B ₄ C	87,985	88,986	90,246
%20 SiC+%20 B ₄ C	80,674	82,693	86,784



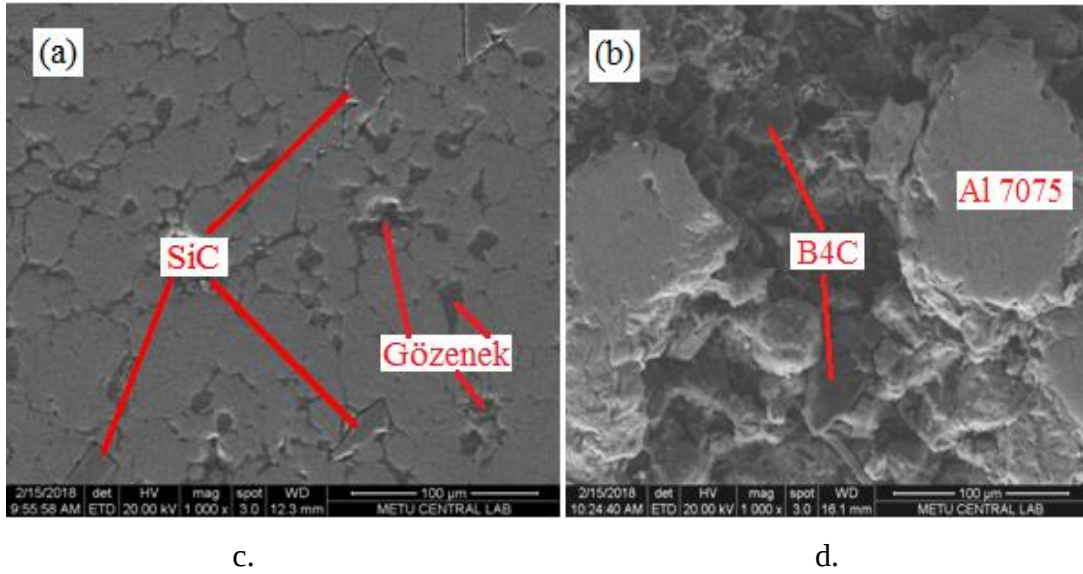
Şekil 6.1. Kompozit numunelerin yoğunluk değerleri

Şekil 6.1'deki grafiklere toplu olara bakıldığında, tüm kompozit numunelerde takviye miktarının artmasıyla yoğunluk değerlerinde düşme olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, takviye elemanının artmasıyla kompozit yapı içerisindeki boşlukların (porozite) artış gösterdiği söylenebilir. Öte yandan sinterleme süresindeki artış, kompozitlerin yoğunluğunu da artırmıştır. Literatüre bakıldığında Ayvaz ve Çetinel tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar ifade edilmiştir [14]. SiC takviyeli numunelerin yoğunluk değerleri B₄C takviyeli numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. En yüksek yoğunluk değeri %95,086 ile 150 dakika süre sinterlenmiş %10 SiC takviyeli numunede elde edilirken, en düşük yoğunluk %77,264 ile 90 dakika süre sinterlenmiş %40 B₄C takviyeli kompozit numunede elde edilmiştir. Bu yoğunluk sonuçlarına göre B₄C fazı ile Al 7075 fazı arasındaki bağın zayıf gerçekleştiği ve B₄C takviyeli numunelerde boşluk oranının SiC takviyeli numunelere göre daha yüksek olduğu ifade edilebilir. Kompozit yapıyı incelemek üzere en yüksek ve düşük yoğunluklu kompozit

numunelere ait 200× ve 1000× büyütmeli (SEM) mikroyapı görüntüleri Şekil 6.2.a, 6.2.b, 6.2.c ve 6.2.d’de verilmiştir.



Şekil 6.2.a.%10SiC - 150 min (200×) b. %40 B₄C - 90 min (200×)

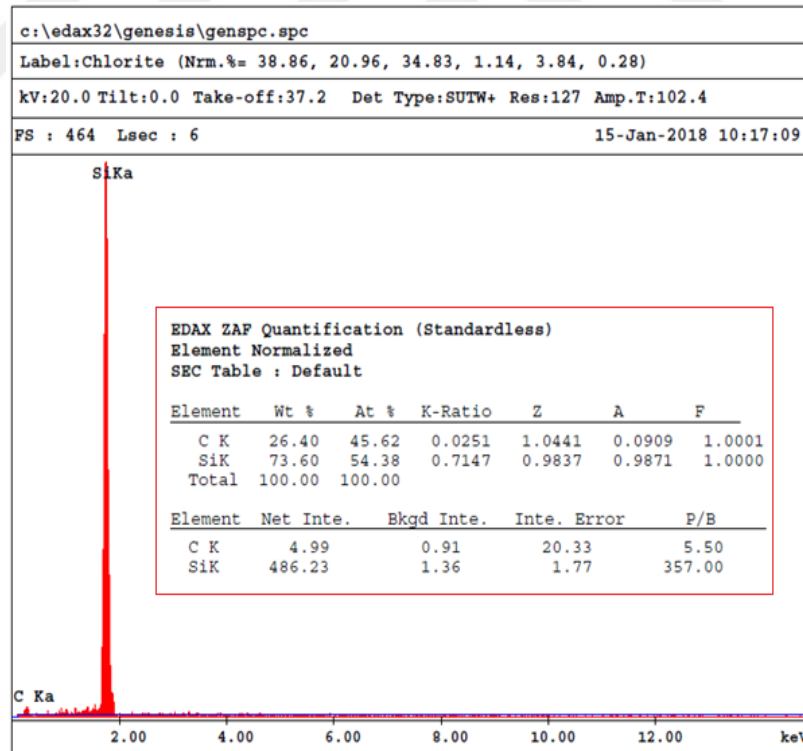


Şekil 6.1.c. %10 SiC- 150 min (1000×) d. %40 B₄C-90min(1000×)

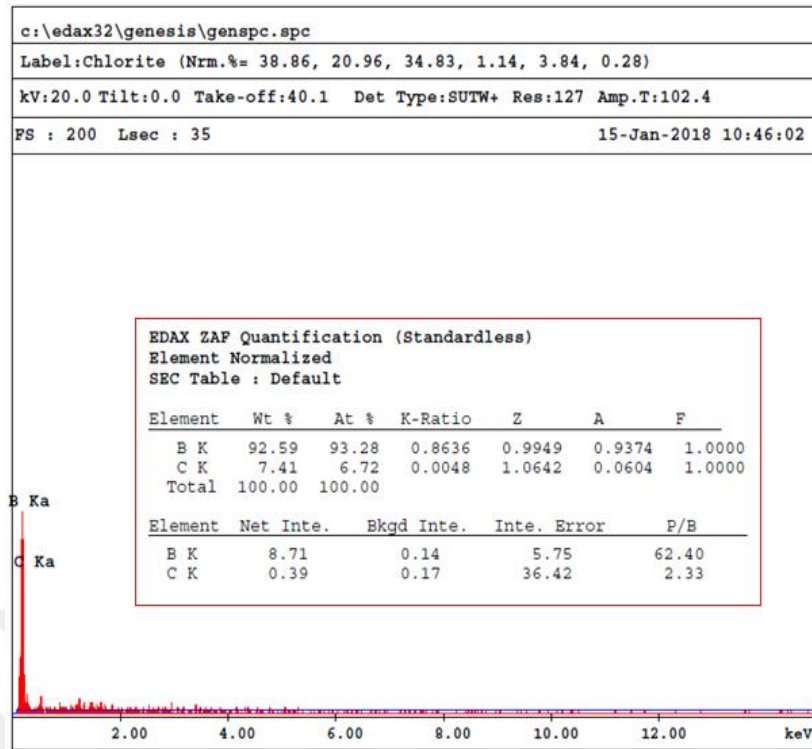
Şekil 6.2.a ve Şekil 6.2.d incelendiğinde %40 B₄C takviyeli kompozitin aşırı gözenekli yapısı görülmektedir. Bu yüksek gözenek miktarı yoğunluğun düşük çıkmasına neden

olmuştur. Takviye elemanı parçacıkları ile ana yapı elemanı Al 7075 tozları arasında yeterli bağın oluşmadığı ifade edilebilir. SEM görüntülerinin çekilmesinden önce yapılan yüzey hazırlama işlemi sırasındaki zımparalama sürecinde, B₄C parçacıklarının kompozit yapı içerisinde uzaklaştığı söylenebilir. Diğer taraftan, %10 SiC takviyeli kompozit numunedeki SEM görüntüsü, %40 B₄C takviyeli kompozite göre çok farklıdır. SiC parçacıkları ile Al 7075 tozları arasında boşluk miktarı oldukça az miktarda görünmektedir (Şekil 6.2.a ve Şekil 6.2.c). Sinterleme süresinin 150 dakika olması ve SiC takviye oranının düşük olması sebebiyle taneler arası bağ oluşumu, %40 B₄C takviyeli kompozite göre çok daha iyi meydana gelmiştir.

SEM görüntülerinin çekilmesi esnasında SiC ve B₄C takviyeli kompozit numunelerden, enerjidağılımı spektrometresi (EDS) analizleri yapılarak yapı içerisindeki takviye elemanlarının içeriği de ayrıca tespit edilmiştir. Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’de EDS analizi sonuçları gösterilmektedir.



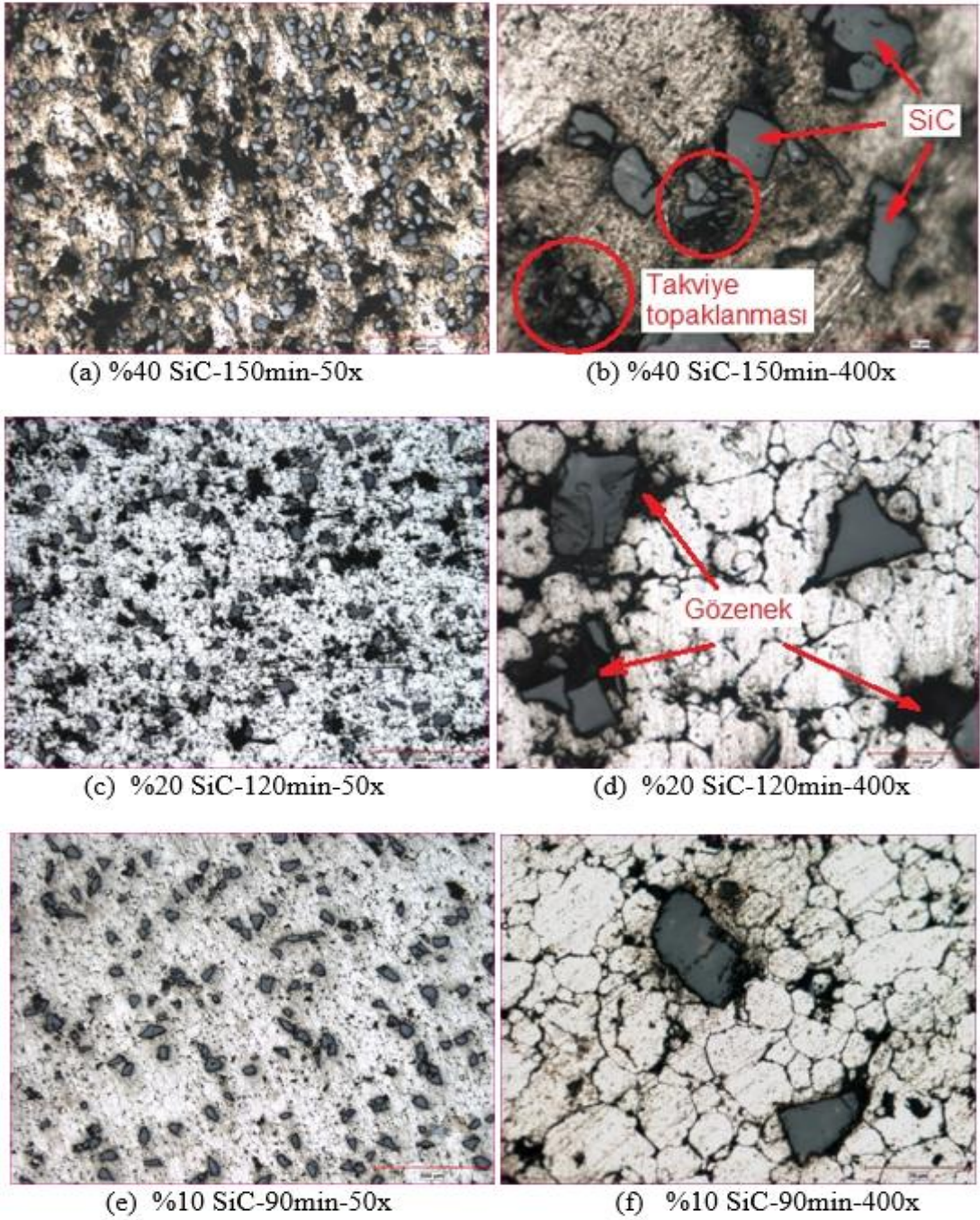
Şekil 6.3. Al-SiC EDS Analizi



Şekil 6.4. Al-B₄C EDS Analizi

6.2 Mikroyapıların Değerlendirilmesi

Kompozitlerin mikroyapılarını değerlendirmek amacıyla, SiC ve B₄C takviyeli kompozitlerin, farklı takviye oranları ve farklı sinterleme sürelerine ait 50x ve 400x büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.5, Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de verilmiştir.



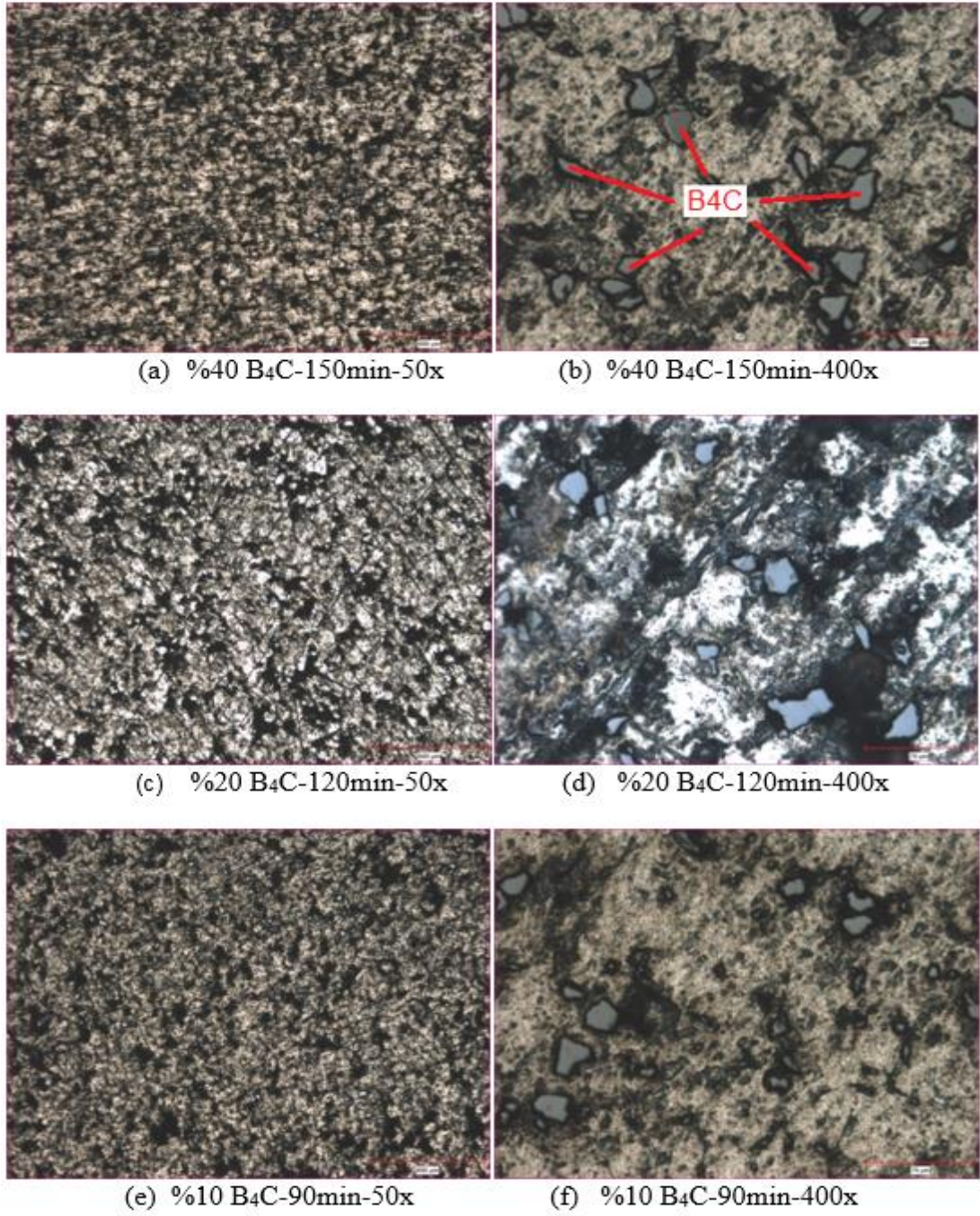
Şekil 6.5. SiC takviyeli kompozitlerin 50x ve 400x büyütmede mikroyapı görüntüleri

Şekil 6.5’deki görüntüler incelendiğinde, SiC takviye oranının artmasına bağlı olarak parçacık dağılımındaki homojenliğin artış gösterdiği söylenebilir. Ancak takviye oranının artması ile bir miktar takviye topaklanmasının meydana geldiği görülmektedir

Şekil 6.5(b).Yine aynı şekilde kompozit yapı içerisindeki boşluk miktarıda takviye oranının artışına bağlı olarak artma göstermiştir Şekil 6.5 (d). Literatürdeki bazı çalışmalarda benzer sonuçlar ortaya konulmuştur [11,13]. Kompozit yapı içerisindeki SiC parçacıklarının farklı boyutlarda ve genellikle keskin köşeli, Al 7075 parçacıklarının da farklı boyutlarda ve genellikle küresel bir şekle sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 6.5 (b), (d) ve (f)'deki 400x büyütülmüş görüntülere bakıldığında, 700 MPa presleme basıncının yeterli olduğu ancak sinterleme süreleri arasındaki farkın mikroyapı üzerine de yansıdığı ifade edilebilir. Sinterleme süresinin artmasıyla Al 7075 parçacıkları arasındaki bağ oluşumunun iyileştiği ve difüzyonun artış gösterdiği açıkça görülmektedir. Sinterleme süresi arttıkça tane sınırlarını gösteren çizgiler azalmakta ve 150 dakika sinterleme süresinde iyice azaldığı Şekil 6.5 (b), (d) ve (f) incelendiğinde görülmektedir. 550°C sinterleme sıcaklığının yeterli olduğu söylenebilir. Ancak sinterleme süresinin kısaltılması istenmesi halinde, sıcaklığının 550°C ila 600°C arasında farklı değerlerde uygulanması ve sonuçların gözlenmesi tavsiye edilebilir.

Sinterleme süresini artmasıyla Al 7075 tozları arasındaki bağlanma olumlu yönde gelişip, Al 7075 tozları arasındaki boşluk miktarı giderek azalmış olsa da, SiC parçacıkları ile Al 7075'in birbirine bağlanması olumsuz yönde etkilenmiştir. Aslında, Al 7075 malzemenin SiC takviye malzemesini tam olarak ıslattığı söylenemez. Bu duruma sinterleme süresinden ziyade sinterleme sıcaklığının daha çok etki ettiği ifade edilebilir. Dolayısıyla bundan sonra yapılacak çalışmalarda sinterleme sıcaklığının 20-30°C daha artırılması tavsiye edilebilir. Ayrıca, sinterleme sıcaklığının artması Al 7075 tozlarının birbiri ile bağını güçlendirirken ve taneler arasındaki boyun oluşumu artarken, SiC parçacıklarıyla Al7075 parçacıkları arasındaki tutunmanın azaldığı ve matris ile takviye ara yüzeydeki boşluğun artış gösterdiği söylenebilir. Bu tür kompozitlerin üretilmesinde %40 takviye oranının yüksek kaldığı ve kompozit yapıyı olumsuz etkilediği ifade edilebilir.



Şekil 6.6. B₄C takviyeli kompozitlerin 50x ve 400x büyütmede mikroyapı görüntüleri

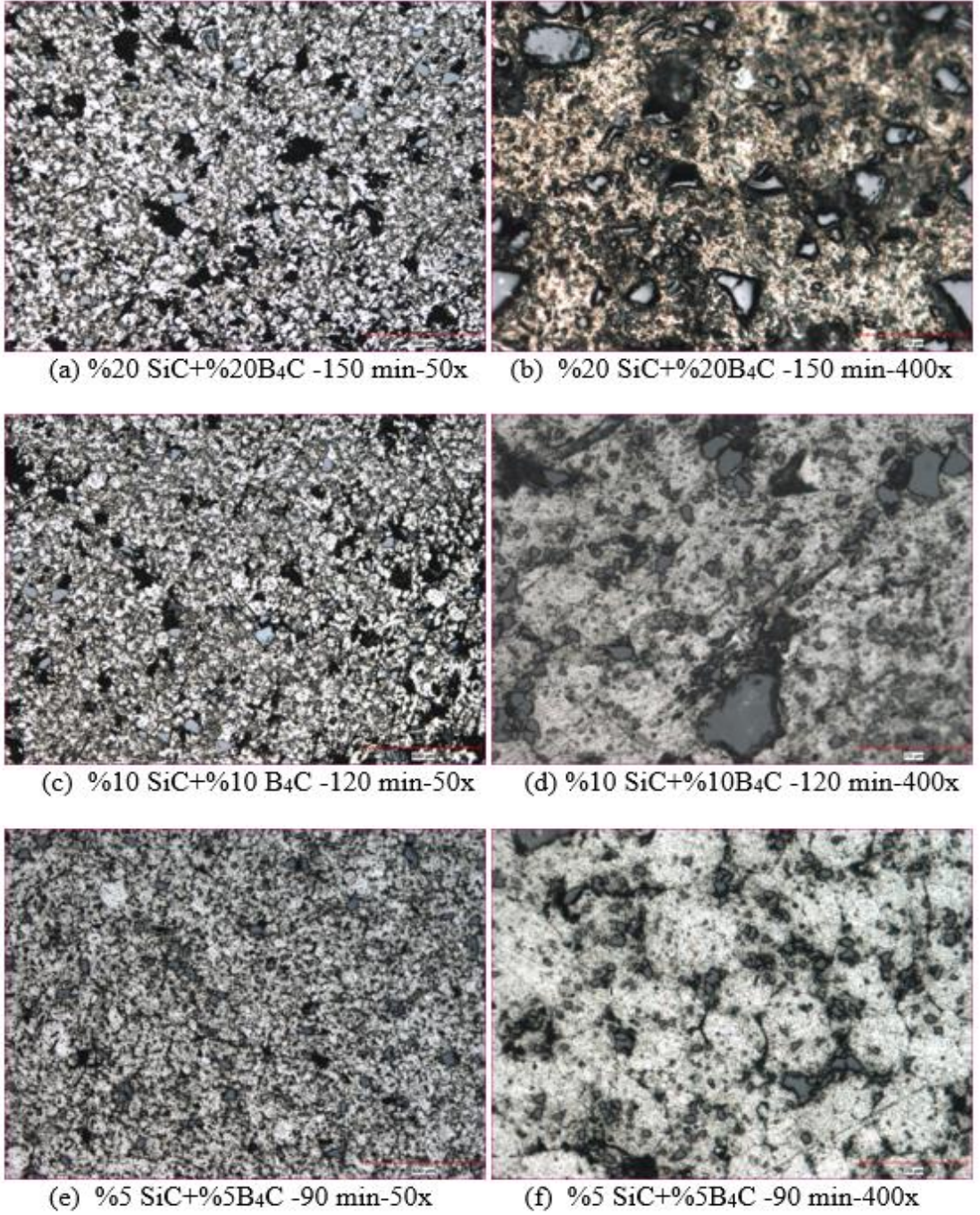
Şekil 6.6'daki görüntüler incelendiğinde, B₄C takviye oranının artmasına bağlı olarak parçacık dağılımındaki homojenliğin bir miktar artış gösterdiği ancak SiC takviyeli kompozitlerdeki kadar iyi olmadığı söylenebilir. B₄C taneciklerinin düzensiz şekilli

olduğu ve tanecikler arasında çok fazla boyut farkı olduğu görünmektedir. SiC takviyeli kompozitlere göre daha fazla boşluklu yapı meydana gelmiştir.

