T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİGİ ANABİLİM DALI

DÜŞÜK HIZLI DARBE YÜKLERİ ALTINDA AL/SİC PARTİKÜL TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Hazırlayan
Musa KABURCUK

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Recep EKİCİ

Yüksek Lisans Tezi

Ağustos 2014
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DÜŞÜK HIZLI DARBE YÜKLERİ ALTINDA AL/SİC PARTİKÜL TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Hazırlayan
Musa KABURCUK

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Recep EKİCİ

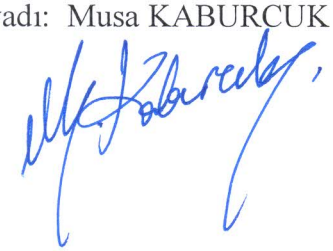
Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FBY-11-3690 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Ağustos 2014
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: Musa KABURCUK

İmza : 

YÖNERGEYE UYGUNLUK

"**Düşük Hızlı Darbe Yükleri Altında Al/SiC Partikül Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi**" adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Musa KABURCUK

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Recep EKİCİ

Makine Mühendisliği ABD Başkanı V.

Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP

Yrd. Doç. Dr. Recep EKİCİ danışmanlığında **Musa KABURCUK** tarafından hazırlanan **"Düşük Hızlı Darbe Yükleri Altında Al/SiC Partikül Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi"** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

05 /08/2014

JÜRİ:

Danışman	: Yrd. Doç. Dr. Recep EKİCİ	.....
Üye	: Prof. Dr. M. Kemal APALAK	.....
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Eyyüp GERÇEKÇİOĞLU	.....

ONAY:
Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 12/08/2014 tarih ve 2014/35-13 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

12/08/2014

Prof. Dr. Kazım KEŞLİOĞLU
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

"Düşük Hızlı Darbe Yükleri Altında Al/SiC Partikül Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi" konulu tez çalışmamın planlanmasından sonuçlandığı ana kadar her aşamada desteğini her zaman yanımda hissettiğim, bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren çok değerli danışman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Recep EKİCİ' ye çok teşekkür ediyorum. Deneysel çalışmalarım sırasında laboratuar imkânlarını bana sunan Doç. Dr. Fehmi Nahir hocama teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca, maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan aileme ve desteklerinden dolayı iş arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Musa KABURCUK

Kayseri, Ağustos 2014

DÜŞÜK HIZLI DARBE YÜKLERİ ALTINDA AL/SİC PARTİKÜL TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Musa KABURCUK
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ağustos 2014
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Recep EKİCİ

ÖZET

Bu çalışmada, Al 6061/SiC partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin (PTMMK) düşük hızlı darbe yükleri altında meaknik davranışları deneysel ve sayısal çalışmalarla incelenmiştir. Darbe hızının, partikül hacim oranının ve partikül boyutunun Al 6061/SiC PTMMK' lerin temas kuvveti, plastik yutulma enerjisi, kalıcı gerilme-plastik şekil değiştirme dağılımları ve merkezi enine yer değiştirmeleri üzerine etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) modelleri, Python programlama dilinde yazılan bir algoritma ile oluşturulmuştur. Bu modellerde, gerçek bir partikül takviyeli kompozit yapı elde etmek için SiC seramik partiküller, Al 6061 matris içerisine rasgele dağıtılmıştır. SEM analizleri, ABAQUS® sonlu elemanlar yazılımında gerçekleştirilmiştir. Düşük hız darbe deneyleri, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Al 6061/SiC PTMMK numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar SEM analizleri ile karşılaştırılmıştır. Darbe hızı, partikül hacim oranı ve boyutunun önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Temas kuvvetleri ve süreleri, darbe hızının artmasıyla önemli ölçüde artmıştır. Düşük darbe hızları için en büyük temas kuvvetleri minimum hatalarla belirlenirken, darbe süreleri biraz daha uzun bir şekilde elde edilmiştir. Partikül hacim oranı artarken kompozit yapının rijitliği artmıştır. Sonuç olarak, temas kuvveti artmış ve darbe süreleri kısalmıştır. Bununla birlikte, partikül boyutunun büyümesi, temas kuvvetlerini azaltmış ve darbe sürelerini arttırmıştır. Partikül takviyeli kompozitler, partikül hacim oranı düşerken ve partikül boyuıtu artarken daha fazla kinetik enerji sönümleyebilmektedirler. Darbe hızının ve partikül hacim oranının artması, kalıcı gerilme seviyelerini ve plastik şekil değiştirmeleri arttırmaktadır. Artan partikül boyutu, düzgün olmayan kalıcı gerilme dağılımlarına neden olurken, plastik deformasyonların da artmasına neden olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Partikül takviyeli metal-matris kompozitler, düşük hızlı darbe, sonlu elemanlar metodu, mikroyapı modellemesi, toz metalurjisi.