Al 7075 ile B₄C arasında istenilen fazın ve ıslatmanın yeterince oluşmadığı ifade edilebilir. Bunun sonucu olarak, mikroskop görüntüleri alınmadan önce yapılan yüzey hazırlama işleminde, bir miktar B₄C parçacığının yapı içerisinde koparak uzaklaştığı ve yapı içerisindeki boşlukların oluşmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Sinterleme süresindeki artışın, boşluklu yapının oluşmasını arttırdığı söylenebilir ancak, bu durumun SiC takviyeli kompozitlerdeki kadar etkili olmadığı görünmektedir.

Ayrıca kompozit yapı içerisindeki B₄C parçacıklarının topaklanma eğilimi gösterdiği, bunda boşluk oluşumunun artışına etki yaptığı ifade edilebilir. Benzer sonuçlar Lillo'nun çalışmasında belirtilmiştir [12].

Kompozit numunelerin mikroyapı incelemelerinin son aşamasında, SiC+B₄C takviyeli kompozitlerin 50x ve 400x büyütmede mikroyapı görüntüleri Şekil 6.7' de verilmiştir.



Şekil 6.7.SiC+B₄C takviyeli kompozitlerin 50x ve 400x büyütmede mikroyapı görüntüleri

Şekil 6.7’deki görüntülere bakıldığında, Şekil 6.5’deki SiC takviyeli ve Şekil 6.6’daki B₄C takviye kompozit numunelerin mikroyapı değerlendirmesinde yapılan yorumlara benzer ifadeler kullanmak mümkündür.

Özellikle takviye oranındaki artışa bağlı olarak gözenek miktarının artması göze çarpmaktadır. 90 dakika süredeki sinterlemenin yetersiz kaldığı ve süre arttıkça Al 7075 taneleri arasındaki bağın olumlu yönde etkilendiği açıkça görünmektedir.

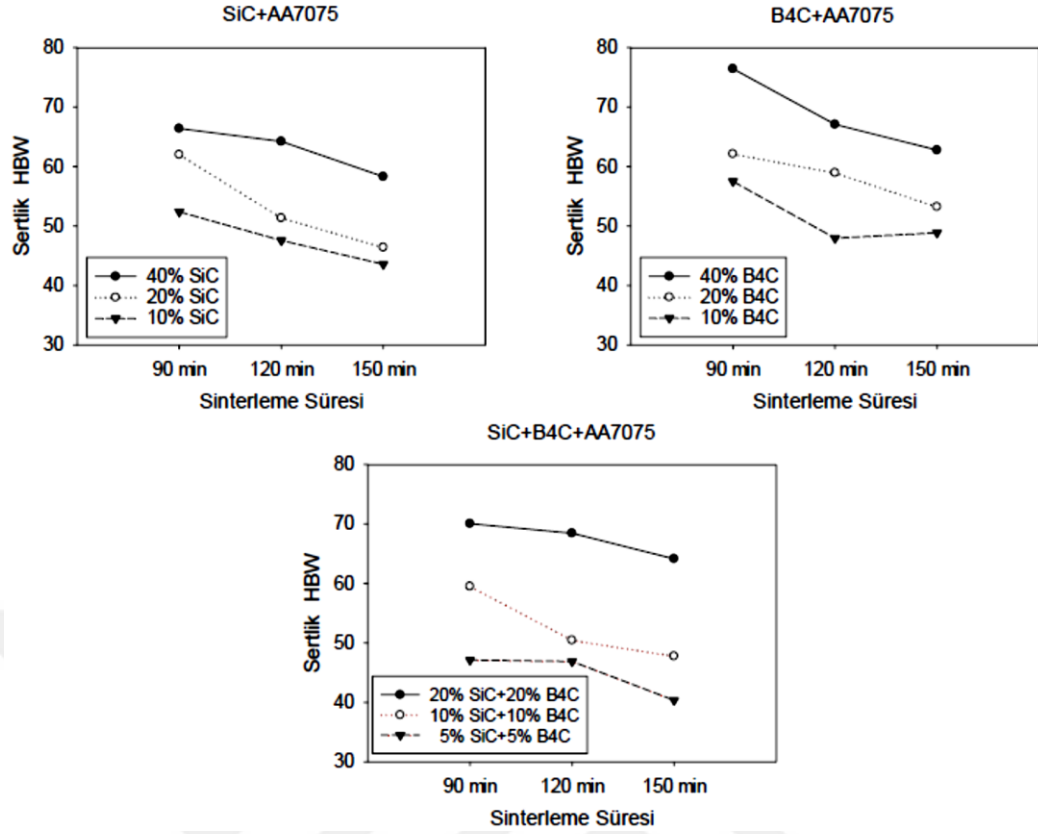
Ancak, sinterleme sıcaklığının artması Al 7075 tozlarının birbiri ile bağını güçlendirirken ve taneler arasındaki boyun oluşumu artarken, SiC ve B₄C parçacıklarıyla Al7075 taneleri arasındaki tutunmanın azaldığı ve matris ile takviye ara yüzeydeki boşlukların artış gösterdiği gözlenmektedir.

Bu duruma matris ve takviye elemanı tanecikleri arasında yeterli ıslatmanın olmamasının katkı sağladığı ve kompozit yapıyı olumsuz etkilediği ifade edilebilir. Daha önceki yorumlarda da söylendiğigibi sinterleme sıcaklığı ve süresinin bir miktar arttırılması, kompozit yapıyı olumlu etkileyecektir.

Sonuç olarak, bu tür parçacık takviyeli kompozitlerin üretilmesinde %40 takviye oranının yüksek kaldığı ve kompozit malzemenin istenilen mekanik özellikleri sağlayamayacağı ifade edilebilir.

6.3 Sertlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi

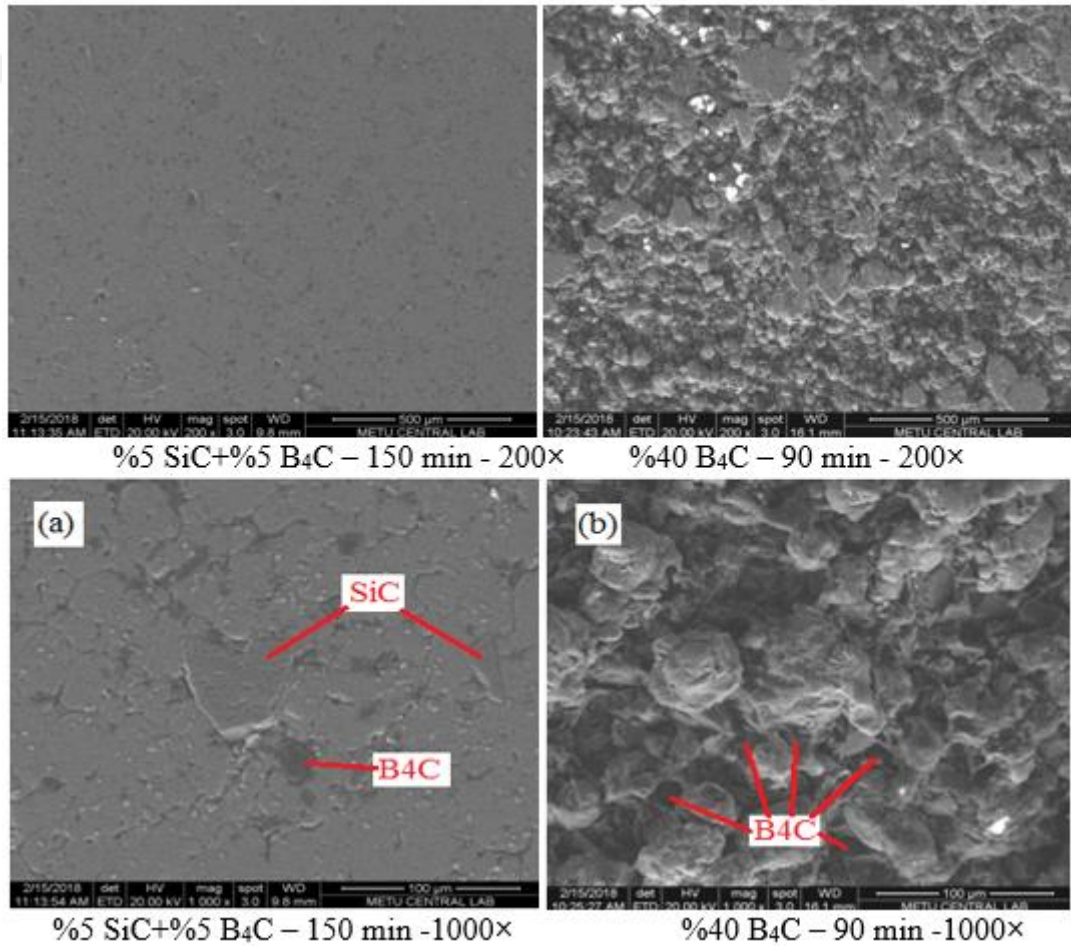
Kompozit numunelerin, sinterleme süresi ve takviye oranlarına göre ölçümünden elde edilen sertlik değerleri Şekil 6.8'deki grafiklerde gösterilmektedir.



Şekil 6.8. Kompozit numunelere ait sertlik değerleri

Şekil 6.8’deki grafiklere birlikte bakıldığında ilk göze çarpan, sinterleme süresinin artmasıyla sertlik değerlerindeki azalmadır. Bu durumu sinterleme süresinin artmasıyla kompozit yapı içerisindeki boşluk miktarının bir miktar azalması olarak açıklayabiliriz. Mikroyapı değerlendirmesi bölümünde, Şekil 6.5, 6.6 ve 6.7’deki görüntülerin yorumunda bu durum açıklanmıştır. Ayrıca, artan sinterleme süresitanecikler arasındaki bağlanmayı artırarak Al 7075 fazının yoğunluğunu arttırdığından, takviye malzemelerine göre çok düşük sertlik değerine sahip olan Al 7075 matris malzemesini ön plana çıkarmıştır. En yüksek sertlik değerleri, en yüksek takviye oranına sahip 90 dakika süre sinterlenmiş %40 takviyeli kompozit numunelerden elde edilmiştir. Bu durum literatürdeki benzer çalışmalarla aynı yöndedir. Benzer sonuçlar Özkan’ın yaptığı çalışmada [11] ve başka bazı çalışmalarda da ortaya koyulmuştur [13]. Tüm kompozit numuneler içerisinde en yüksek sertlik değeri %40 B₄C takviyeli numunede 76,44 HBW olarak ölçülmüştür. En düşük sertlik değeri ise 150 dakika süre sinterlenmiş %5 SiC+%5 B₄C takviyeli kompozit numunede, 40,36 HBW olarak

kaydedilmiştir. B_4C parçacıklarının çok sert fazda olması sebebiyle, üretilen kompozitler içerisinde B_4C takviyeli olanlarda, SiC takviyeli kompozitlere göre daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Bu durum 7,8 ve 9 numaralı SiC+ B_4C karışık takviyeli numunelerde de benzer sonuçları çıkarmıştır. Bu tür kompozit yapılarda, takviye elemanı miktarının artmasının gözenek ve boşluk oranını arttırdığı olumsuz bir durum olsa da bununla birlikte sertlik değerlerinin de artış gösterdiği ifade edilebilir. En yüksek ve düşük sertlik değerine sahip kompozit numunelere ait $200\times$ ve $1000\times$ büyütme (SEM) mikroyapı görüntüleri Şekil 6.9’da verilmiştir.



Şekil 6.9. SiC takviyeli kompozitlerin $200\times$ ve $1000\times$ büyütmede mikroyapı görüntüleri

Şekil 6.9'daki SEM görüntülerine bakıldığında %40 B₄C (b) takviyeli kompozit yapı içerisinde yoğun olarak bulunan takviye elemanı parçacıkları gözlenmektedir.

B₄C takviye elemanının, %40 gibi yüksek oranda bulunması ve çok sert yapıya sahip olması sebebiyle en yüksek sertlik değeri bu kompozit numunede elde edilmiştir. Diğer taraftan, en düşük takviye oranına sahip numune olan %5 SiC+%5 B₄C (a) takviyeli kompozit ise en az sertlik değerini göstermiştir.

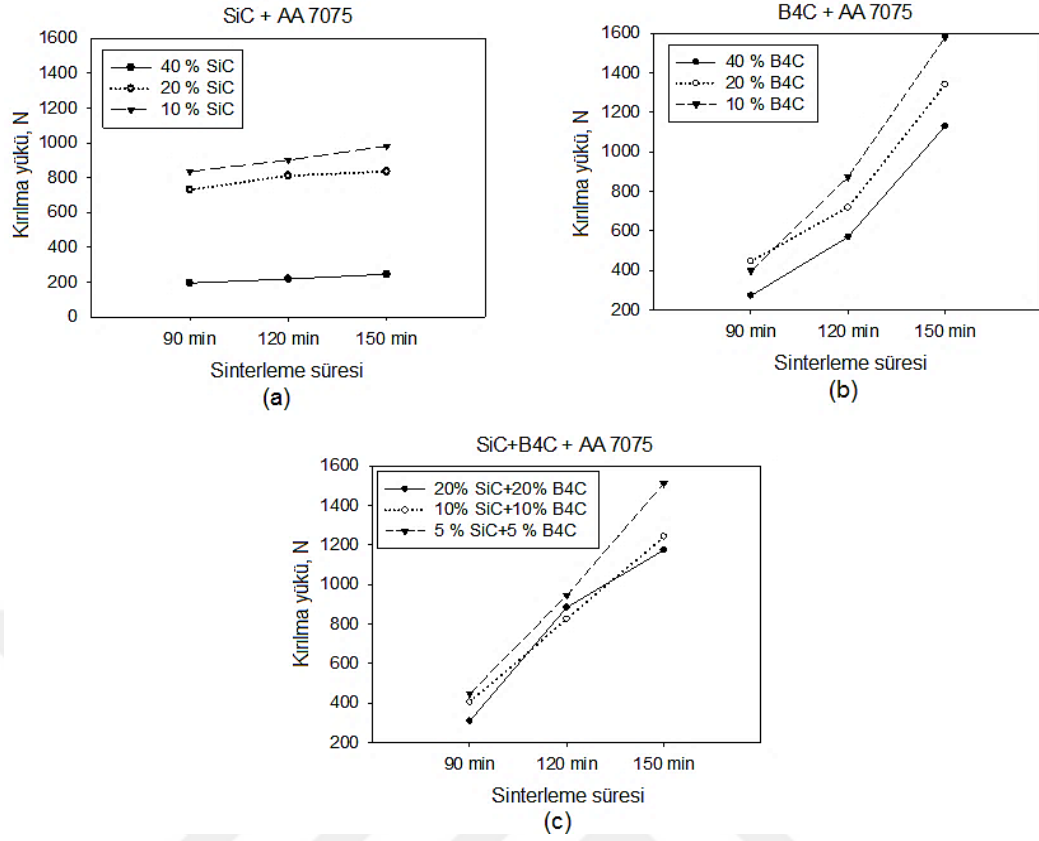
Bu tür parçacık takviyeli kompozitlerde en büyük sorun takviye parçacıklarının istenilen homojenlikte dağılmamasıdır. Özellikle takviyenin belli noktalarda yığılması ve topaklanma sorunlarıyla sıklıkla karşılaşmaktadır.

Böyle durumlarda sağlıklı ölçüm sonuçları alınamamakta ve beklenmeyen ölçüm değerleri elde edilebilmektedir. Ancak bu çalışmada elde edilen sertlik ölçümü değerleri beklenen ve literatürde yer alan sonuçlar ile örtüşmüştür.

Bu sonuçlara göre üretilen kompozitlerdeki takviye elemanı dağılımlarının yeterli homojenlikte olduğu söylenebilir.

6.4 Çapraz Kırılma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kompozit numunelerin, ASTM-B 528-05 standardına göre yapılan çapraz kırılma deneylerinden elde edilen değerlere göre çizilen grafikte Şekil 6.10' da verilmiştir.



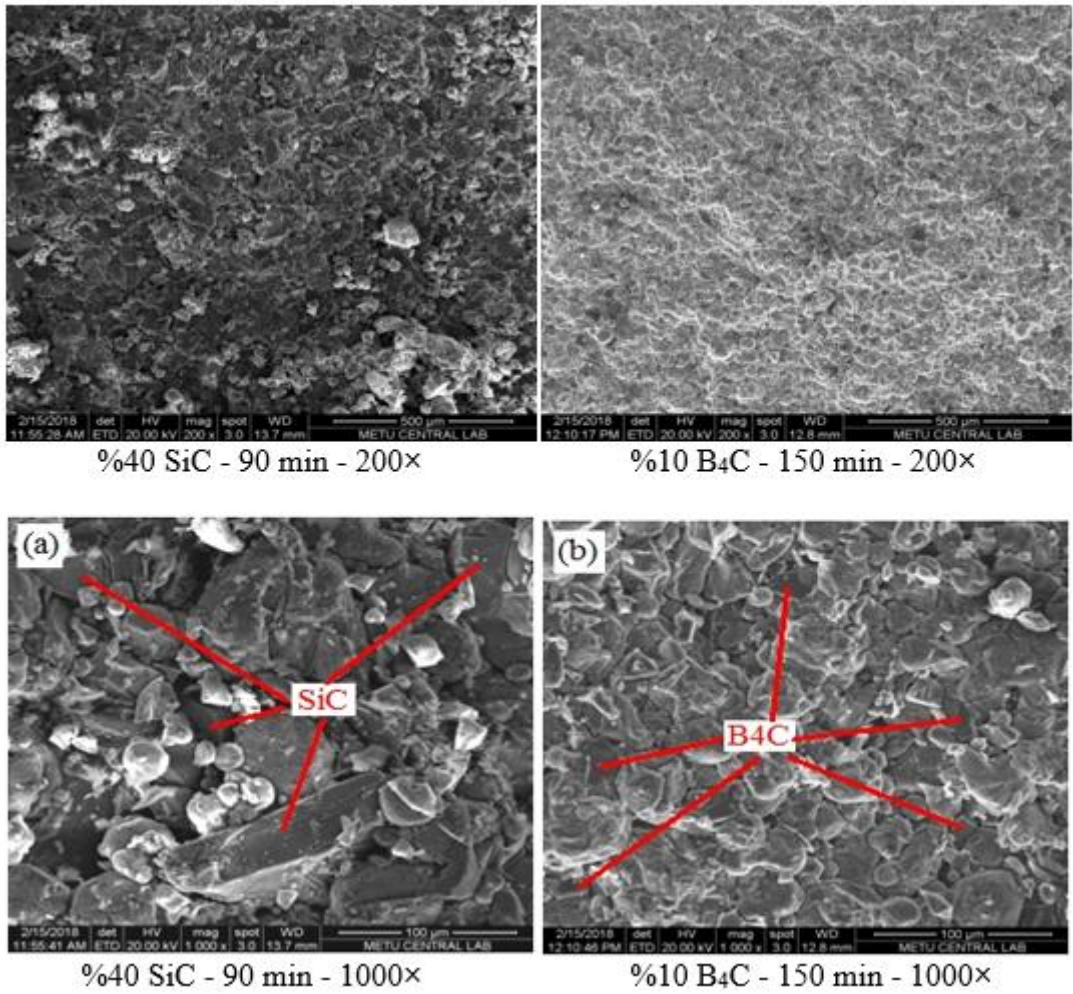
Şekil 6.10. Kompozit numunelere ait çapraz kırılma yükü değerleri

Şekil 6.10’ daki grafiklere toplu olarak bakıldığında ilk göze çarpan, sinterleme süresindeki artışın kırılma dayanımını attırmasıdır. Özellikle B₄C takviyeli kompozit numunelerde [Şekil 6.10(b)] bu durum daha belirgin haldedir. SiC takviyeli numunelerde [Şekil 6.10(a)] sinterleme süresindeki artışın kırılma dayanımını çok etkilemediği görülmektedir. SiC+B₄C karışım takviyeli kompozitlerde [Şekil 6.10(c)] kırılma dayanımı sade B₄C takviyeli numunelerdekine çok yakın değerlerde gerçekleşmiştir. Bu durumda, dayanımın artmasında yapı içerisindeki B₄C takviye elemanının SiC’ye göre daha etkili olduğu değerlendirilmektedir. Sinterleme süresinin artmasıyla kompozit yapının yoğunluğunun bir miktar artış gösterdiği ve Al 7075 tozlarının arasındaki bağın güçlendiği, Şekil 6.5, 6.6 ve 6.7’ deki mikroyapı görüntülerinin değerlendirildiği bölümde daha önce ifade edilmişti. Dolayısıyla, kırılma değerleri sonuçlarıyla, mikroyapılardaki görüntülerden çıkarılan sonuçların birbirini destekler nitelikte olduğu söylenebilir. Kompozit yapı içerisindeki takviye elemanı (SiC, B₄C) oranlarının artmasıyla, kırılma dayanımı değerlerinin düşmesi genel bir eğilim

olarak ortaya çıkmaktadır. En düşük kırılma değeri 120 dakika süre sinterlenmiş, %40 SiC takviyeli kompozit numunede 195 N olarak gerçekleşmiştir. En yüksek değer ise 150 dakika süre sinterlenmiş, %10 B₄C takviyeli kompozitte 1578 N olarak elde edilmiştir.

Artan takviye oranlarında, SiC ve B₄C parçacıklarının etrafındaki gözeneklerinde artması kırılma dayanımını kötü yönde etkilemektedir. Aynı şekilde artan gözeneklerin kırılma dayanımını düşürdüğü ve mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediği ifade edilebilir. Ayrıca köşeli ve keskin yapıdaki takviye elemanı taneciklerinin kompozit yapı içerisinde çentik tesiri yaparak kırılmayı kolaylaştırdığı söylenebilir.

Pul'un yapmış olduğu çalışmalarda, benzer sonuçlar ifade edilmektedir [58]. Kompozit yapıyı incelemek üzere en yüksek ve düşük kırılma değerine sahip kompozit numunelere ait 200× ve 1000× büyütmeli kırılma yüzeyi görüntüleri Şekil 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.11. En yüksek ve en düşük kırılma değerlerine sahip kompozit numunelere ait 200× ve 1000× büyütmede mikroyapı görüntüleri

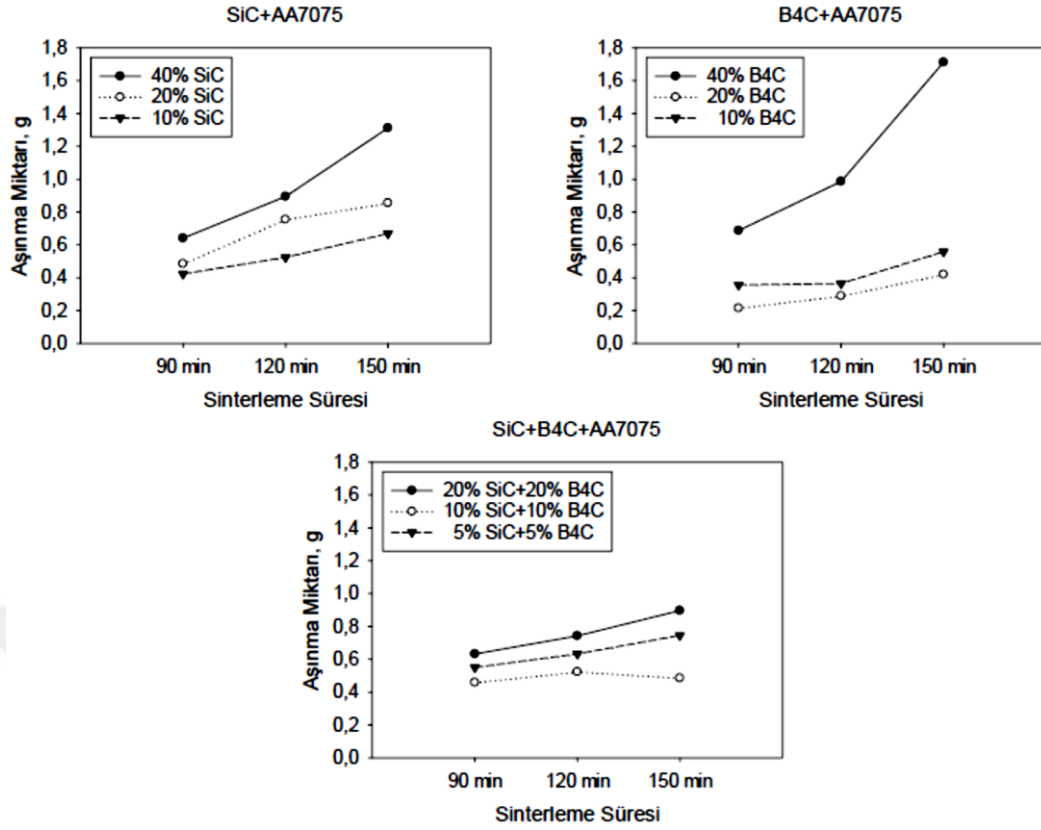
Şekil 6.11'daki kırık yüzey görüntüleri incelendiğinde, kırılmanın genelde gevrek kırılma şeklinde geliştiği gözlenmektedir. Kırılmanın çoğunlukla Al 7075 matris ile SiC ve B₄C takviye elemanı ara yüzeyinde meydana geldiği bununla ıslatma probleminin yanı sıra matris ile takviye ara yüzeyinde yoğunlaşan boşluklardan ve takviye elemanlarının, kompozit yapı içerisinde oluşturduğu çentik etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Özellikle %40 olan en yüksek takviye oranı, kompozit yapı içerisindeki gevrekliği oldukça fazla yükseltmiştir. SiC parçacıklarının keskin kenarlı geometrik şeklinin, yapı içerisinde yarattığı çentik tesiri B₄C parçacıklarına göre daha etkili olmuştur. Şekil

6.11'daki görüntülere bakıldığında %10 B₄C takviyeli kompozit yapının, %40 SiC takviyeli kompozit yapıya göre daha tok ve yoğun olduğu açıkça gözlenmektedir. Elde edilen bu kırılma sonuçlarına sinterleme süresinin de etkisi olmuştur. Sinterleme süresindeki artışın kompozit yapı içerisindeki Al 7075 matris elemanının takviye elemanlarıyla yaptığı bağı nispeten güçlendirdiği daha önce ifade edilmiştir. Şekil 6.11' daki SEM görüntüleri bu tezi desteklemektedir. Yapılan bu yorumların yanında, kırılma deney sonuçlarına etki eden en önemli parametrenin, kompozit yapı içerisindeki takviye elemanlarının miktarı olduğu değerlendirilmektedir.

6.5 Aşınma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kompozit numunelerin, pin on disk yöntemi ile yapılan aşınma deneylerinden takviye cinsi, sinterleme süresi ve takviye oranlarına göre elde edilen aşınma değerleri Şekil 6.12' deki grafiklerde gösterilmektedir.



Şekil 6.12. Kompozit numunelere ait aşınma miktarları

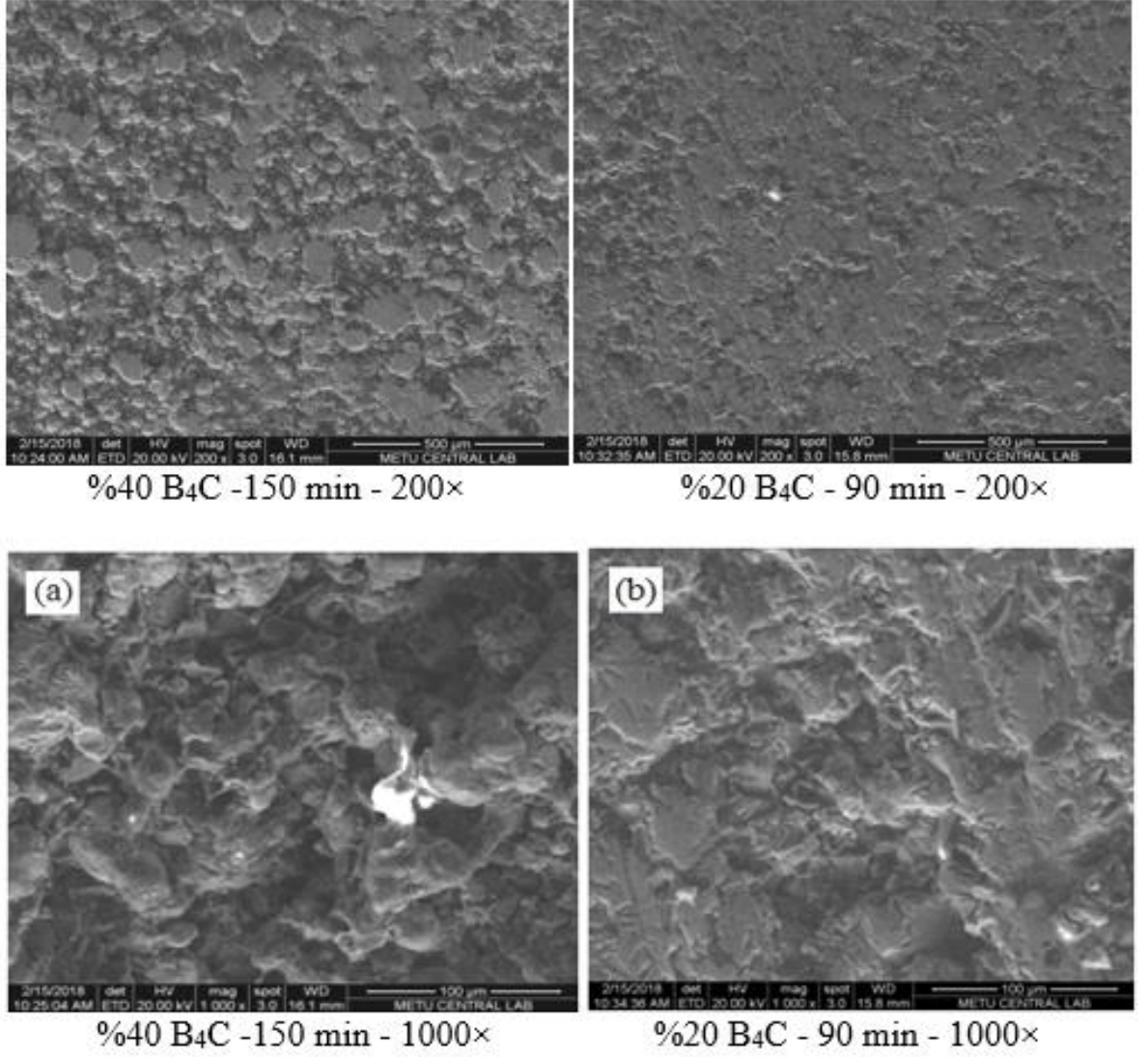
Şekil 6.12’ deki grafiklere toplu halde bakıldığında, sinterleme süresinin artmasıyla aşınma miktarlarındaki artış göze çarpmaktadır. Bu durum tüm takviye oranları için geçerlidir. Ancak özellikle %40 B₄C takviyeli kompozit numune için en yüksek aşınma miktarı kaydedilmiştir.

SiC takviyeli kompozit numunelerde takviye oranının artmasıyla aşınma miktarı da artış göstermiştir. Bu durum sertlik ile ters orantı oluşturmaktadır. Şekil 6.12’ ye bakıldığında, kompozit yapı içerisinde sert takviye fazının artmasıyla sertlik değerleri de artış göstermektedir. Ancak sertliğin artması aşınma direncini azaltmıştır. Bu duruma benzer bir sonuç Hasırcı ve Gül’ün yaptığı çalışmada ifade edilmiştir [8].

B₄C takviyeli kompozit numunelerde durum daha farklı görünmektedir. En yüksek aşınma miktarı %40 takviyeli kompozitte tespit edilirken arkasından %10 takviyeli

kompozit gelmiştir. En düşük aşınma miktarı ise %20 B₄C takviyeli kompozitte elde edilmiştir. Bu durum iki şekilde izahedilebilir.

Birincisi, takviye takviye oranının %10'dan %20'e çıkmasıyla kompozit yapının sertliği artmış ve buna bağlı olarak aşınma direnci yükselmiştir. Bu durum literatürdeki bazı çalışmalarda yer almaktadır [64]. İkincisi, takviye oranını %40 çıkması sertlik değeri en yüksek noktaya çıkmış olmasına rağmen, %20 takviyeli kompozite göre daha fazla aşınma meydana gelmiştir. Bu, literatürde çok rastlanan bir sonuç değildir. Ancak %40 B₄C takviyeli kompozitin mikroyapı incelemelerinde belirtildiği gibi gözeneklilik ve boşluk oranındaki artış ve matris malzemesi Al 7075'in B₄C taneciklerini ıslatamaması sebebiyle takviye ve matris fazı arasındaki bağ çok zayıf gerçekleşmiştir. Ayrıca %40 B₄C oranının yapı içerisinde yeterince tutunamadığı ve oldukça fazla olduğu söylenebilir. Dolayısıyla aşınma deneyleri sırasında B₄C parçacıkları kompozit yapı içerisinde kolayca koparak uzaklaşmıştır. Böylece takviye elemanına göre çok yumuşak fazda olan Al 7075 matris malzemesinde aşınma kayıpları fazla meydana gelmiştir. Şekil 6.13'den fazla ve en az aşınan kompozit numunelerin, aşınma deneyinden önce çekilen mikroyapılarına ait 200× ve 1000× büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir.

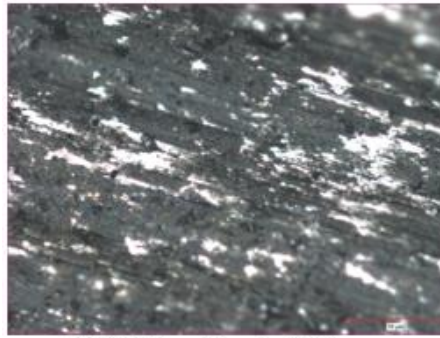


Şekil 6.13. En fazla ve en az aşınan numunelerin 200x ve 1000x büyütmede mikroyapıgörüntüleri

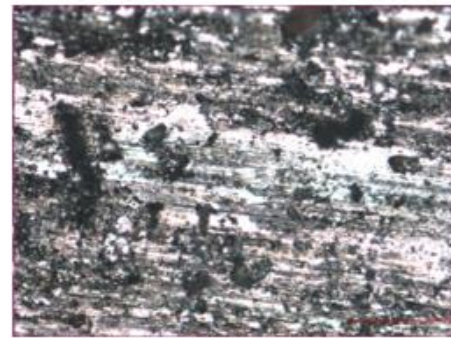
Şekil 6.13’ deki SEM görüntüleri incelendiğinde, %40 B₄C (a) takviyeli numunenin, %20 B₄C (b) takviyeli numuneye göre daha gözenekli bir yapıda olduğu gözlenmektedir. Bu aşırı gözenekli yapı, aşınma kayıplarının fazla olmasına yardımcı olmuştur. Aşınma deneyleri sırasında, aşındırıcı zımpara üzerindeki aşındırıcı Al₂O₃ taneciklerinin kompozit numunenin yüzeyindeki gözeneklere girip, yüzeye tutunması kolaylaşmış ve yüzeyinden kopardığı malzeme miktarı artmıştır.

SiC+B₄C takviyeli kompozit numunelerde ise B₄C takviyeli kompozitlerdekine benzer bir durum ortaya çıkmıştır. Karışık takviyeli bu kompozit numunelerde B₄C fazının SiC fazına göre daha fazla etkili olduğu söylenebilir. Aşınma değerleri arasında çok büyük farklar meydana gelmemiştir. Özellikle %20SiC+%20B₄C takviyeli kompozit numunede, %40 SiC ve %40 B₄C takviyeli numunelere göre daha az aşınma kaybı oluşmuş ve kompozit yapı daha istikrarlı aşınma davranışı göstermiştir. Bu değerlendirmelerden sonra, yapılan çalışma içerisinde en yüksek aşınma direnci ve en düşük aşınma miktarı gösteren %20 B₄C katkılı kompozit numune, aşınma ve setlik birlikte göz önüne alındığında en optimum sonuç olarak görünmektedir.

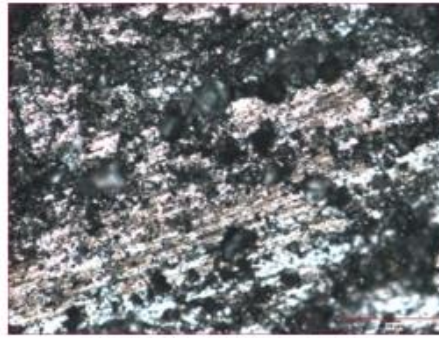
Grafikler ve elde edilen sayısal değerler üzerine yapılan bu yorumlara ilaveten kompozit numunelerin aşınma yüzeylerinden 400x büyütme ile çekilen optik mikroskop görüntülerinin bazıları Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da verilmektedir. Özellikle en yüksek takviye oranlarındaki (%40 B₄C, %40SiC ve %20SiC+%20B₄C) aşınmış yüzey görüntüleri dikkate alınmıştır.



%40 SiC – 90 min-400x



%40 SiC - 120 min-400x



%40 SiC - 150 min-400x

Şekil 6.14. SiC takviyeli kompozitlerin aşınma görüntüleri

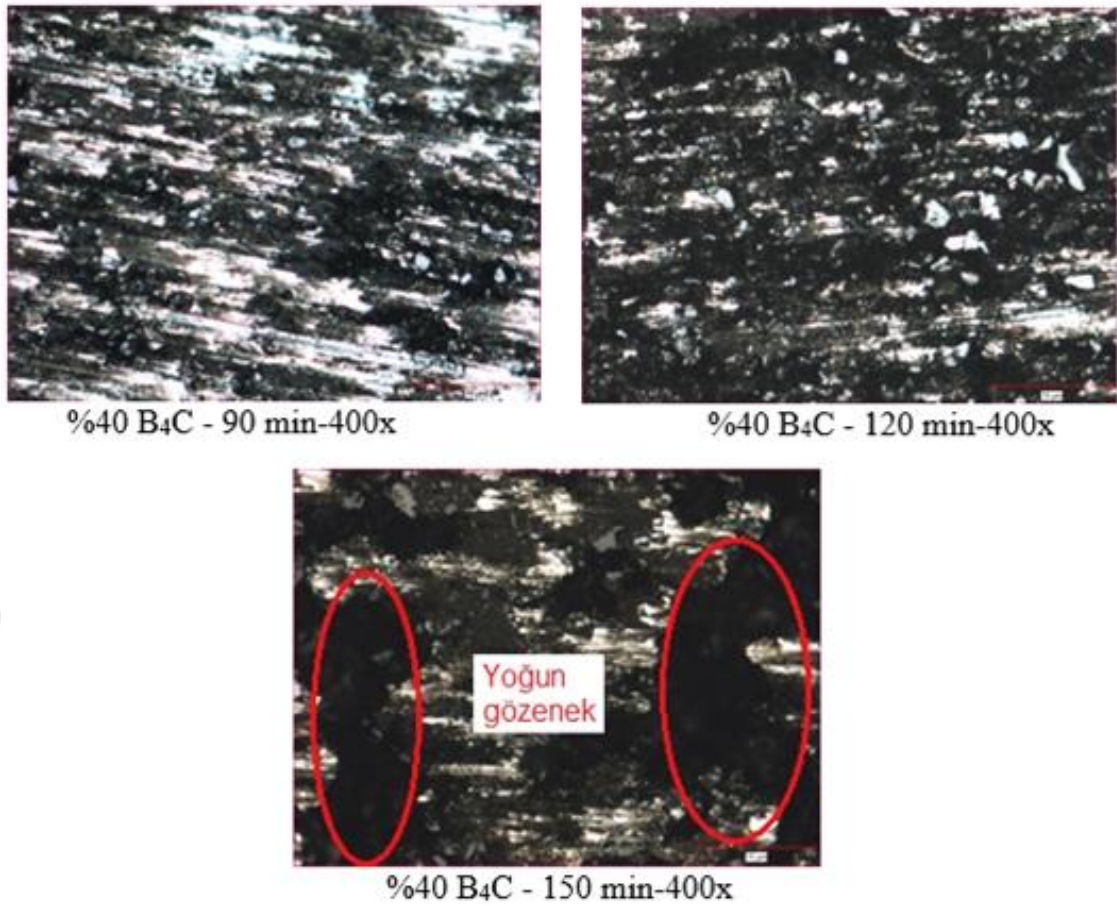
Sinterleme süresinin artmasıyla, Al 7075 taneciklerinin birbiri arasında bağ oluşturmaları artmıştır. Taneler arası bağ oluşumundaki artış ile Al 7075 malzemenin kompozit yapı içerisindeki yoğunluğu da artış göstermiştir. Gökmeşe ve Bostan yapmış oldukları çalışmada, Al 2014 alaşımını 1, 2 ve 4 saat sürelerde sinterlemiş ve en yüksek yoğunluk değeri 4 saatlik sinterleme süresinde elde edilmiştir [7].

Şekil 6.14'deki görüntüler incelendiğinde, sinterleme süresinin artması ile kompozit yapı içerisindeki boşluk miktarında artış görülmektedir. Sinterleme süresinin artması Al 7075 toz taneciklerinin birbiri ile yaptığı bağı güçlendirirken, Al 7075 yapının seramik özellik taşıyan SiC tanecikleriyle olan bağı zayıflattığı düşünülmektedir.

Sinterleme süresinin artmasıyla, Al 7075 tanecikleri birbirine yaklaşarak yoğunluğunu arttırırken, SiC parçacıklarıyla Al 7075 yapının ara yüzeylerinde zayıflama hatta boşluklar meydana getirmiştir. Bu zayıflama ve boşluklar sonucunda aşınma deneyleri sırasında çok miktarda SiC parçacığı kompozit yapı içerisinde koparak uzaklaşmıştır.

Sert fazdaki SiC parçacıklarının koparak uzaklaşması sırasında kompozit yapı üzerinde derin çizikler meydana gelmiştir. Hem kopan SiC parçacıklarının miktarı hemde Al 7075 yapı üzerinde oluşturduğu çiziklerden meydana gelen malzeme kaybı sonucunda aşınma miktarı artmıştır.

Dolayısıyla en yüksek aşınma kaybı 150 dakikada sinterlenmiş SiC+Al 7075 kompozit numunede olmuştur. Şekil 6.14'deki optik mikroskop görüntüleri ve aşınma deney sonuçlarının birbirini desteklediği söylenebilir.



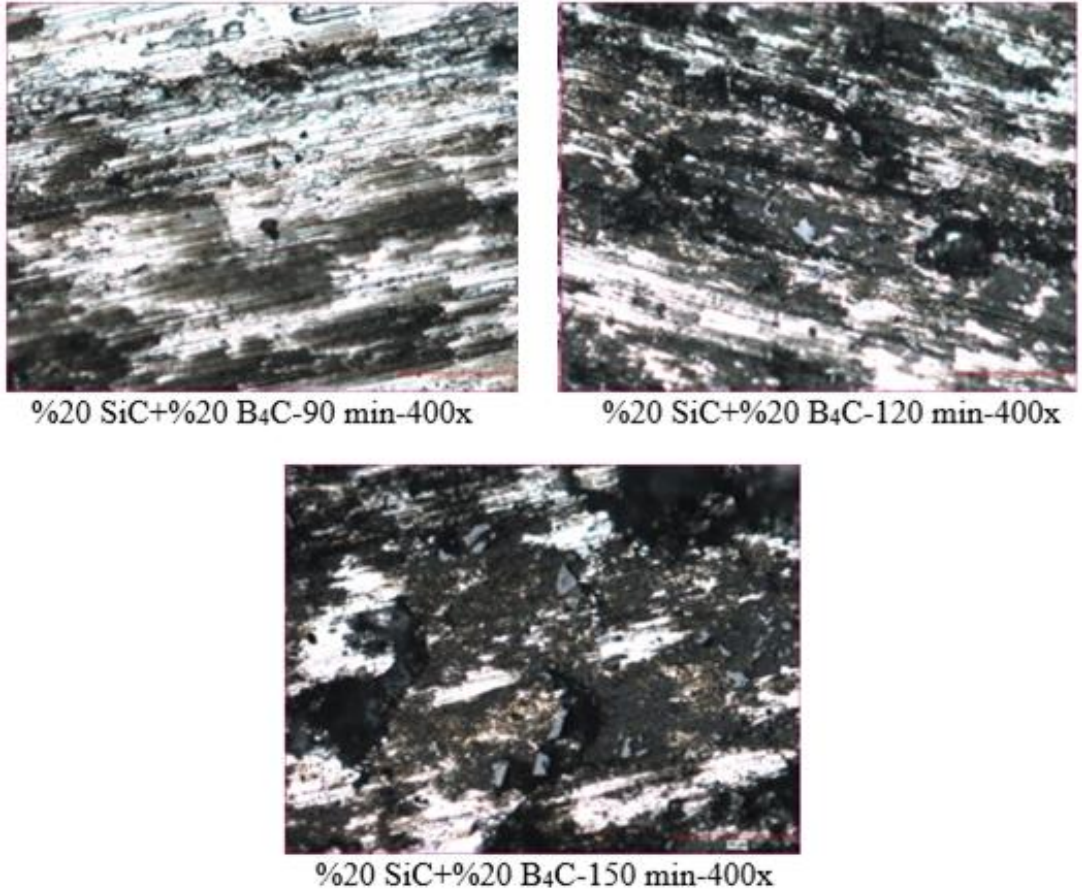
Şekil 6.15. B₄C takviyeli kompozitlerin aşınma görüntüleri

Şekil 6.15’deki optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, genel olarak SiC takviyeli kompozitlerde aşınma davranışlarının benzeri görülmektedir. Sinterleme süresinin artmasıyla kompozit yapı içerisindeki B₄C takviye elemanı parçacıklarının yüzey üzerinden çok fazla koparak ayrıldığı söylenebilir. Özellikle 150 dakika sinterlenmiş numune yüzeyine bakıldığında çok derin ve geniş yüzeyli boşlukların oluştuğu görülmektedir.

Çok sert fazda olan B₄C parçacıkları, yoğunluğu artan ancak bir miktar yumuşayan Al 7075 matris içerisinde kolayca ayrılmıştır. Yapı içerisinde çok fazla miktarda B₄C eksilmesi olduğundan geride kalan yumuşak Al 7075 fazı daha fazla aşınma davranışı göstermiştir. %40 B₄C takviye oranının, matris ve takviye olarak bütünleşmesine çok uygun olmadığı daha önce ifade edilmiştir.

Kompozit yapı içerisinde yüksek oranda bulunan B_4C tanecikleri sinterleme sürecinde yeterince ıslatmaya maruz kalamadığından yapı içerisinde güçlü bağ yapamamıştır. Dolayısıyla aşınma deneyleri sırasında kolaylıkla kompozit yapı içerisinde koparak uzaklaşmıştır.

Bu sonuca göre B_4C parçacıklarının Al 7075 matris tarafından ıslatılmasının, SiC parçacıklarına göre daha az olduğu ifade edilebilir. Benzer bir sonuç İpek tarafından yapılan çalışmada belirtilmiştir [65].



Şekil 6.16. SiC+B₄C takviyeli kompozitlerin aşınma görüntüleri

SiC ve B_4C takviye elemanının eşit oranda birlikte kullanıldığı numunedeki aşınma davranışı, B_4C takviye malzemesinin tek başına kullanıldığı numune ile çok benzer özellikler göstermiştir. Sinterleme süresinin artmasıyla aşınma miktarı da artış

göstermiştir. Önceki kompozit numunelerden biraz farklı olarak, yapı içerisinde kopan iri taneli takviye parçacıklarının yerine bir miktar ince takviye parçacığının olduğu ve yumuşak fazdaki Al 7075 matris malzemesinin sıvandığı söylenebilir. Bu aşınma davranışı sebebiyle, %20 SiC+%20 B₄C, %10 SiC+%10B₄C, %5 SiC+%5 B₄C takviyeli kompozit numunelerde aşınma miktarlarının birbirine yakın değerlerde çıktığı düşünülmektedir.

Şekil 6.14,6.15 ve 6.16'daki görüntüler ile aşınma ve sertlik değerleri birlikte değerlendirildiğinde Al 7075 matris içerisine ilave edilen SiC ve B₄C parçacıklarının miktarına bağlı olarak sertlik değerleri yükselirken aşınma gibi mekanik özelliklerin olumsuz etkilendiğini ifade etmek mümkündür. Benzer bir sonuç Cambronero ve ark. yaptığı çalışmada belirtilmiştir [66].

6.6 Balistik Analiz

Balistik analiz çalışmasında, üretilen 9 farklı özellikte numuneler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenerek belirli uzaklıktan yüksek hızda darbeye maruz bırakılmış olup numunelerin balistik başarımları dinamik modelleme yöntemi ile incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapan ANSYS / Explicit Dynamics (Student version) programı kullanılmıştır. Analizlerde numune yapısı ve mermi modellenmiştir. Analizlerde oluşturulan sonlu elemanlar yöntemi için programa girilen malzeme özellikleri aşağıda verilmiştir. Çalışmanın amacı; zırh malzemesi olarak üretilen numunelerin, belirlenen özel çarpma koşullarında balistik olarak uygun olup olmadığının belirlenmesidir. Analizlerde meydana gelen deformasyonlar sonucu zırh malzemelerinin çarpışma karakteristikleri hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır.

Çizelge 6.2. Numune Karışım Oranları ve Özellikleri

			MALZEME ÖZELLİKLERİ		
	MALZEME	KARIŞIM ORANI	YOĞUNLUK (g/cm ³)	ELASTİKLİK MODÜLÜ(GPa)	POISON ORANI(ν)
1	NUMUNE 1	%40 SiC+%60 Al7075	2,97	200	0.22
2	NUMUNE 2	%20 SiC+%80 Al7075	2,89	135.6	0.29
3	NUMUNE 3	%10 SiC+%90 Al7075	2,85	103.8	0.31
4	NUMUNE 4	%40 B ₄ C+%60 Al7075	2,69	227.2	0.28
5	NUMUNE 5	%20 B ₄ C+%80 Al7075	2,75	149.6	0.30
6	NUMUNE 6	%10 B ₄ C+%90 Al7075	2,78	110.8	0.32
7	NUMUNE 7	%20 SiC+%20 B ₄ C+%60 Al7075	2,83	213.2	0.27
8	NUMUNE 8	%10 SiC+%10 B ₄ C+%80 Al7075	2,82	142.6	0.30
9	NUMUNE 9	%5 SiC+%5 B ₄ C+%90 Al7075	2,81	107.3	0.31

Numunelerin Elastisite modülü ve Poisson oranlarını hesaplayabilmek için Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemlerine başvurulmuştur. Bu yöntem, homojenleştirilmek istenen malzemenin etkin malzeme özelliklerini, bileşenlerinin özellikleri cinsinden analitik ve kapalı bir formda vermektedir. Doğal olarak, farklı tip ve boyutta katkı maddeleri içeren farklı kompozit malzemelerin homojenleştirilmesi problemi için bu yöntemin her zaman uygun olduğu gibi bir genellemeye varılamasa da, parçacık tipli kompozitlerin homojenleştirilmesi probleminde kapalı ve analitik çözüm bulabilme olanağı, diğer yöntemlere kıyasla hem doğruluk hem de işlem kolaylığı açısından üstünlük sağlar[67].

Matris ve takviye elemanların hacimsel oranları toplamı 1'dir.

$$V_c + V_m = 1(5)$$

Burada;

V_c = Takviye malzeme hacimsel oranı

V_m = Matris malzeme hacimsel oranı

Bu modelde, kompozit malzemenin etkili hacim modülü K ve kayma modülü G Eşitlik 6 ve Eşitlik 7 ile ifade edilir;

$$\frac{K - K_m}{K_c - K_m} = \frac{V_c}{\left[1 + (1 - V_c) \frac{3(K_c - K_m)}{3K_m + 4G_m}\right]} \quad (6)$$

Burada;

K = Malzeme etkili hacim modülü (Bulk Modülü) $\left(\frac{N}{m^2}\right)$

K_m = Matris malzeme etkili hacim modülü

K_c = Takviye malzeme etkili hacim modülü

G_m = Matris malzeme kayma modülü $\left(\frac{kg}{cm^2}\right)$

$$\frac{G - G_m}{G_c - G_m} = \frac{V_c}{\left[1 + (1 - V_c) \frac{(G_c - G_m)}{G_m + f_1}\right]} \quad (7)$$

Burada;

G = Kayma modülü

G_c = Takviye malzeme kayma modülü

f_1 = Matris malzemeye ait sabit

$$f_1 = \frac{G_m(9K_m + 8G_m)}{6(K_m + 2G_m)} \quad (8)$$

Elastisite modülü E ve Poisson oranı ν 'yi hesaplamak için Eşitlik 9 ve Eşitlik 10 kullanılmaktadır.

$$E = \frac{9KG}{3K+G} \quad (9)$$

Burada;

$$E = \text{Elastisite modülü} \left(\frac{N}{m^2} \right)$$

$$\vartheta = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)} \quad (10)$$

Burada;

$$\vartheta = \text{Poisson oranı}$$

Lineer karışım kuralına göre her bir katmanın yoğunluğu, ρ ise aşağıdaki eşitlik(11) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho = V_m \rho_m + V_c \rho_c \quad (11)$$

Burada;

$$\rho = \text{Kompozit yoğunluğu} \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$\rho_m = \text{Matris malzeme yoğunluğu} \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$\rho_c = \text{Takviye malzeme yoğunluğu} \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

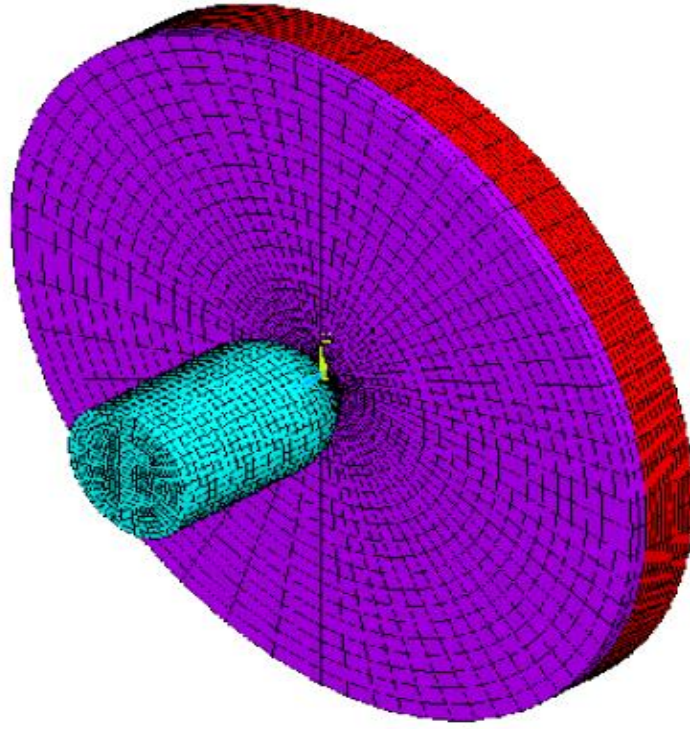
Numunelere yapılması istenen analiz için Ansys yazılımının bizden istediği 3 adet ayırt edici mekanik özellik vardır. Bunlar yoğunluk, elastisite modülü ve poisson oranıdır. Hedef plakalar çalışmada üretilen numunelere uygun olarak 15 mm kalınlıkta ve 35 mm çapında modellenmiştir.

6.6.1 Analiz Girdileri

Toplamda 10 adet balistik çarpışma analizi yapılacaktır. Bu analizlerde ilk olarak takviyesiz Al7075 modeli ve üretim ve modellemesini gerçekleştirdiğimiz 9 adet numunenin balistik başarımları inceleneceltir. Analizlerin tamamı için ortak olan bazı analiz girdileri vardır. Bunlardan başlıcaları; mermi hızı, mermi çekirdeğinin malzemesi, meshleme, etki süresidir.

Meshleme

Meshleme bir matematiksel modelin çözümündeki en kritik noktalardan biridir. Mesh üretme fiziksel bir tanım aralığını daha küçük tanım aralıklarına (elemanlara) bölme işlemi olarak tanımlanabilir. Burada amaç bir diferansiyel denklemin çözümünü kolaylaştırmaktır. Bundan dolayı sonlu elemanlar yönteminde elde edilecek sonuçların yaklaşım doğruluğu, ağ içerisinde kullanılan eleman tipine ve eleman sayısına bağlıdır. Mesh kalitesi ne kadar iyi olursa modelin çözümünden alınacak cevap o kadar doğru olacaktır. Ancak şöyle bir konu vardır ki node ve element sayısını arttırırken problemin çözüm süresini de arttırmış oluruz. Hatta çözümün mümkün olmayacağı bir seviyeye de çıkarabiliriz. Bu nedenle bilgisayarımızın el verdiği ölçüde mesh atabiliriz. Bu mesh sonucu elde edilen node ve element sayısı aşağıdadır ve meshin görüntüsü paylaşılmıştır.

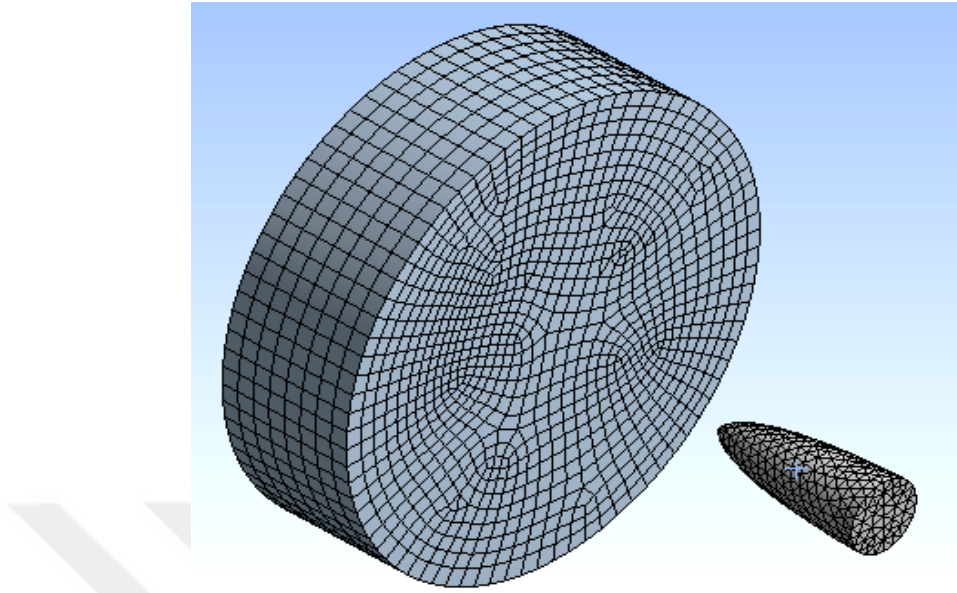


Şekil 6.17. Mermi ve hedef ağ yapısı [68]

Details of "Mesh"	
+	Display
+	Defaults
-	Sizing
	Use Advanced Si... Off
	Relevance Center Medium
	☐ Element Size Default
	Initial Size Seed Active Assembly
	Smoothing High
	Transition Slow
	Span Angle Center Coarse
	Minimum Edge L... 24,6620 mm
+	Inflation
+	Patch Conforming Options
+	Patch Independent Options
+	Advanced
+	Defeaturing
-	Statistics
	☐ Nodes 9707
	☐ Elements 10245
	Mesh Metric None

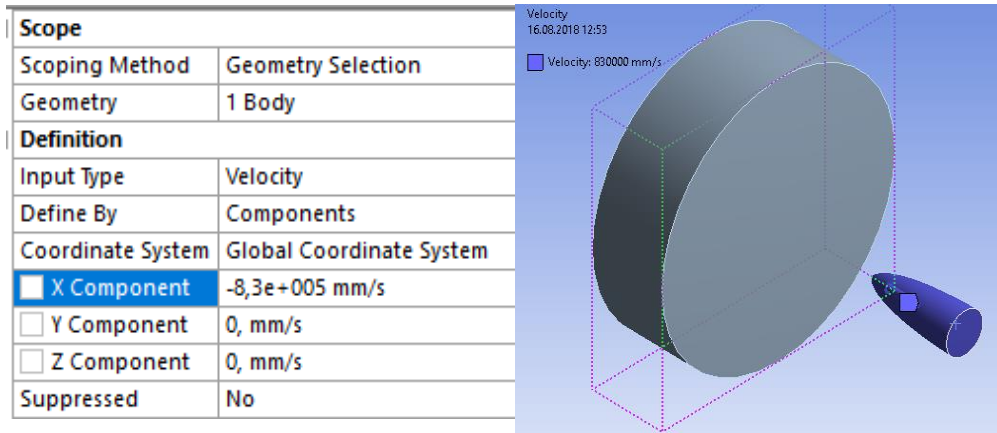
Şekil 6.18. Meshleme Parametreleri

Hedef ve Merminin Mesh (Ağ) Yapısı



Şekil 6.19. Hedef ve merminin mesh (ağ) yapısının gösterilmesi

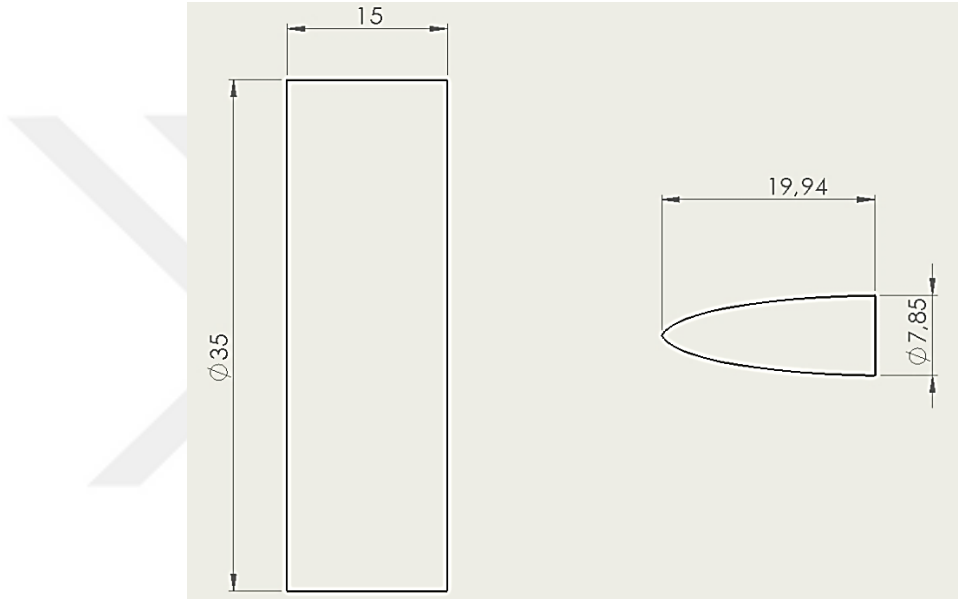
Mermi Hızı



Şekil 6.20. Mermi Hızı

Modellenen mermi 7.62 mm çapında zırh delici mermidir. Bu merminin kullanıldığı silahlardan bazıları G3, kalaşnikof silahlarıdır ve yapılan araştırmalarda namlu çıkış hızı 760 m/s ile 830 m/sn aralığındadır. Maksimum deformasyonu görmek için 830000 mm/s namlu çıkış hızı tercih edilmiştir.

Hedef –Mermi ekirdeėi



şekil 6.21. Mermi ekirdeėi ve Hedef leri

Mermi Çekirdeği Parametreleri

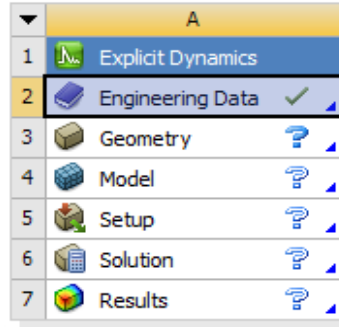
Details of "MERMI"	
+	Graphics Properties
-	Definition
☐	Suppressed
	No
	Stiffness Behavior
	Flexible
	Coordinate System
	Default Coordinate System
	Reference Temperature
	By Environment
	Reference Frame
	Lagrangian
-	Material
	Assignment
	Mermi Çekirdeği
	Nonlinear Effects
	Yes
	Thermal Strain Effects
	Yes
+	Bounding Box
-	Properties
☐	Volume
	606,28 mm ³
☐	Mass
	4,6987e-003 kg
	Centroid X
	-7,2533 mm
	Centroid Y
	-4,7719e-017 mm
	Centroid Z
	1,0699e-016 mm
	Moment of Inertia Ip1
	2,7486e-002 kg·mm ²
	Moment of Inertia Ip2
	0,11943 kg·mm ²
	Moment of Inertia Ip3
	0,11943 kg·mm ²
-	Statistics
	Nodes
	617
	Elements
	2461
	Mesh Metric
	None

Şekil 6.22. Mermi çekirdeği parametreleri

6.6.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz

Program analiz modüllerinden Expilicit Dynamics modülü seçilir. Ardından modül içerisinde mermi ve hedef numunelerin malzeme özelliklerini atamak amacıyla Engineering Data sekmesine giriş yapılır. Engineering Data, programın belirli malzemelerle donatılmış malzeme datalarından oluşmakla beraber modellemesi yapılan numunelere ait veriler manuel olarak girilerek malzeme özellikleri atanır. Mermi çekirdeği malzemesi olarak çelik malzeme datası programdan alınmış olup üretilen numunelere ait datalar ilgili sekmeye girilerek numunelere ait malzeme özellikleri atanmıştır. Mermi ve hedef malzeme atamaları tamamlandıktan sonra 3 boyutlu çizim programları yardımıyla oluşturulan mermi ve hedef modelleri programa import

edilir. Analizdesinır şartı olarak hedef model dört kenarından sabitlenmiştir. Hedef modeli sabitlenerek çarpışma hızı değeri girilir. Sabitlenen mermi ve hedef için analiz ayarları sekmesinden çarpışmaya ait veriler girilir. Solution modülü altında deformation ve stress tool sekmeleri seçilerek solve komutu ile çözüm başlatılır.



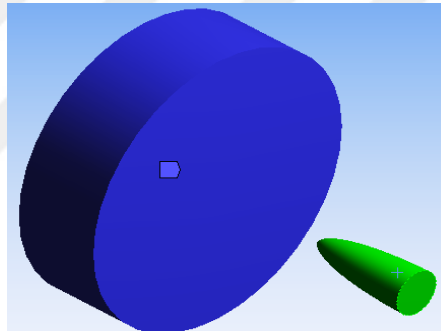
Şekil 6.23. Expilicit Dynamics Engineering Data Seçimi

Properties of Outline Row 4: NUMUNE 1					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	2,97	g cm ⁻³		
3	Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young's Modulus an...			
5	Young's Modulus	2E+05	MPa		
6	Poisson's Ratio	0,22			
7	Bulk Modulus	1,1905E+11	Pa		
8	Shear Modulus	8,1967E+10	Pa		
9	Field Variables				

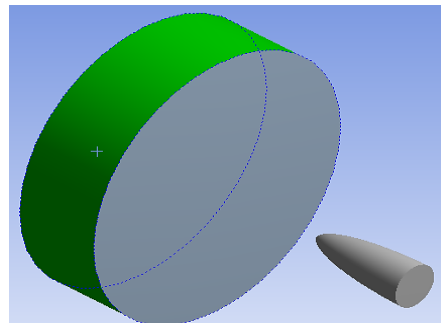
Şekil 6.24. Hedef numuneye ait malzeme özellikleri

Properties of Outline Row 11: Stainless Steel			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Density	7750	kg m ⁻³
3	 Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	 Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and...	
8	Young's Modulus	1,93E+11	Pa
9	Poisson's Ratio	0,31	
10	Bulk Modulus	1,693E+11	Pa
11	Shear Modulus	7,3664E+10	Pa
12	 Field Variables		
16	 Tensile Yield Strength	2,07E+08	Pa
17	 Compressive Yield Strength	2,07E+08	Pa

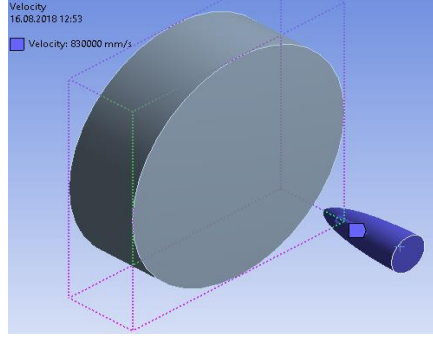
Şekil 6.25. Çelik mermi malzemesine ait özellikler



Şekil 6.26. İmport edilen hedef – mermi modeli



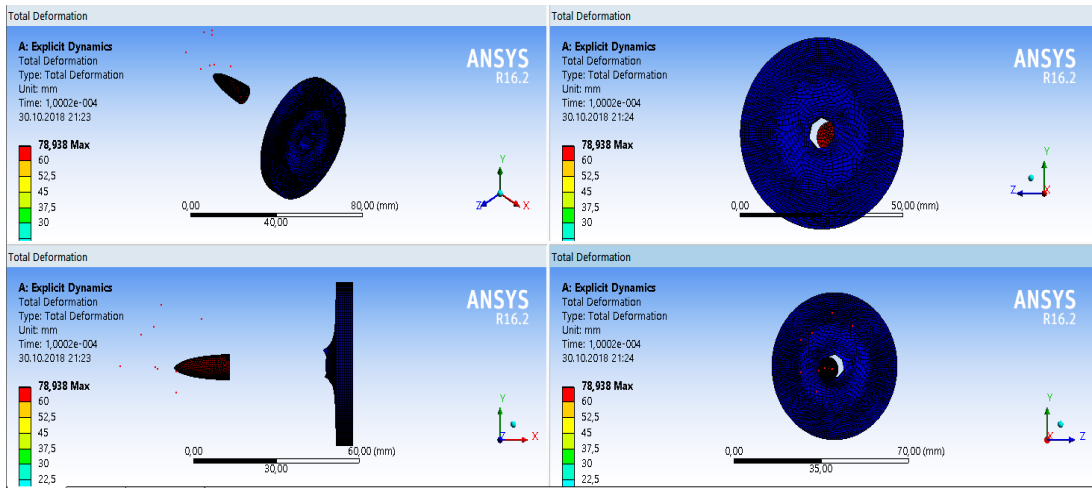
Şekil 6.27. Sabitlenen hedef – mermi modeli



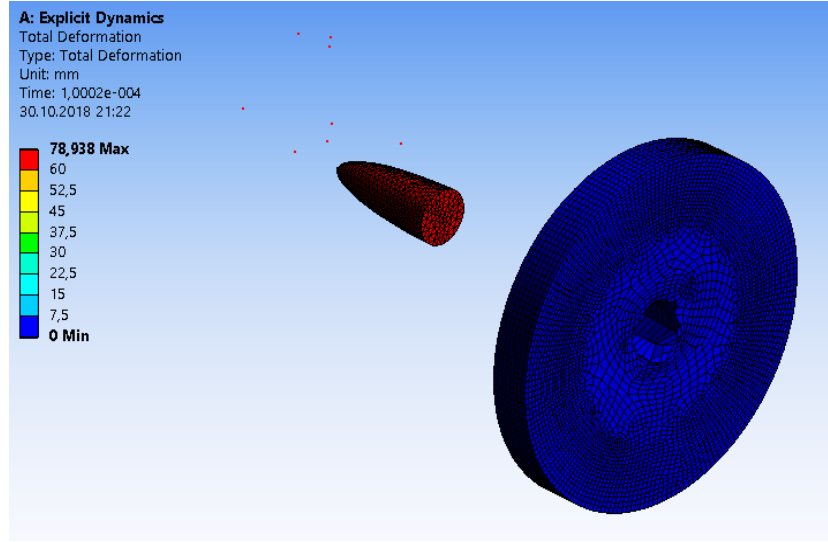
Şekil 6.28. Hız değerinin girilmesi

Analizlerde ilk olarak modellemesi yapılan takviyesiz Al7075 malzemenin balistik başarımı incelenmiştir. Ardından üretimi yapılan ve mekanik özellikleri incelenen 9 adet kompozit numunenin modelleme ve analizleri yapılmıştır. Hedef –mermi çarpışması sonucu meydana gelen deformasyon ve gerilme dağılımı, incelenen zırhın, belirli çarpma koşullarında korum sağladığı personel ya da teçhizatın emniyetini ne seviyede koruduğunun anlaşılabilmesi açısından önemlidir.

(Al7075 Numune) Hedef –Mermi

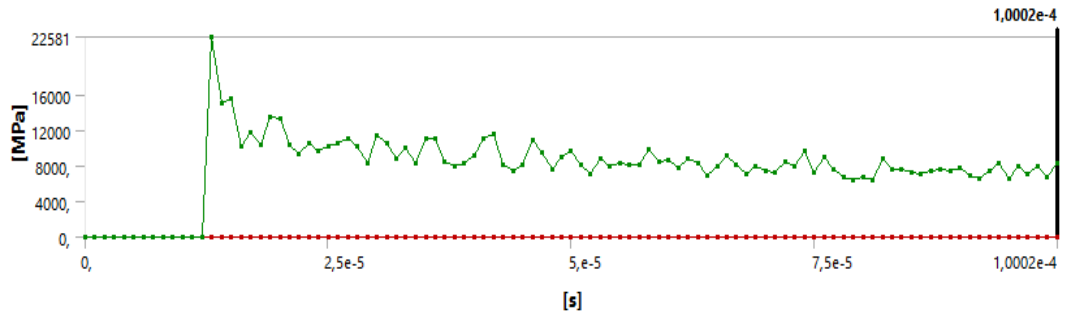


Şekil 6.29. Al7075 hedef ile mermi etkileşimi



Şekil 6.30. Merminin Al7075 hedefi tam penetrasyonu

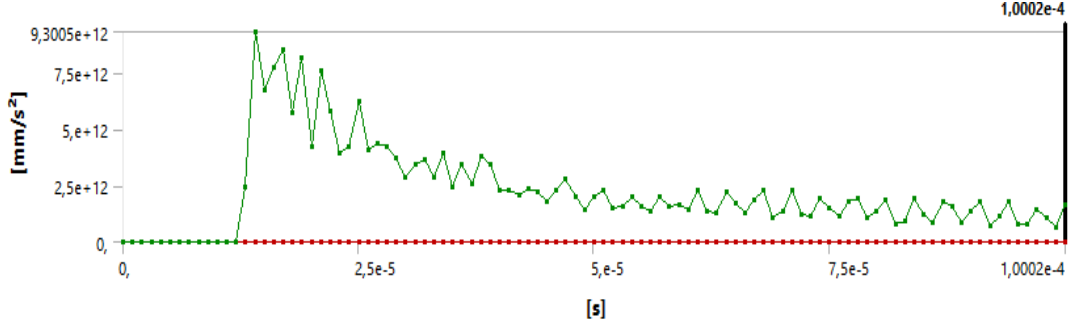
Takviyesiz Al7075 hedef ve çelik mermiye ait analizde, hedefin deforme olmuş görüntüsü görülmektedir. 7,62 mm mermi çekirdeğinin Al7075 yapıyı delip geçtiği görülmektedir. Takviyesiz Al7075 hedefin tek başına mermi karşısında balistik dayanım gösteremediği, tam bir penetrasyon (girme, nüfuziyet) gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 6.31. Hedefe ait gerilme-zaman grafiği

Şekil 6.31'deki gerilme - zaman grafiği incelendiğinde merminin hedefe çarptığı anda bir süre gerilme değerinin arttığı, çarptıktan sonra hedefi delip geçene kadar

gerilmelerin azalan yönde değiştiği ve en sonunda hedef delindiğinde en aza indiği görülmektedir.

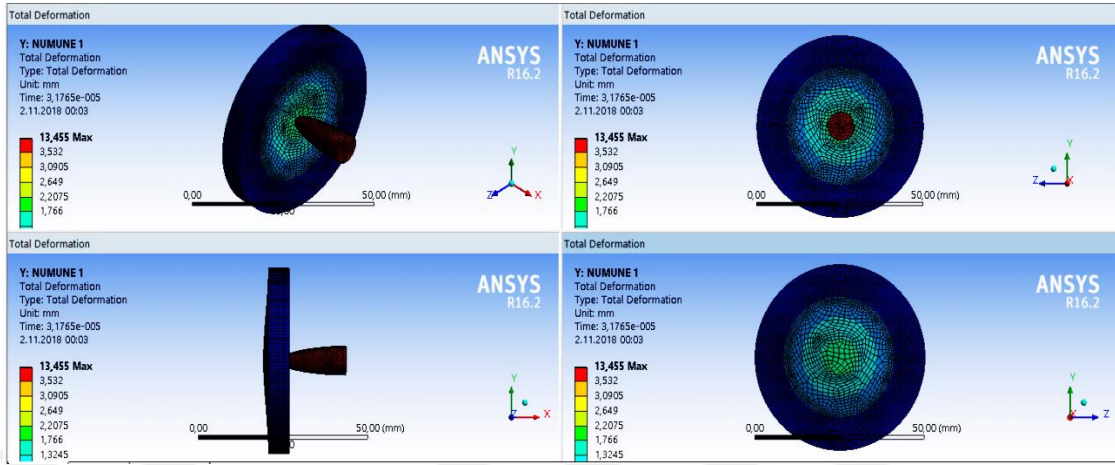


Şekil 6.32.Mermiye ait yavaşlama grafiği

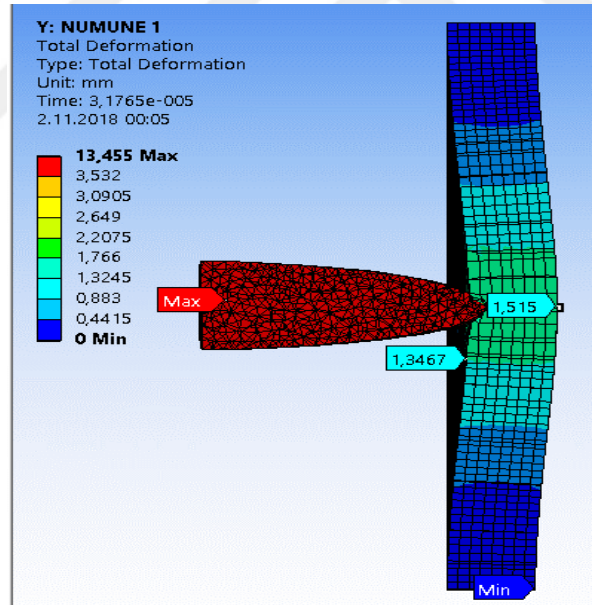
Yapılan analizde, merminin namludan çıkma anından itibaren hızın işaretinin eksi yönde olduğu dikkate alınmıştır. Zira yapılan modellemede hedef noktası sıfır noktası olarak referans alınmıştır. Dolayısıyla merminin hedefe yaklaşmasıyla giderek mesafe azaldığından hız negatif olarak yorumlanmaktadır. Analizlerde yer alan tüm ivme-zaman grafikleri bu esasa dayanarak yorumlanmıştır. Şekil 6.20'ye bakıldığında mermi hızına ait özellikler görülmektedir.

Şekil 6.32'deki ivme zaman grafiği incelendiğinde merminin çarpma anından itibaren yavaşlamaya başladığı, hedefin içerisinde ilerlerken bu yavaşlamanın azalan yönde ilerlediği ve hedef tamamen delindiğinde mermideki yavaşlanma ivmesinin de sıfıra yaklaştığı görülmektedir.

(Numune-1) Hedef– Mermi



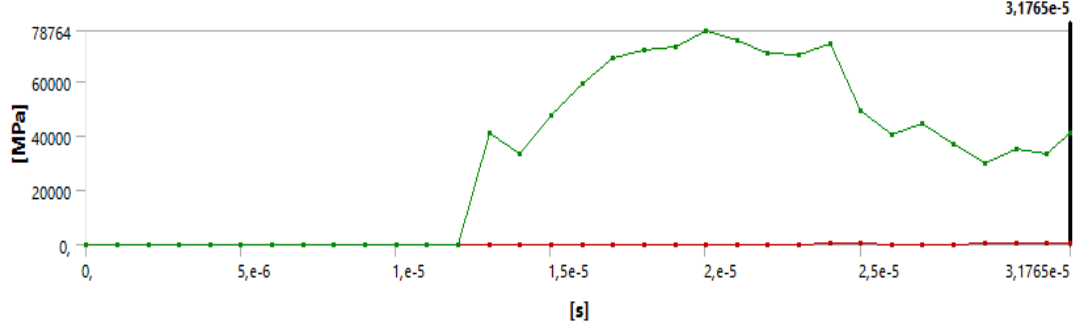
Şekil 6.33. %40 SiC + %60 Al7075, Hedef – Mermi Etkileşimi



Şekil 6.34. %40 SiC + %60 Al7075, Hedef –Mermi Batma Derinliği

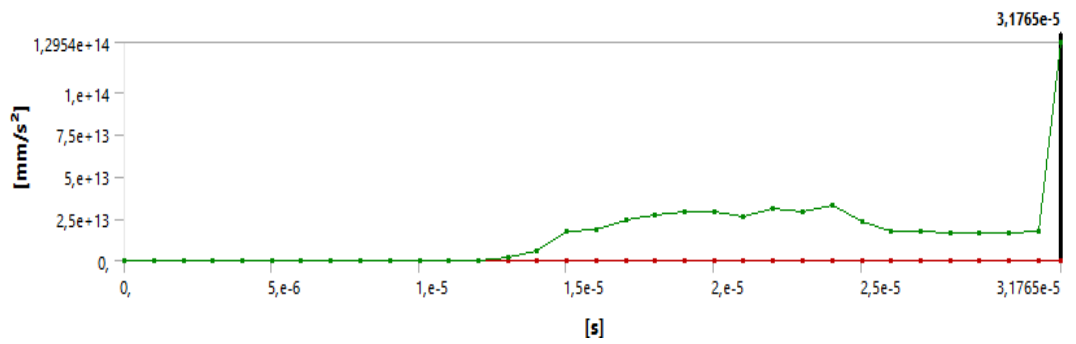
Deformasyonlar incelendiğinde mermi hedefe hasar vermiş ancak penetrasyon gerçekleşmemiştir. Hedefin çarpma bölgesi ve yakın bölgelerde kırılmalar ve

katlanmalar görülmüş ayrıca mermi de az miktarda hasar almıştır. Mermi hedefe yaklaşık 1,5 mm batmıştır.



Şekil 6.35. % 40 SiC + % 60 Al7075 Hedefe ait gerilme-zaman grafiği

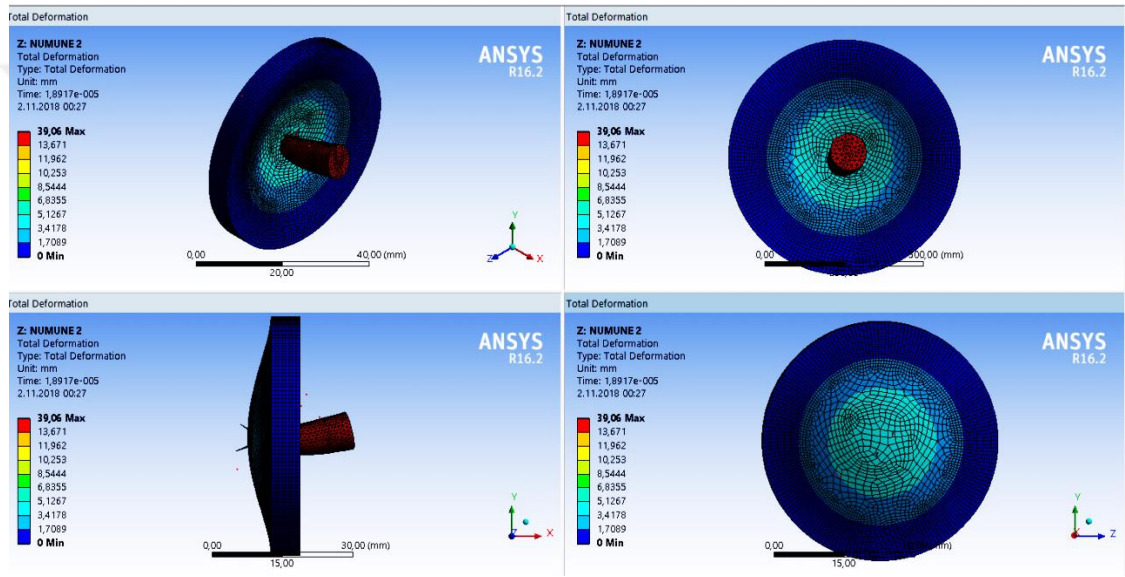
Şekil 6.35'daki gerilme - zaman grafiği incelendiğinde merminin hedefe çarptığı anda bir süre gerilme değerinin arttığı, çarptıktan sonra hedefte oluşturduğu penetrasyon boyunca malzemenin gösterdiği karşı direnç sebebiyle gerilmenin bir miktar daha artarak en üst seviyeye ulaştığı ve durduğu ana gelinceye kadar ise giderek azaldığı görülmektedir.



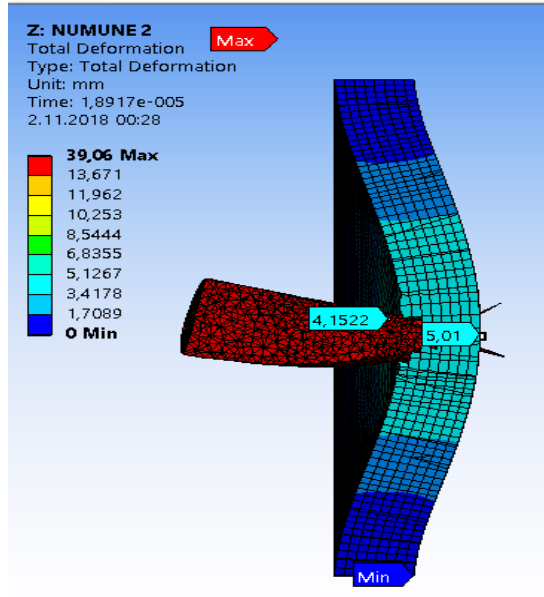
Şekil 6.36. Mermiye ait yavaşlama grafiği

Şekil 6.36'daki ivme-zaman grafiği incelendiğinde merminin çarpma anından itibaren yavaşlamaya başladığı, hedefin içerisinde ilerlerken bu yavaşlamanın artan yönde ilerlediği dolayısıyla grafiğin pozitif kısmında yer aldığı görülmektedir. Mermi tamamen durduğunda ise mermideki yavaşlanma ivmesinin de en üst noktaya çıktığı görülmektedir.

(Numune-2) Hedef – Mermi

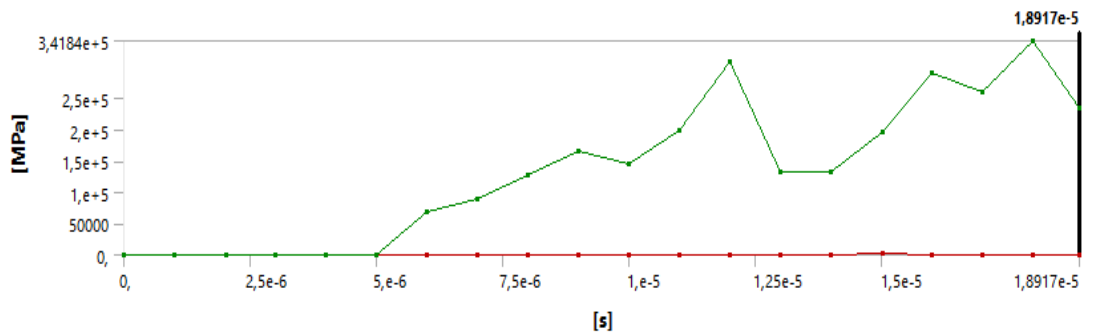


Şekil 6.37. % 20 SiC + % 80 Al7075, Hedef – Mermi Etkileşimi



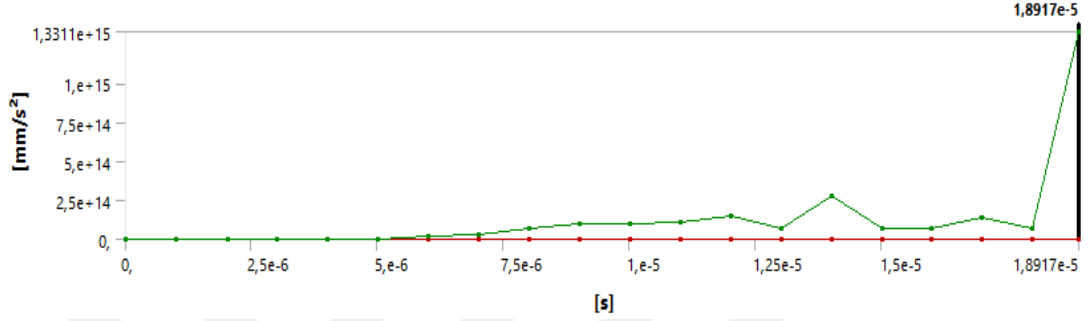
Şekil 6.38. %20 SiC + %80 Al7075, Hedef –Mermi Batma Derinliği

Deformasyonlar incelendiğinde hedef merminin tam penetrasyonunu engellemiş bununla birlikte yaklaşık 5 mm civarında bir batma derinliği oluşmuştur.%20 SiC katkısı Al7075 malzemede balistik başarımı sağlamıştır.



Şekil 6.39. %20 SiC + %80 Al7075 Hedefe ait gerilme-zaman grafiği

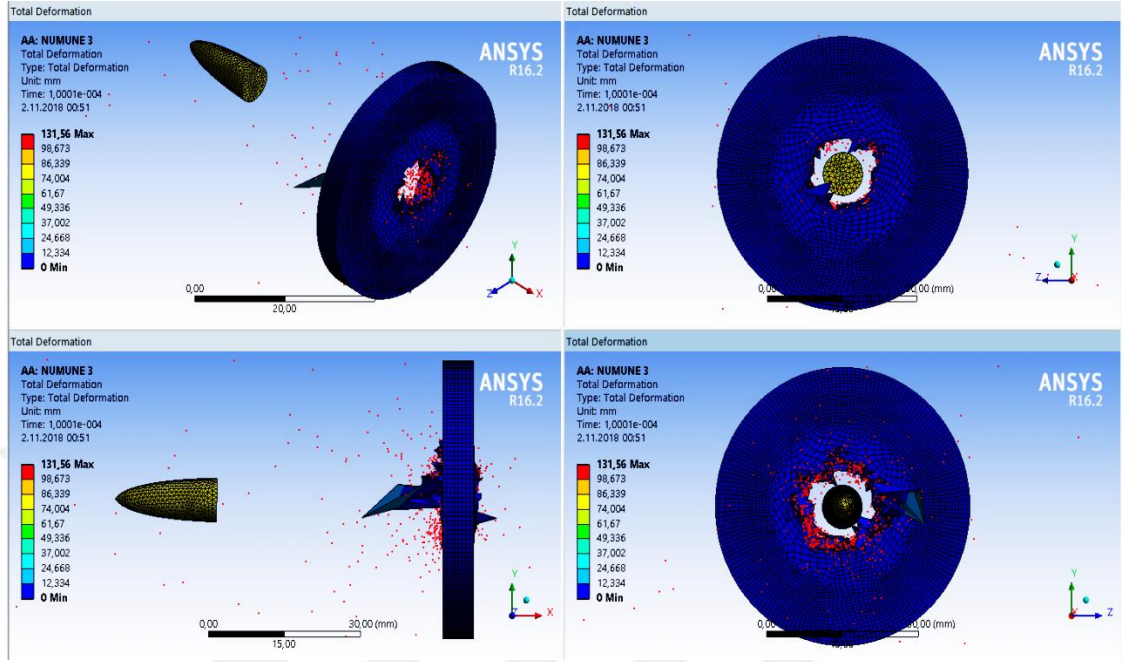
Şekil 6.39'daki gerilme- zaman grafiği incelendiğinde merminin hedefe çarptığı anda malzemenin gösterdiği karşı direnç sebebiyle gerilmenin bir miktar arttığı, daha sonra malzeme içerisindeki kırılmalar ve penetrasyon sebebiyle biraz düştüğü, daha sonra malzemenin merminin daha fazla ilerlemesine engel olması ve direnç göstermesi neticesinde gerilme değerinin tekrar artışa geçtiği görülmektedir.



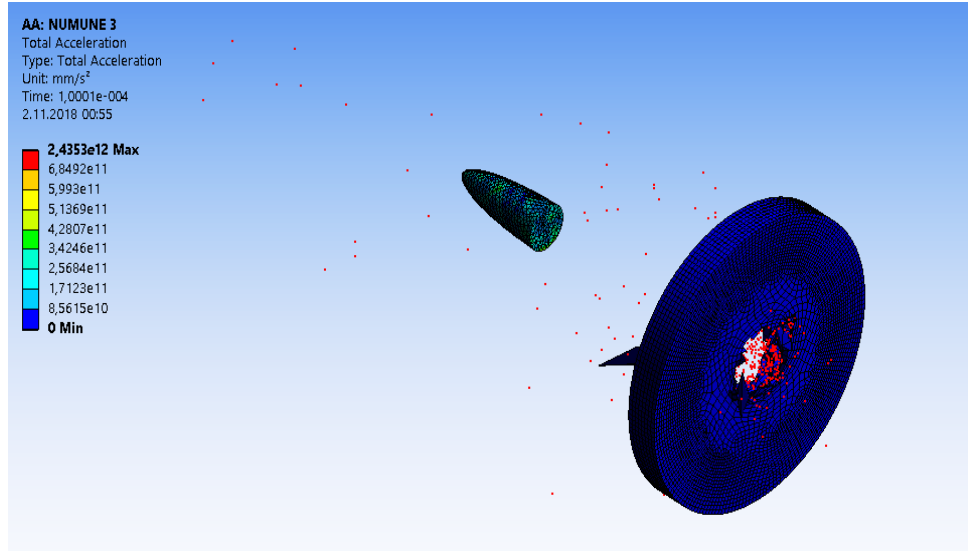
Şekil 6.40. Mermiye ait yavaşlama grafiği

Şekil 6.40'daki ivme-zaman grafiği incelendiğinde Numune 1'de olduğu gibi merminin çarpma anından itibaren yavaşlamaya başladığı, hedefin içerisinde ilerlerken bu yavaşlamanın artan yönde ilerlediği dolayısıyla grafiğin pozitif yönde geliştiği görülmektedir. Ancak Hedef 2'deki SiC katkı oranının Hedef 1'in yarısı olması neticesinde, mermi hızındaki yavaşlama daha az olmuştur. Bu hedefte de mermi tamamen durduğunda mermideki yavaşlanma ivmesinin en üst noktaya çıktığı görülmektedir.

(Numune-3) Hedef– Mermi

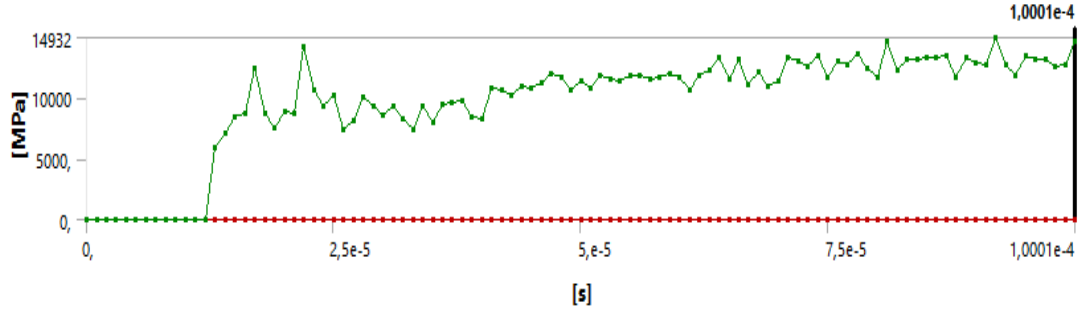


Şekil 6.41. %10 SiC + %90 Al7075, Hedef – Mermi Etkileşimi



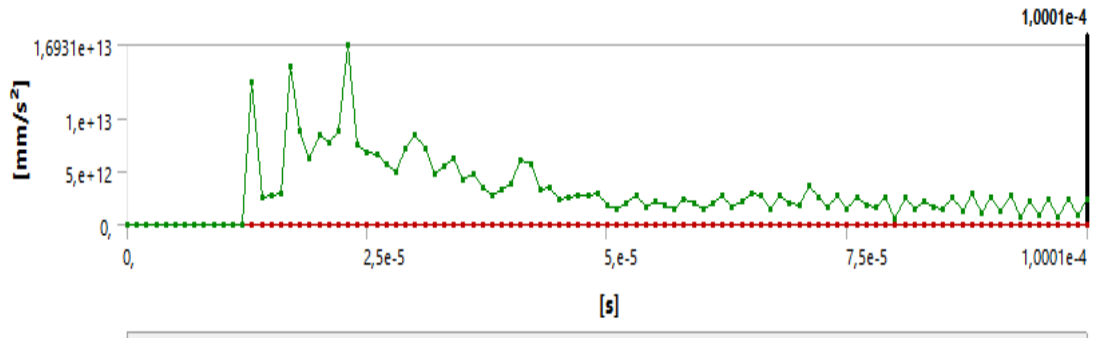
Şekil 6.42. Merminin hedefi tam penetrasyonu

Mermi hedefi tam penetrasyona uğratmış olup delip geçmiştir. %10 SiC katkısı balistik başarım için etkili olmamıştır.



Şekil 6.43. %10 SiC + %90 Al7075 Hedefe ait gerilme-zaman grafiği

Şekil 6.43'deki gerilme - zaman grafiği incelendiğinde merminin hedefe çarptığı anda bir süre gerilme değerinin arttığı, çarptıktan sonra hedefi delip geçene kadar gerilmelerin bir miktar daha artan yönde değiştiği görülmektedir. Merminin hedeften çıktığı anda ise gerilmenin üst değere yaklaştığı görülmektedir.

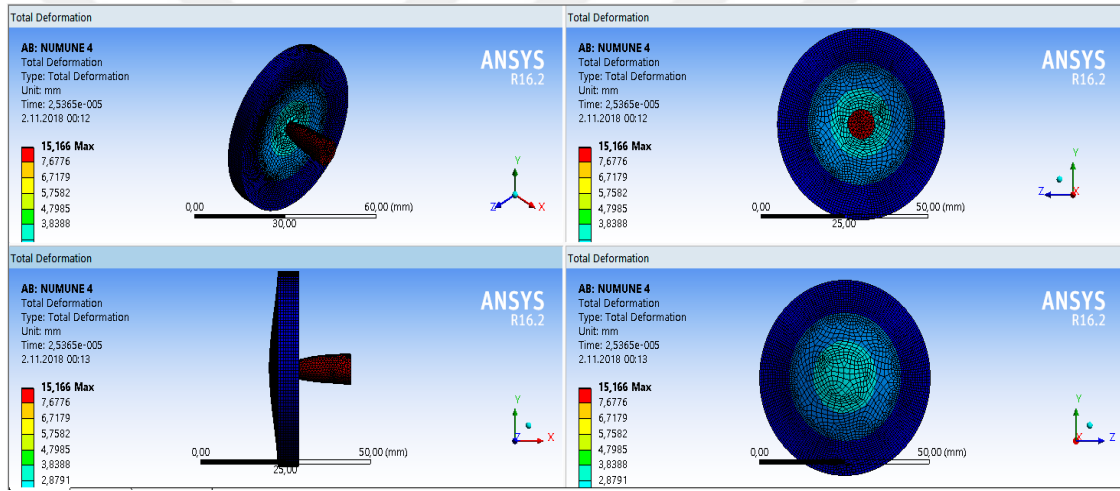


Şekil 6.44. Mermiye ait yavaşlama grafiği

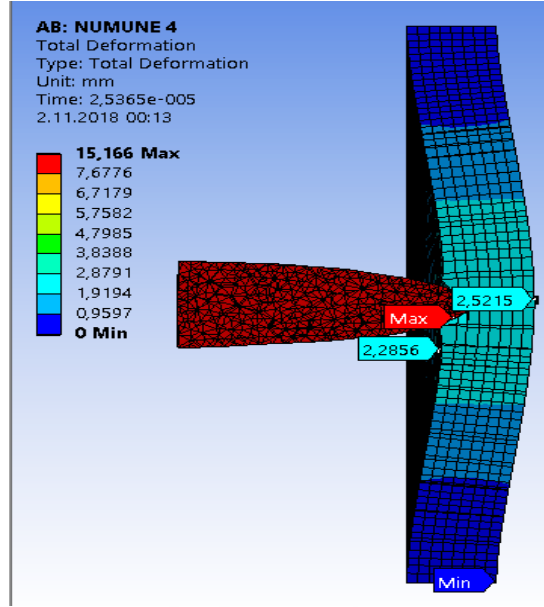
Şekil 6.44'deki ivme-zaman grafiği incelendiğinde Al 7075 takviyesiz hedefte olduğu gibi merminin çarpma anında yavaşladığı, hedefin içerisinde ilerlerken bu yavaşlamanın

azalan yönde ilerlediği ve hedef tamamen delindiğinde mermideki yavaşlanma ivmesinin de sıfıra yaklaştığı görülmektedir. Ancak malzeme içerisinde bulunan %10 SiC katkısının tesiri ile ilk çarpma anı ve merminin ilk penetrasyonu sırasında ivme değerlerinde dalgalanmalar olmuştur. Ancak penetrasyon tamamlandığında ivmedeki değişim daha lineer hale dönüşmüştür. Bu tür kompozit yapılar içerisindeki takviye parçacıklarının tam homojen olamayan dağılımı, mekanik özelliklerde olduğu gibi balistik davranışlarında da bazı kararsız durumlara sebep olabilmektedir.

(Numune-4) Hedef – Mermi

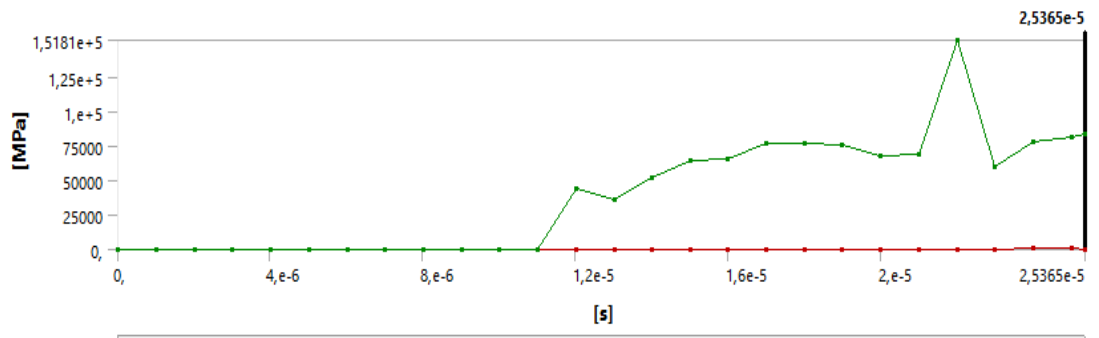


Şekil 6.45. %40 B₄C + %60 Al7075, Hedef – Mermi Etkileşimi



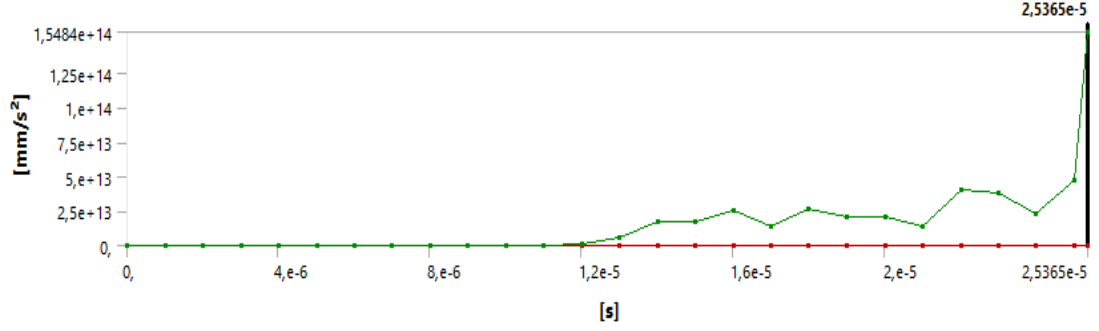
Şekil 6.46. %40 B₄C + %60 Al7075, Hedef –Mermi Batma Derinliği

Deformasyonlar incelendiğinde mermi hedefe hasar vermiş ancak penetrasyon gerçekleşmemiştir. Hedefin çarpma bölgesi ve yakın bölgelerde kırılmalar ve katlanmalar görülmüş ayrıca mermi de az miktarda hasar almıştır. Mermi hedefe yaklaşık 2,5 mm batmıştır.



Şekil 6.47. %40 B₄C +%60 Al7075 Hedefe ait gerilme-zaman grafiği

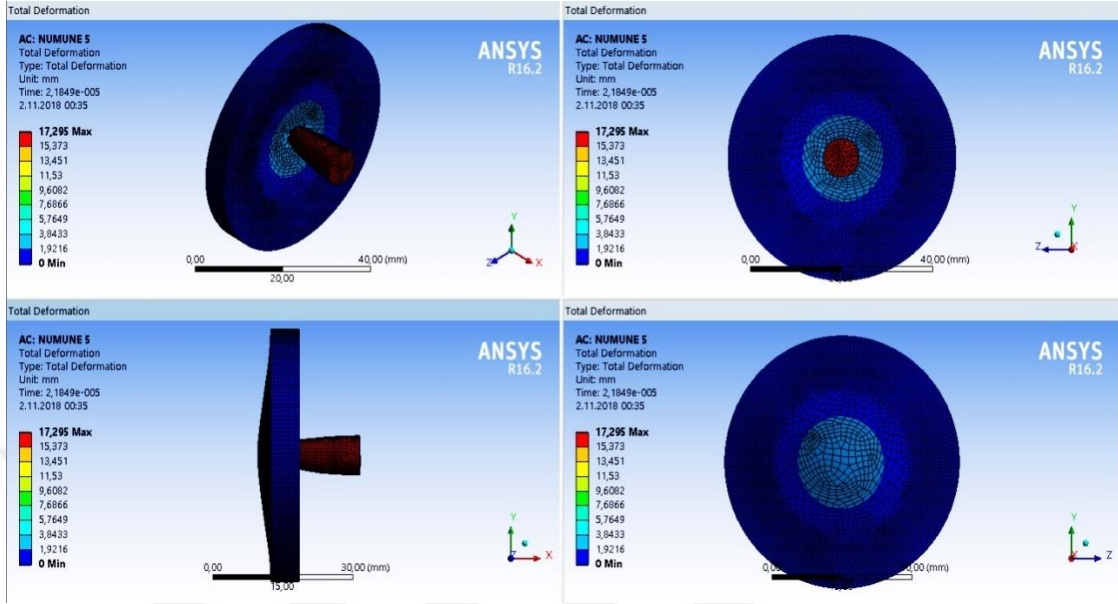
Şekil 6.47'deki gerilme - zaman grafiği incelendiğinde merminin hedefe çarptığı andan itibaren gerilme değerinin artış gösterdiği, görülmektedir. Ayrıca yapı içerisinde bulunan çok sert fazdaki B₄C takviyesinin yüksek oranı sebebiyle malzemenin gösterdiği karşı direnç sebebiyle gerilmenin ani bir yükseliş gösterdiği, daha sonra yapının kırılması ve penetrasyonun sona ermesiyle giderek azaldığı görülmektedir.



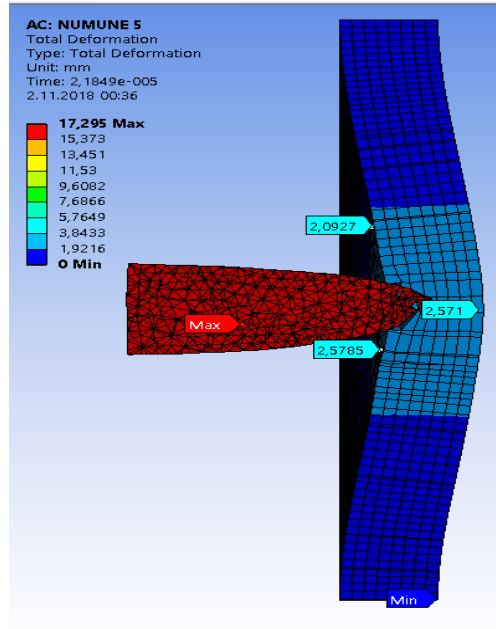
Şekil 6.48. Mermiye ait yavaşlama grafiği

Şekil 6.48'deki ivme-zaman grafiği incelendiğinde merminin çarpma anından itibaren yavaşlamaya başladığı, hedefin içerisinde ilerlerken bu yavaşlamanın artan yönde ilerlediği, dolayısıyla grafiğin pozitif kısımda yer aldığı görülmektedir. Hedef 1'deki %40 takviyeli SiC numuneyle kıyaslandığında, ivmedeki yavaşlamanın daha az olduğu, bu durumda B₄C takviye malzemesinin SiC takviyeye göre daha sert yapıya sahip olmasının sebep olduğu ifade edilebilir. Mermi tamamen durduğunda ise mermideki yavaşlanma ivmesinin de en üst noktaya çıktığı görülmektedir.

(Numune-5) Hedef– Mermi

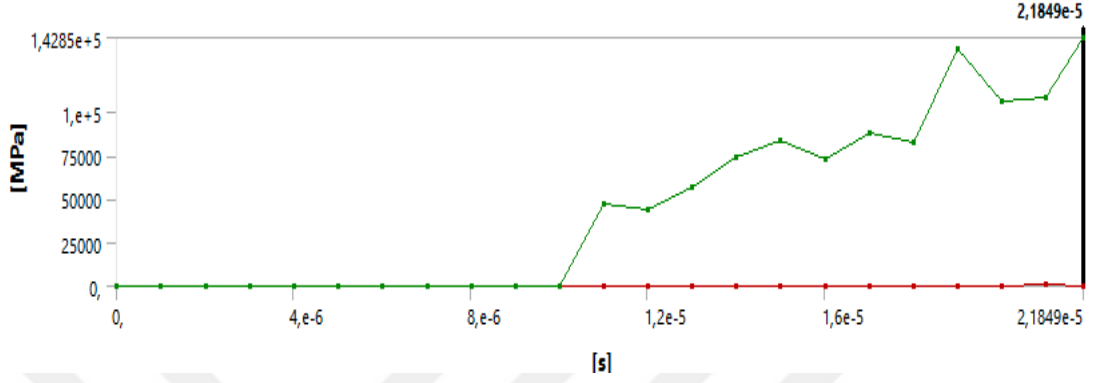


Şekil 6.49. %20 B₄C + %80 Al7075 (Hedef) – Mermi Etkileşimi



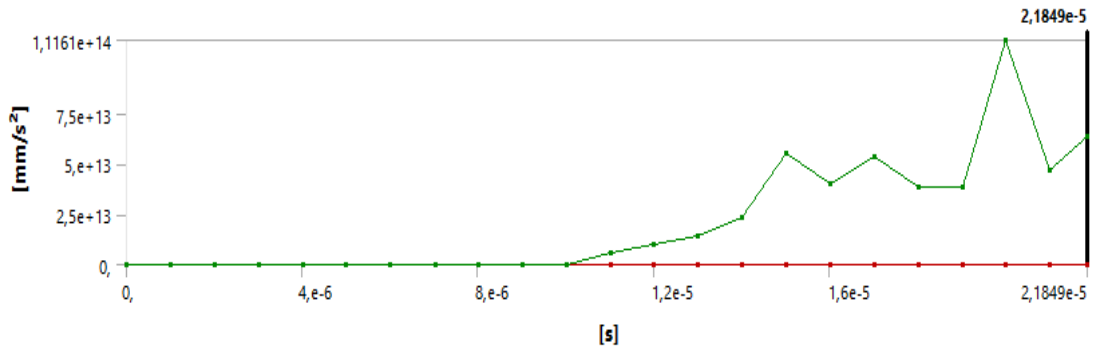
Şekil 6.50. %20 B₄C + %80 Al7075, Hedef –Mermi Batma Derinliği

Deformasyonlar incelendiğinde hedef merminin tam penetrasyonunu engellemiş bununla birlikte yaklaşık 2,6 mm civarında bir batma derinliği oluşmuştur. %20 SiC katkısı Al7075 malzemede balistik başarımlı sağlamıştır.



Şekil 6.51. %20 B₄C + %80 Al7075 Hedefe ait gerilme-zaman grafiği

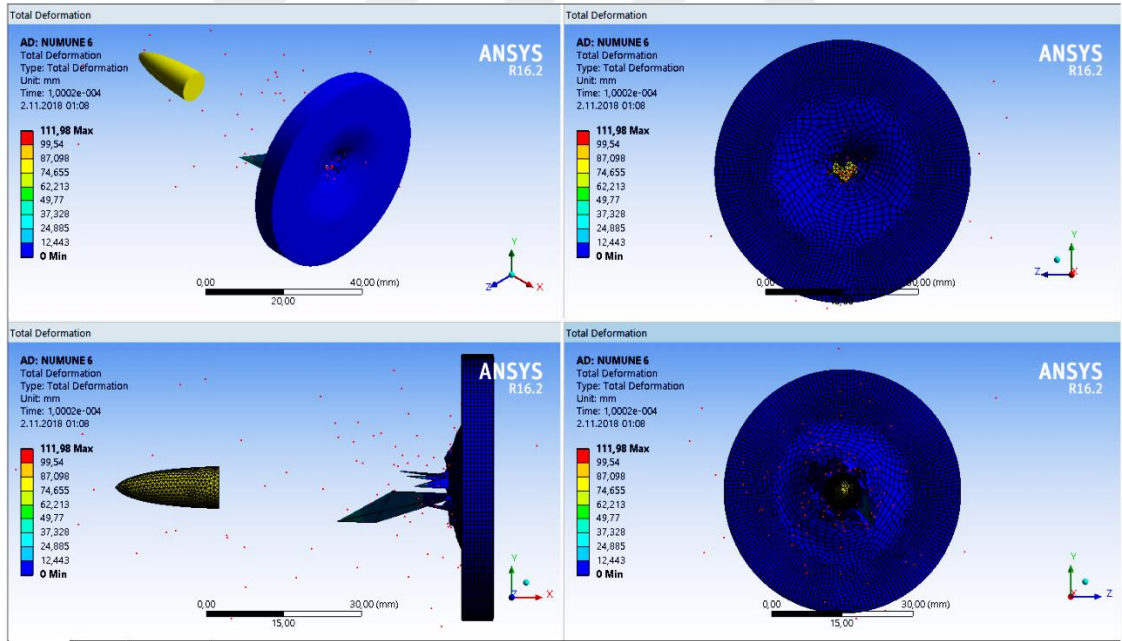
Şekil 6.51'deki gerilme - zaman grafiği incelendiğinde merminin hedefe çarptığı andan itibaren gerilmenin git gide artış gösterdiği, penetrasyonun sonlanması ve malzemenin kırılmasıyla azalmaya başladığı görülmektedir. %20 B₄C takviyeli Hedef 5, %40 B₄C takviyeli Hedef 4'e göre daha fazla deformasyona uğramış olsada, mermi hedefi delip geçememiştir.



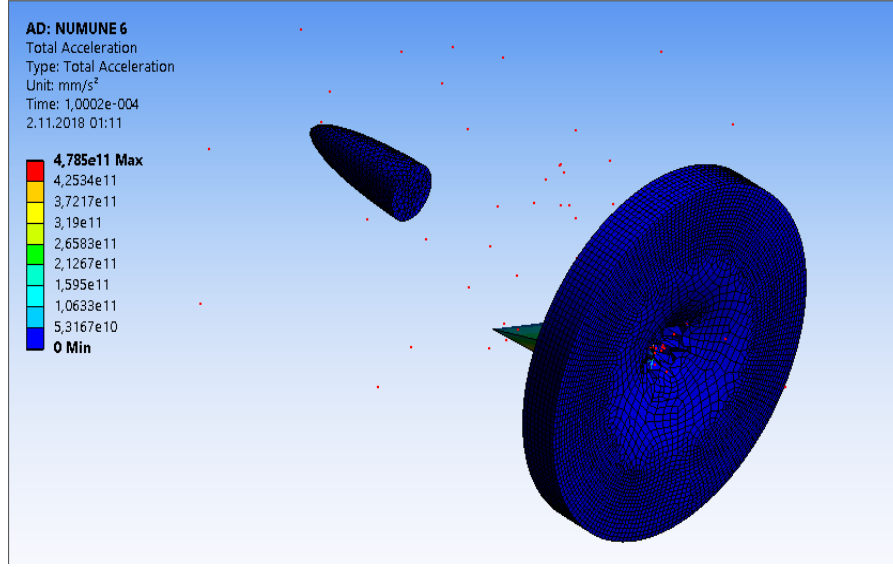
Şekil 6.52. Mermiye ait yavaşlama grafiği

Şekil 6.52'deki ivme-zaman grafiği incelendiğinde Numune 4'te olduğu gibi merminin çarpma anından itibaren yavaşlamaya başladığı, hedefin içerisinde ilerlerken bu yavaşlamanın artan yönde ilerlediği dolayısıyla grafiğin pozitif yönde geliştiği görülmektedir. Ancak Numune 4'ten farklı olarak, yavaşlamanın bir noktadan sonra azaldığı, burada yapı içerisindeki takviye oranının daha düşük olması sebebiyle, takviye dağılımının daha az homojenlikte olmasının ve yapı içerisindeki kararsızlığın neden olduğu ifade edilebilir. Şekil 6.51'deki gerilme-zaman grafiğine bakıldığında, benzer grafik çizgisinin meydana geldiği görülebilir. Dolayısıyla, Şekil 6.51 ve Şekil 6.52'deki grafikler birlikte değerlendirildiğinde, merminin hedefe çarptığı andan itibaren lineer bir hızda hareket edememiş olduğu sonucuna varılabilir.

(Numune-6) Hedef – Mermi

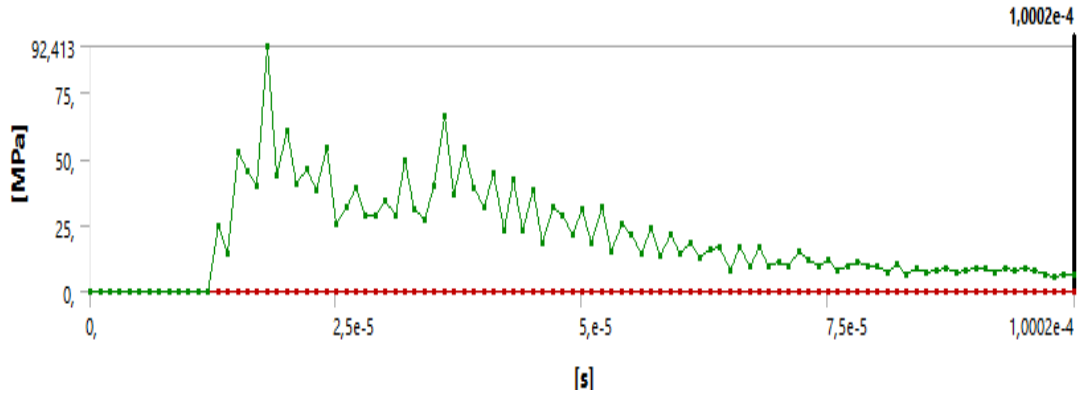


Şekil 6.53. %10 B₄C + %90 Al7075 (Hedef) – Mermi Etkileşimi



Şekil 6.54. Merminin hedefi tam penetrasyonu

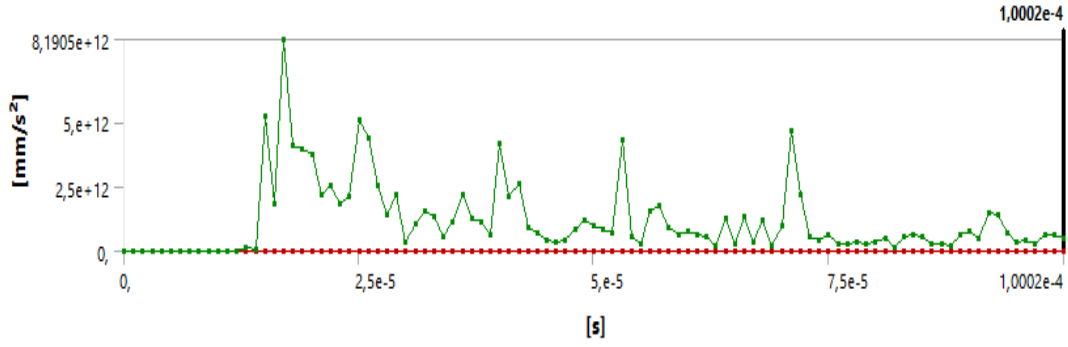
Mermi hedefi tam penetrasyona uğratmış olup delip geçmiştir. %10 B₄C katkısı balistik başarımlar için etkili olmamıştır.



Şekil 6.55. %10 B₄C + %90 Al7075 Hedefe ait gerilme-zaman grafiği

Şekil 6.55'deki gerilme - zaman grafiği incelendiğinde merminin hedefe çarptığı anda gerilme değerinin arttığı, çarptıktan sonra hedefi delip geçene kadar gerilmelerin giderek azaldığı görülmektedir. Merminin hedeften çıktığı anda ise gerilmenin en alt

değere yaklaştığı görülmektedir. %10 B₄C katkılı bu numunede, 3 Numaralı (%10SiC katkılı) hedeften farklı olarak, mermi hedefe çarptığı ilk anda gerilmenin en üst değere çıkmıştır. Malzemenin içerisinde bulunan çok sert fazdaki B₄C parçacıkları, çarpmanın ilk anında enerjinin büyük bir kısmının absorbre edilmesine katkı sağlamıştır.



Şekil 6.56. Mermiye ait yavaşlama grafiği

Şekil 6.56'daki ivme-zaman grafiği incelendiğinde Hedef 3'e ait yavaşlama grafiğine benzer şekilde, merminin çarpma anından itibaren yavaşlamaya başladığı, hedefin içerisinde ilerlerken bu yavaşlamanın azalan yönde ilerlediği ve hedef tamamen delindiğinde mermideki yavaşlanma ivmesinin de sıfıra yaklaştığı görülmektedir. Ancak, merminin kompozit malzeme içerisinden geçerken ani hız değişimleri olduğu ifade edilebilir.

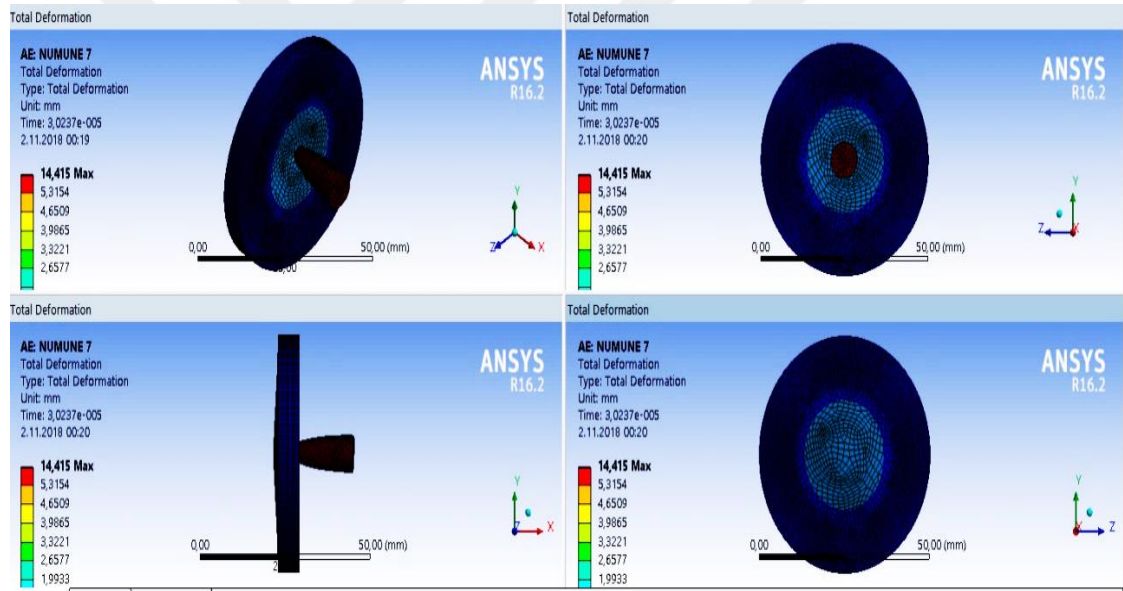
Bu duruma, kompozit yapı içerisindeki %10 B₄C takviye parçacıklarının düzensiz dağılması sebebiyle, mermi hızına etki ederek ivme değerlerinde dalgalanmalara neden olduğu değerlendirilmektedir. Bu tür kompozit yapılar içerisindeki takviye parçacıklarının homojen olamayan dağılımı, mekanik özelliklerde olduğu gibi, kompozitlerin balistik davranışlarında da kararsız durumlara sebep olabilmektedir.

Numune 1, 2, 3, 4, 5 ve 6'dan sonra yapılan balistik analizlerde Numune 7, 8 ve 9 incelenmiştir. 7, 8 ve 9 nolu kompozit numunelerdeki takviye oranları SiC ve B₄C eşit

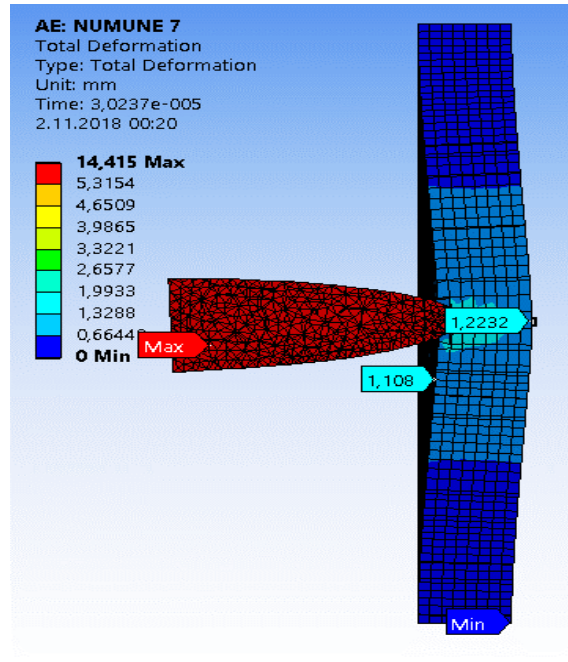
oranlarda karıştırılarak, önceki numunelerde olduğu gibi %40, %20 ve %10 değerlerindedir.

Yapılan analizlerde, SiC + B₄C karışık takviyeli kompozit numuneler, 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 numaralı kompozit numunelerden çok farklı balistik davranışlar göstermemiştir. Bu durum dikkate alınarak Numune 7, 8 ve 9 için yapılan balistik analizlerin altında verilen “gerilme- zaman” grafikleri ve mermiye ait “yavaşlama grafikleri” için yorum ve açıklama yapılmamıştır.

Numune-7 (Hedef) – Mermi

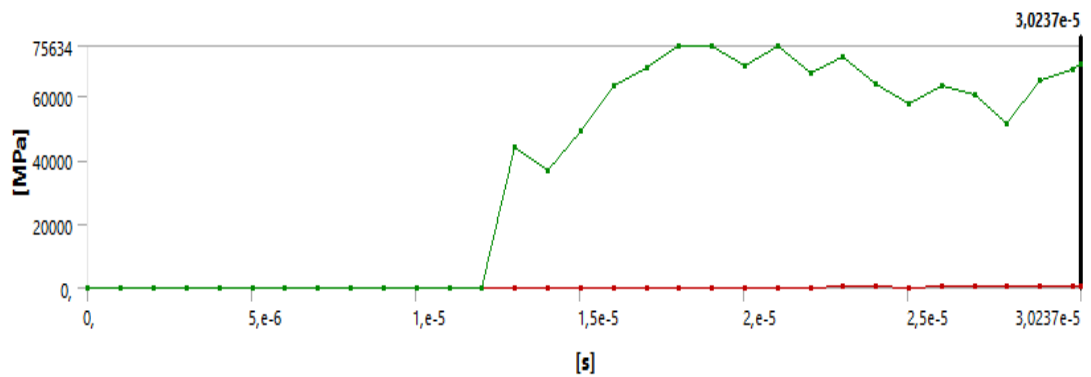


Şekil 6.57. %20 SiC + %20 B₄C + %60 Al7075 (Hedef) – Mermi Etkileşimi

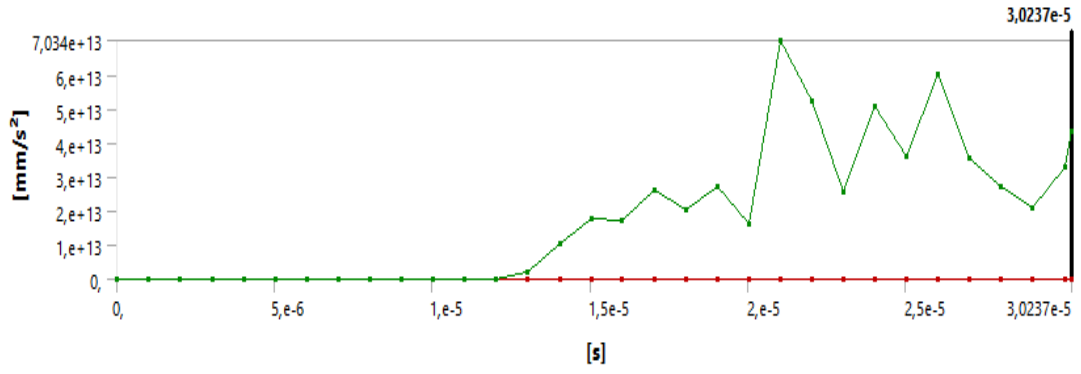


Şekil 6.58. %20SiC + %20 B₄C + %60 Al7075 (Hedef) –Mermi Batma Derinliği

Deformasyonlar incelendiğinde mermi hedefe hasar vermiş ancak penetrasyon gerçekleşmemiştir. Hedefin çarpma bölgesi ve yakın bölgelerde kırılmalar ve katlanmalar görülmüş ayrıca mermi de az miktarda hasar almıştır. Mermi hedefe yaklaşık 1,25 mm batmıştır.

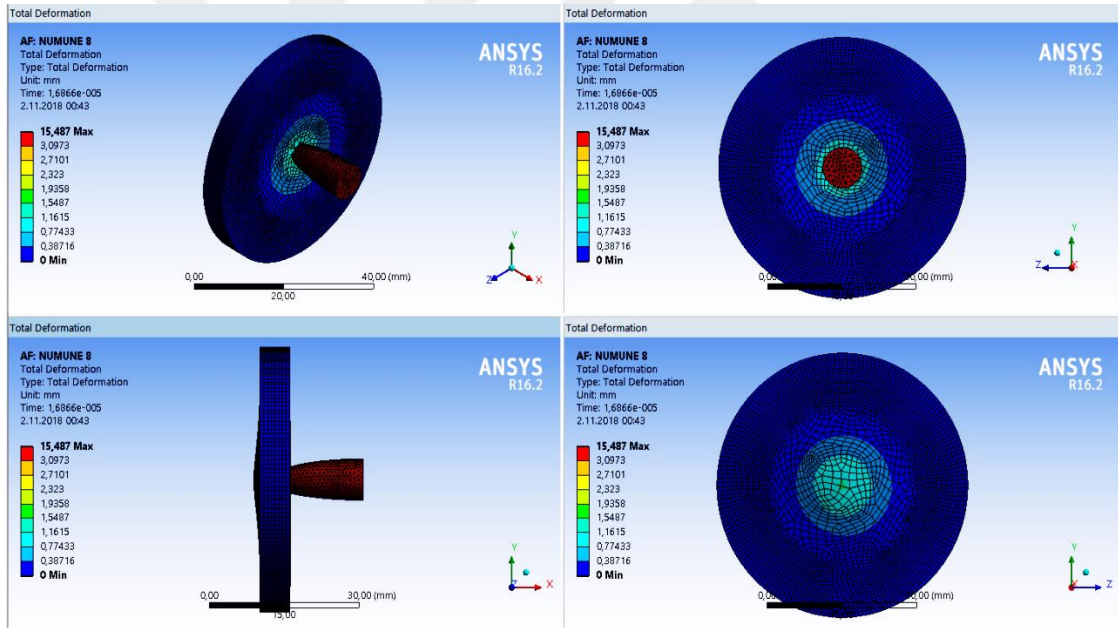


Şekil 6.59. %20SiC + %20 B₄C + %60 Al7075 Hedefe ait gerilme- zaman grafiği

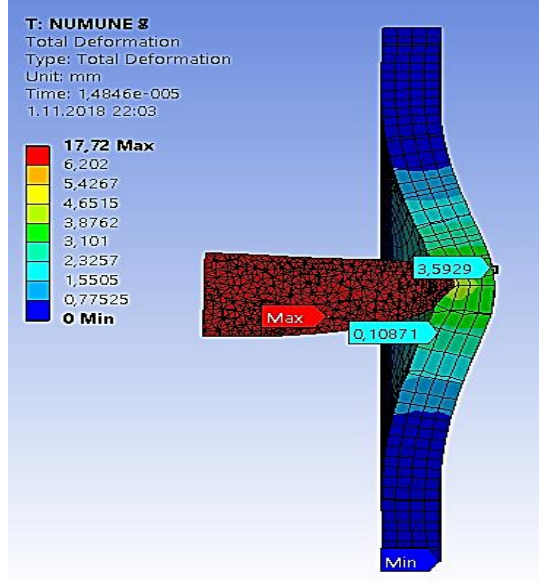


Şekil 6.60. Mermiye ait yavaşlama grafiği

Numune-8(Hedef) – Mermi

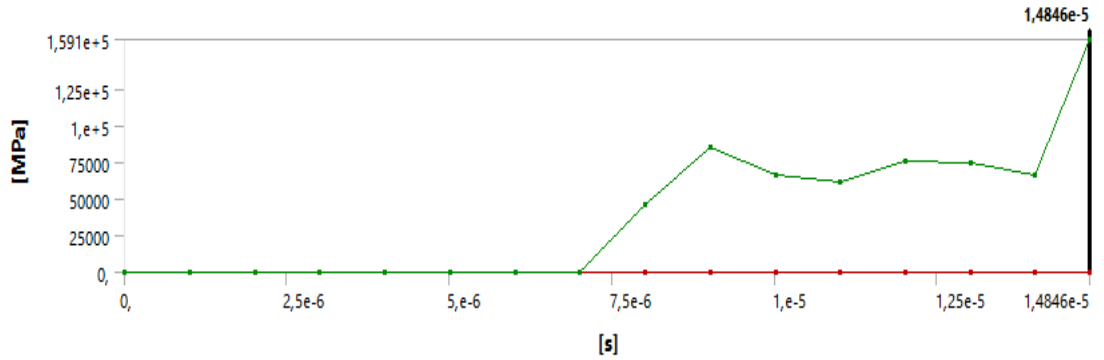


Şekil 6.61. %10SiC + %10 B₄C + %80 Al7075 (Hedef) – Mermi Etkileşimi

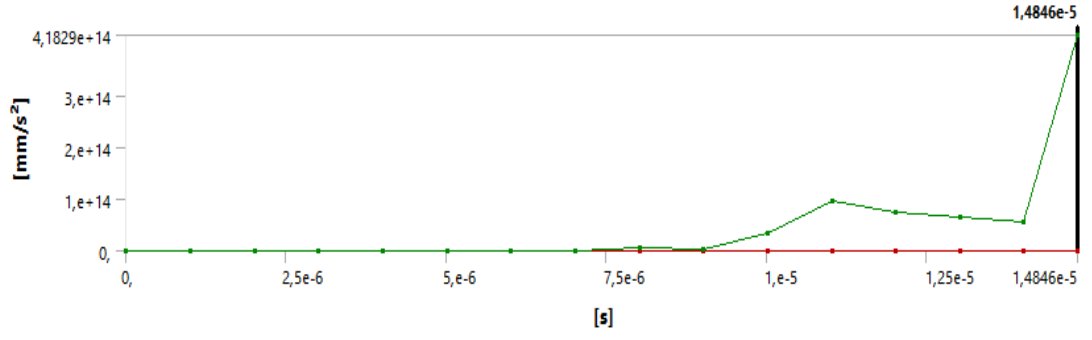


Şekil 6.62. %10SiC + %10 B₄C + %80 Al7075 (Hedef) – Mermi Batma Derinliği

Deformasyonlar incelendiğinde hedef merminin tam penetrasyonunu engellemiş bununla birlikte yaklaşık 3,6 mm civarında bir batma derinliği oluşmuştur. %10 SiC + %10 B₄C katkıları Al7075 malzemede balistik başarımı sağlamıştır. Bununla birlikte tek başına %20 SiC ve %20 B₄C takviyeleri ile karşılaştırıldığında takviyelerin beraber balistik etkisi %20 oranlarında tek başlarına olan etkilerinden daha kötüdür.

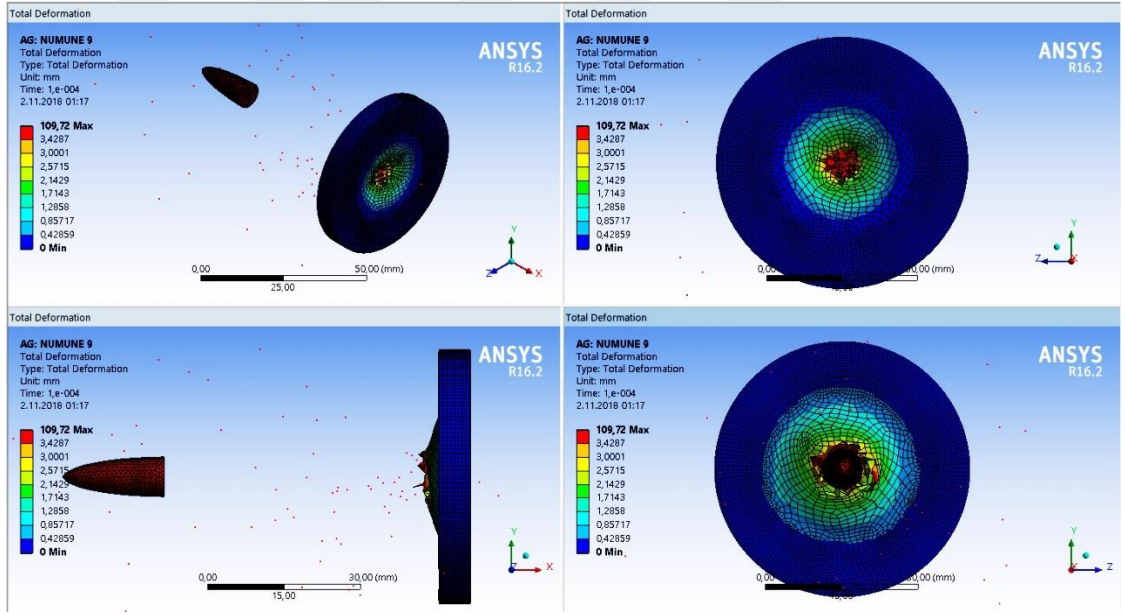


Şekil 6.63. %10SiC + %10 B₄C + %80 Al7075 Hedefe ait gerilme- zaman grafiği

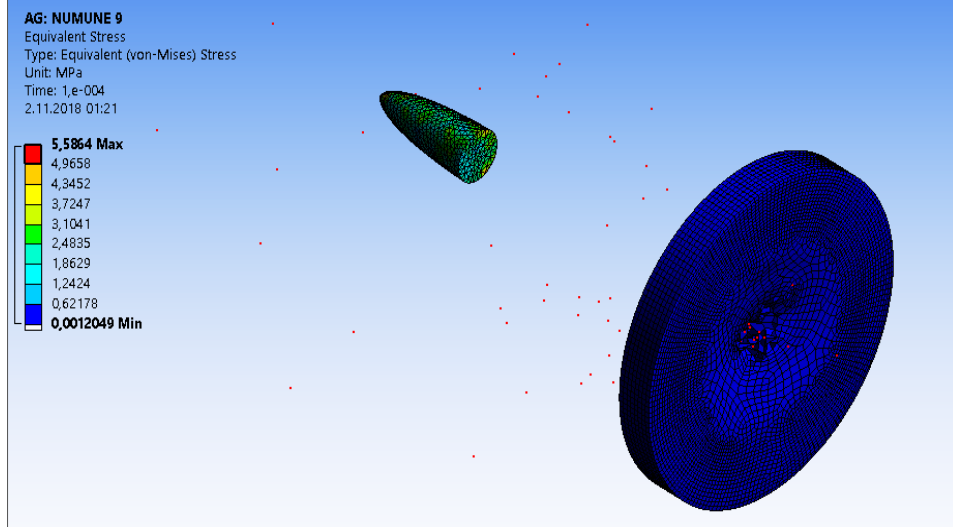


Şekil 6.64. Mermiye ait yavaşlama grafiği

Numune-9 (Hedef) – Mermi

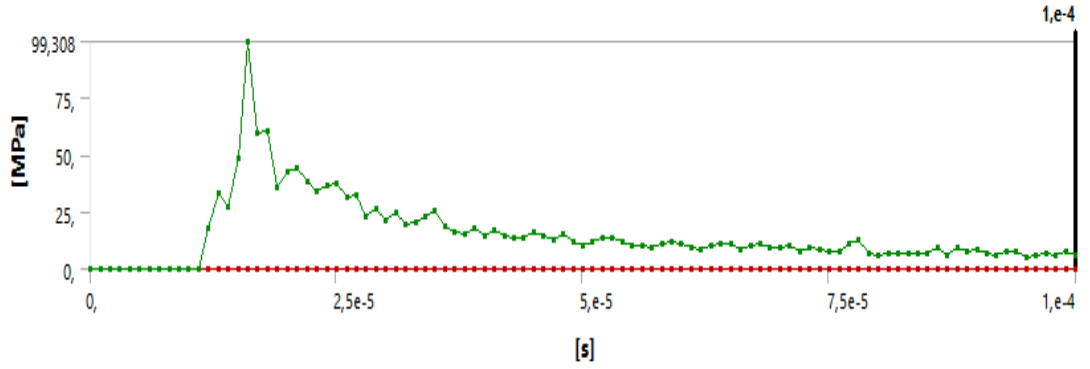


Şekil 6.65. %5 SiC + %5 B₄C + %90 Al7075 (Hedef) – Mermi Etkileşimi

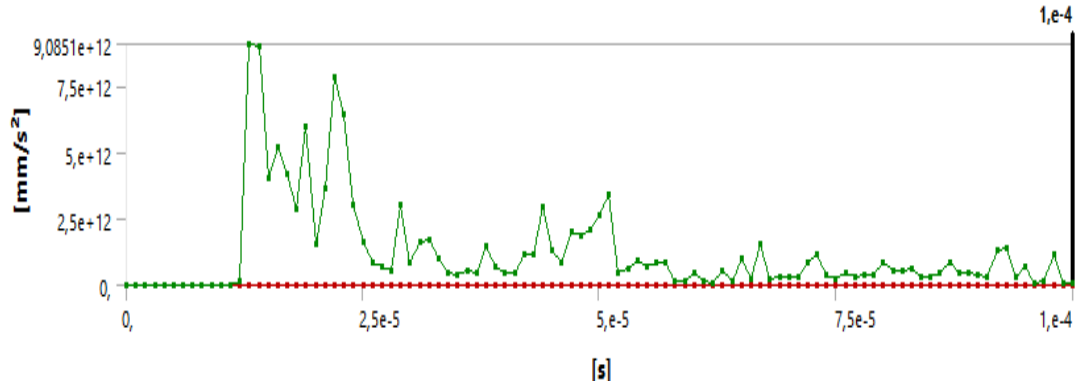


Şekil 6.66. Merminin Hedefi Tam Penetrasyonu

Mermi hedefi tam penetrasyona uğratmış olup delip geçmiştir. %5 SiC + %5 B₄C katkısı balistik başarımlar için etkili olmamıştır.



Şekil 6.67. %5SiC + %5 B₄C + %90 Al7075 Hedefe ait gerilme- zaman grafiği



Şekil 6.68. Mermiye ait yavaşlama grafiği

Yapılan balistik analizlere bakıldığında B_4C ve SiC takviyelerinin yapının sertlik, elastisite modülü gibi mekanik özelliklerini iyileştirdiği bunun sonucu olarak artan takviye oranlarında hedeflerin balistik başarımlarının arttığı görülmüştür. Kompozitlerin üretim şartları dikkate alındığında analizlerde %40 takviye oranlarında başarımlar sağlanmasına rağmen bu oranda takviyelerde homojen dağılım elde edilemediği ve neticesinde istenilen özelliklerde kompozit üretimi yapılamadığı için deneysel çalışmamızda da görüldüğü üzere %20 takviye oranları balistik başarımlar ve üretilebilirlik bakımından en iyi sonuçları vermektedir. Bu takviye oranında özellikle B_4C takviyeli kompozit yapı hem toz metalürjisi ile üretim hem de balistik başarımlar için zırh malzemesi olarak kullanılabilir.

Heriki takviye malzemesinin birlikte kullanıldığı kompozit numunelerde ise çok farklı sonuçlar çıkmamıştır. Kompozit malzemelerin balistik davranışlarındaki ana etken, ağırlıkça katılan % takviye oranları olmuştur. Karışık takviyeli kompozit numunelerdede, %10 B_4C + %10 SiC , toplamda %20 takviyeli kompozit numune üretilebilirlik ve balistik dayanım olarak optimum orana sahip numune olarak kabul edilebilir.

7.SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Toz metalurjisi yöntemi kullanılarak elde edilen kompozit numunelerde homojen bir takviye dağılımı elde edilmiştir. Takviye oranının artışına bağlı olarak homojenlikte artış gözlenmiştir. Ancak yoğunluk değerleri azalmıştır.
2. 700 MPa presleme basıncı yeterli olmakla birlikte ileride yapılacak çalışmalarda 750 ve 800 MPa basınçlar denenebilir.
3. Kompozit yapı içerisinde takviye miktarının artmasıyla sertlik değerleride artış göstermiştir. Ancak sinterleme süresinin artmasıyla sertlik değerleri ve aşınma direnci azalmıştır. En yüksek aşınma miktarı %40 B₄C takviyeli 150 dakika sinterlenen numunede elde edilmiştir.
4. Takviye oranlarının yükselmesi ve sinterleme sürelerinin artışı, kompozitlerin aşınma davranışlarını olumsuz etkilemiştir. Bu çalışma için düşük takviye oranlarında 550 °C olan sinterleme sıcaklığı yeterli olsa da sıcaklık artırılarak sinterleme süresi azaltılabilir.
5. SiC ve B₄C takviye oranlarının artması kompozitlerin kırılma dayanımını azaltmıştır. Ancak, kompozit numuneler kendi içinde değerlendirildiğinde, sinterleme süresinin artması kırılma dayanımını arttırmıştır.
6. Takviye cinsi ve takviye oranı birlikte değerlendirildiğinde en düşük aşınma değeri %20B₄C takviyeli kompozit numunede elde edilmiştir.
7. Bu tür kompozitler için %40 SiC ve B₄C oranları kompozit yapı içerisinde yüksek kalmıştır. Matris ve takviye fazları arasında istenilen bağ yeterince oluşamamıştır.

8. SiC parçacıkları, B₄C parçacıklarına göre daha iyi ıslanma özelliği göstermiş ve Al7075 matris malzemesiyle daha güçlü bağ yapmıştır.
9. Çalışmada takviye parçacıkları ve matris arasında oluşan arayüzeyi iyileştirme amacıyla herhangi bir işlem yapılmadığından kompozit üretme çalışmalarında topaklanmalar oluştuğu ve homojen karışımın sağlanamadığı belirlenmiştir.
10. Sonlu elemanlar yöntemiyle ANSYS / Explicit Dynamics (Student version) programı başarılı bir şekilde kullanılarak balistik çarpma analizleri yapılmıştır.
11. Balistik analizler sonucunda; %20 takviye oranlarında balistik başarımlar elde edilmiştir. Özellikle bu takviye oranında B₄C hem üretilebilirlik hem de balistik özellikleri dolayısıyla en iyi sonucu vermiştir.
12. %40 takviye oranlarında balistik başarımların gözlenmesine karşın çalışmamızda bu oranlarda kompozit üretiminde iyi sonuç alınamadığından, balistik başarımlar faktörü ve üretilebilirlik birlikte düşünüldüğünde bu oran tercih edilmemelidir.
13. %10 takviye oranları kompozitlerde balistik başarımlar sağlayamamıştır.
14. Yapılan balistik analizlerde, heriki takviye elemanının birlikte kullanıldığı 7, 8 ve 9 numaralı kompozit numuneler, aynı oranda tek takviye elemanının kullanıldığı numuneler ile çok yakın özellikte sonuçlar sergilemiştir.

Dolayısıyla bu şekilde yapılan karışım kompozit yapıların, ne pozitif ne de negatif yönde sonuçları etkilemediği değerlendirilmektedir.

Ulaşılan sonuçlar ışığında sonraki çalışmalar için şu önerilerde bulunulabilir:

1. B₄C, SiC takviye malzemelerinin ergime sıcaklıkları göz önüne alındığında çalışmada uygulanan 550 °C sinterleme sıcaklığının yüksek takviye oranlarında takviye malzemeler ve matris malzemesinin homojen şekilde bağkurabilmeleri için yeterli olmadığı görülmektedir. %40 gibi yüksek takviye oranlarında üretilecek kompozit

yapılar için ergime sıcaklıkları dikkate alınarak toz metalürjisinden ziyade sıvı hal işlemleri tercih edilmelidir.

2. Özellikle yüksek takviye oranlarında B_4C , SiC takviye malzemelerine ısıt işlemler uygulanıp yapı üzerinde reaksiyon ürünleri oluşturup matris malzemesi ile daha iyi bağ kurmaları ve matris tarafından ıslatılabilirlikleri artırılmalıdır.
3. Tozlar soğuk presleme yerine sıcak preslenerek daha kompakt hale getirilebilir veya sinterleme işleminden sonra bir kez daha preslenebilir.
4. B_4C , SiC gibi seramik esaslı takviye malzemeleri kullanılacaksa, takviye oranları daha düşük değerlerde seçilebilir.
5. Çalışmada kompozit numune üretimi yapıp sertlik, aşınma gibi mekaniksel özellikler incelenmiş ancak balistik incelemeler gerçek hedef ve mermilerle deneysel olarak yapılamamış olup sayısal modelleme yolu ile mermi ve hedef numuneler modellenerek analiz edilmiştir. İlerleyen çalışmalarda deneysel balistik çalışmalar yapılarak sayısal modelleme analizleri ve aşınma, sertlik gibi mekaniksel deneyler ile sonuçlar karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Ayhan O., Ali Kaya G., Uğur Ç., Al Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretimi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi (4) 8-13, 2007
- [2] Cihad N., Alüminyum matrisli B₄C parçacık takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Konya, 2013
- [3] Harun A., Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen AA7075 alüminyum alaşımına Ti ve B₄C ilavesinin aşınma davranışı üzerine etkisinin incelenmesi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Karabük, 2014
- [4] Mustafa G., Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş Al-Si/SiCp kompozitlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 2009
- [5] Yumak, N. Pekbey, Y. Aslantaş K., Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 10(4), 1-21, 2014
- [6] Savio, S.G. Ramanjaneyulu, K. Madhu, V. Bhat, T.B. An experimental study on ballistic performance of boron carbide tiles, International Journal of Impact Engineering, 38, 535-541, 2011
- [7] Hakan G., Bülent B., AA 2014 Alaşımında Presleme ve Sinterlemenin Gözenek Morfolojisi ve Mikroyapısal Özelliklere Etkileri, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part: C, Tasarım Ve Teknoloji GU J Sci Part: C, 1(1):1-8, 2013
- [8] Hasan H., Ferhat G., B₄C / Al Kompozitlerin Takviye Hacim Oranına Bağlı Olarak Abrasif Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, SDU International Technologic Science 2(1), 15-21, 2010

- [9] Rahamian, M., Parvin, N. ve Ehsani, N., Investigation of Particle Size and Amount of Alumina on Microstructure and Mechanical Properties of Al Matrix Composite Made by Powder Metallurgy, Materials Science and Engineering, 527(4-5), 1031-1038, 2010
- [10] Topçu, I., Gülsoy, H.O., Kadioğlu, N., Güllüoğlu, A.N., Processing and Mechanical Properties of B₄C Reinforced Al Matrix Composites, Journal of Alloys and Compounds, 482(1-2), 516-521, 2009
- [11] Özkan, S., Alüminyum Matrisli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007
- [12] Lillo, T. M., Enhancing Ductility of Al6061 + 10 wt.%B₄C Through Equal-channel Angular Extrusion Processing, Materials Science and Engineering, 2005
- [13] Kılıç, E.F., Alüminyum Alaşımlı SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007
- [14] Ayvaz, M., Çetinel, H., Farklı Matris Kompozisyonları ve Takviye Oranları İçin Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Karakterizasyonu, C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi 10(1), 45-53, 2014
- [15] Gomez, L., Busquets-Mataix, D., Amigo, V., Salvador, M.D., Analysis of boron carbide aluminium matrix composites, Journal of Composite Materials, 43, 987-995, 2009
- [16] Uthayakumar, M., Aravindan, S., Rajkumar, K., Wear performance of Al-SiC-B₄C hybrid composites under dry sliding conditions. Materials and Design, 47, 456-464, 2013

- [17] Lim, C.Y.H., Lim, S.C., Gupta, M., Wear behaviour of SiCp-reinforced magnesium matrix composites, *Wear*, 255, 629-637, 2003
- [18] Tang, F., Wu, X., Ge, S., Ye, J., Zhu, H., Hagiwara, M. and Schoenung, J.M., Dry Sliding Friction and Wear Properties of B₄C Particulate Reinforced Al-5083 Matrix Composites, *Wear*, 264, 555-561, 2008
- [19] Rao, R.N., Das, S., Effect of SiC content and sliding speed on the wear behaviour of aluminium matrix composites. *Mater Des* 2011, 32, 1066–1071, 2011
- [20] Jena, P.K., Mishra, B., Kumar, K.S., Bhat, T.B., An experimental study on the ballistic behavior of some metallic armour materials against 7.62mm deformable projectile, *Materials and Design*, 31, 3308-3316, 2010
- [21] Wan, D.T., Hu, C.F., Bao, Y.W., Zhou Y.C., Effect of SiC particles on the friction and wear behavior of Ti₃Si(Al)C₂-based composites, *Wear*, 262, 826–832, 2007
- [22] Tjong, S.C., Lau, K.C., Abrasive wear behaviour of TiB₂ particle-reinforced copper matrix composites, *Materials Science and Engineering A*, 282, 183- 186, 2000
- [23] Zhang, J. Liu, L. Zhai, P. Fu, Z. ve Zhang, Q., Effect of Fabrication Process on the Microstructure and Dynamic Compressive Properties of SiCp/Al Composites Fabricated by Spark Plasma Sintering, *Materials Letters*, 62(3), 443- 446, 2008
- [24] Zhu, H., Wang, H., Ge, L., Wear properties of the composites fabricated by exothermic dispersion reaction synthesis in an Al–TiO₂–B₂O₃ system, *Wear*, 264, 967-972, 2008
- [25] Mondal, D.P., Das, S., Jha, A.K., Yegneswaran, A.H., Abrasive wear of Al alloy-Al₂O₃ particle composite: a study on the combined effect of load and size of abrasive, *Wear*, 223, 131-138, 1998

- [26] R. L. Deuis, C. Subramanian, J. M. Yellup, Abrasive wear of aluminium composites-a review, *Wear*, 201, 132-144, 1996
- [27] Acılar, M., Gül, F. Effect of the applied load, sliding distance and oxidation on the dry sliding wear behaviour of Al-10Si/SiC_p composites produced by vacuum infiltration technique, *Materials and Design*, 25, 209-217, 2004
- [28] Fu, H.-H. Han, K.-S., Song, J.-I. Wear properties of Saffil/Al, Saffil/Al₂O₃/Al and Saffil/SiC/Al hybrid metal matrix composites, *Wear*, 256, 705-713, 2004
- [29] Şahin, Y., Preparation and some properties of SiC particle reinforced aluminum alloy composites, *Materials and Design*, 24, 671-679, 2003
- [30] Mandal, D., Dutta, B.K., Panigrahi, S.C., Wear and friction behavior of stir cast aluminum-base short steel fiber reinforced composites, *Wear*, 257, 654-664, 2004
- [31] Alpas, A.T., Zhang, J., Effect of microstructure (particulate size and volume fraction) and counterface material on the sliding wear resistance of particulate-reinforced aluminum matrix composites, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 25, 969-983, 1994
- [32] Sawla, S., Das, S., Combined effect of reinforcement and heat treatment on the two body abrasive wear of aluminum alloy and aluminum particle composites, *Wear*, 257, 555-561, 2004
- [33] Kennedy, A. R., Brampton, B., The reactive wetting and incorporation of B₄C particles into molten aluminum, *Scripta Materialia*, 44, 1077-1082, 2001
- [34] Yılmaz, O., Buytoz, S., Abrasive wear of Al₂O₃ – reinforced aluminum – based MMCs, *Composites Science and Technology*, 61, 2381-2392, 2001

- [35] Buytoz, S. ve Eren H., Al Metal Matris Kompozitlerin Abrasiv Aşınma Performansına Takviye Elemanlarının Etkisi, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi 19 (2), 209-216, 2007
- [36] Candan, E., Ahlatçı, H., Çimenoglu, H., Abrasive wear behaviour of Al-SiC composites produced by pressure infiltration technique, Wear, 247, 133-138, 2001
- [37] G. Ben-Dor, A. Dubinsky, T. Elperin, On the Lambert-Jonas approximation for ballistic impact, Mechanics Research Communications, 29, 137-139, 2002
- [38] Sert, M., Seramik bazlı kompozit zırh çözümleri, Zırh Teknolojileri Semineri, MSB Arge ve Tekno. D.Bşk.lığı, Ankara, 243, 2005
- [39] Güden, M., Katmanlı malzemelerde gerilme dalgası geçişinin deneysel ve nümerik yöntemlerle belirlenmesi: Hopkinson basınç bar deneyleri, Zırh Teknolojileri Semineri, MSB ARGE ve Tekno. D.Bşk.lığı, Ankara, 222- 223, 2005
- [40] Demirtaş, H., E., Mermi-Zırh Etkileşiminin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2015
- [41] Evci, C., Seramik Kompozit Zırh Sistemlerinin Darbe ve Balistik Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, 2009
- [42] Gök, K., Kışioğlu, Y., Farklı Malzeme Özelliklerine Sahip Plakaların Darbe Davranışlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir, 2010
- [43] Hazell, P. J., Roberson, C. J., ve Moutinho, M., The design of mosaic armour: The influence of tile size on ballistic performance, Material and Design, 29, 1497-1503, 2008

- [44] Di-qi Hu, Jian-ru Wang, Li-kui Yin, Zhi-gang Chen, Rong-cheng Yi, Cheng-hua Lu, Experimental study on the penetration effect of ceramics composite projectile on ceramic / A3 steel compound targets, Defence Technology, 281-287, 2007
- [45] Rong-cheng Yi, Li-kui Yin, Jian-ru Wang, Zhi-gang Chen, Di-qi Hu Study on the performance of ceramic composite projectile penetrating into ceramic composite target Defence Technology, 13, 295-299, 2017
- [46] Chi, R., Serjouei, A., Sridhar, I., & Tan, G.E.B., Ballistic impact on bi-layer alumina/aluminium armor: A semi-analytical approach, International Journal of Impact Engineering, 52, 37-46, 2013
- [47] Quan, X., Clegg, R. A, Cowler, M. S., Birnbaum, N. K. ve Hayhurst, C. J., Numerical simulation of long rod impacting silicon carbide targets using JH-1 model, International Journal of Impact Engineering, 33, 634-644, 2006
- [48] Özer, İ., Atahan, G., M., Yapıcı, A., Balistik Çarpma Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi, S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Derg., c.1, s.3, Selçuk Üniversitesi, 2013
- [49] Aydın, M., Acar, E., Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakalarda Kalınlık Boyunca Kompozisyonel Değişimin Balistik Performans Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi, Politeknik Dergisi, 2017
- [50] Demircioğlu, K., T., Candan, C., Ay, İ., Organik Matrisli Kompozit Malzeme Kullanılarak Oluşturulan Hibrit Zırh Plakasının Terminal Balistik Özelliklerinin İncelenmesi, I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, 2011
- [51] Krishnan, K., Sockalingam, S., Bansal, S., Rajan, S. D., Numerical Simulation of Ceramic Composite Armor Subjected to Ballistic Impact, Composites Part B: Engineering, 41(8), 583–593, 2010

- [52] Onat,A., Sakarya Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü Metalurji Programı,Kompozit Malzemeler Ders Notu,Sakarya, 2015
- [53] Hiçyılmaz, N., Toz Metalurjisi Yöntemleri ile Elde Edilen Seramik Tanecik Destekli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerinin Aşınma Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Uni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1999
- [54] Özgür, Ş., Topaloğlu, V., Küçükbaş, M., Metal Matrisli Kompozit Malzemeler, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul
- [55] Chawla, N., Chawla, K.K., Metal matrix composites, SpringerScienceBusiness Media, Inc., Boston, 5-101, 2006
- [56] Sarıkan, B., İşlevsel Derecelendirilmiş Bor Karbür Takviyeli AA7075 EsaslıKompozitlerin 7,62 mm'lik Zırh Delici Mermiler Karşısındaki Balistik Özelliklerinin İncelenmesi,Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, 2013
- [57] Eker, A.A., Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri,Yıldız Teknik Üniversitesi,2008
- [58] Pul, M.,Al Matrisli MgO Takviyeli Kompozitlerin İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretilmesi ve İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi, Doktora Tezi,Gazi Üniversitesi, 2010
- [59] TS EN ISO 4498, Sinterlenmiş metal malzemeler (sert metaller hariç) Görünen sertliğin ve mikrosertliğin tayini, Ankara, 2011
- [60] TS EN ISO 6506-1,MetalikMalzemelerBrinell Sertlik Deneyi, Bölüm 1: Deney metodu, Ankara, 2007

- [61] ASTM B312, Transverse Rupture Strength Test Fixture of Metal Powder, ASTM International West Conshohocken, United States, 2008
- [62] ASTM-B 528-05, Standard Test Method for Transverse Rupture Strength of Metal Powder Specimens, ASTM International West Conshohocken, United States, 2008
- [63] Zhang, H., Plastic Deformation and chip Formation Mechanics during Machining of Copper, Aluminium and an Aluminium Matrix Composite, PhD. Thesis, University of Windsor, Canada, 5-106, 2000
- [64] Meydanoğlu, O., Mindivan, H., Kayalı, E. ve Çimenoglu, H., Sıcak Presle Üretilen B_4C Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, 11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, Denizli, 2006
- [65] R. İpek, Adhesive wear behaviour of B_4C and SiC reinforced 4147 Al matrix composites ($Al/B_4C-Al/SiC$), Journal of Materials Processing Technology, 162–163, 71–75, 2005
- [66] L.E.G. Cambroner, E. Sánchez, J.M. Ruiz-Roman, J.M. Ruiz-Prieto, Mechanical characterisation of AA7015 aluminium alloy reinforced with ceramics, Journal of Materials Processing Technology, 143–144, 378–383, 2003
- [67] Kırış, A., Hasarlı Malzemelerin Mikro Elastik Teorilerle Modellenmesi ve Eshelby Tensörleri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2007
- [68] Sanlı, F., Darbe Tesiri Altındaki Kompozit Levhanın Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, 2008