INVESTIGATION OF MECHANICAL BEAHVIOURS OF AL/SiC PARTICAL REINFORCED METAL MATRIX COMPOSITE MATERIALS UNDER LOW-VELOCITY IMPACT LOADS

Musa KABURCUK
Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M.Sc. Thesis, August 2014
Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Recep EKİCİ

ABSTRACT

In this study, the mechanical behavior of Al 6061/SiC particle reinforced metal matrix composites (PRMMCs) under low-velocity impact loads was investigated experimentally and theoretically. The effects of impact velocity, particle volume fraction and particle size on the contact force, plastic dissipation histories, residual stress-plastic strain distributions and central transverse deflections of Al 6061/SiC PRMMCs were analyzed in detail. The finite element (FEM) models were generated by a code written in Python programming language. In these models, the SiC ceramic particles were dispersed randomly through Al 6061 matrix in order to obtain a similar structure to a real particle reinforced composite structure as possible. FEM analyses were carried out using ABAQUS® software. Low-velocity impact experiments were carried out using Al 6061/SiC PRMMC specimens which were manufactured by powder metalurgy method and the experimental results were also compared with FEM analyses. The impact velocity, particle volume fraction and particle size exhibited significant effects. The contact forces and durations increased significantly with increasing impact velocity. The predicted and measured peak contact forces were in good agreement for lower impact velocities whereas the predicted impact durations were slightly longer. The composite structures become stiffer when the particle volume fraction is increased. Consequently, the contact force was increased whereas the impact durations were shortened. However, a larger particle size resulted in lower contact forces, but longer impact durations. Particle reinforced composites can dissipate more impact energy in case the particle volume fraction decreases and the particle size increases. Increasing impact velocity and particle volume fraction increased residual stress and plastic strain levels. Increasing the particle size resulted in the residual stress distributions to become non-uniform but increases in the plastic deformations.

Keywords: Particle reinforced metal-matrix composites, low-velocity impact, finite element method, microstructure modelling, powder metallurgy.

İÇİNDEKİLER

DÜŞÜK HIZLI DARBE YÜKLERİ ALTINDA AL/SİC PARTİKÜL TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Sayfa

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI iii
KABUL VE ONAY SAYFASI iv
TEŞEKKÜR v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER viii
TABLOLAR LİSTESİ x
ŞEKİLLER LİSTESİ xi

GİRİŞ 1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. Kompozit Malzemeler 5
1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 5
1.3. Partikül Takviyeli Metal Matrisli Kompozitler 6
1.4. Literatür Araştırması 7

2. BÖLÜM

GEREÇ VE YÖNTEM

2.1. Giriş 11

2.2. Deneysel Çalışmalar 11
2.3. Sayısal Çalışmalar 18

3. BÖLÜM
DENEYSEL VE SAYISAL BULGULAR

3.1. Giriş 24
3.2. Deneysel ve Sayısal Düşük Hızlı Darbe Bulguları 24

4. BÖLÜM
SONUÇLAR ve ÖNERİLER

4.1. Giriş 50
4.2.1. Sonuçlar 51
4.2.2. Öneriler 53

KAYNAKLAR 54
ÖZGEÇMİŞ 58

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Al 6061 matris alaşımın kimyasal bileşimi (Wt. %)..... 12
Tablo 2.2. Al 6061 alaşımının ve SiC partiküllerin mekanik özellikleri [34]..... 19
Tablo 2.3. PTMMK' lerin SEM modellerindeki SiC partikül hacim oranları ve boyutları. 22

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Takviye elemanı tipine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması [15] 6
Şekil 2.1. Turbula T2F toz karıştırıcı mikser 12
Şekil 2.2. PTMMK numunelerin üretiminde kullanılan hidrolik pres 13
Şekil 2.3. Numune üretiminde kullanılan iki parçalı dairesel kalıp 14
Şekil 2.4. Üretilen bazı numunelerin görüntüleri 15
Şekil 2.5. CEAST Fractovis Plus ağırlık düşürme darbe deney cihazı 16
Şekil 2.6. a) Üretilen numunelerin şematik geometrisi ve b) Sıkıştırılmış bir numunenin şematik gösterimi 17
Şekil 2.7. SEM analizlerinde kullanılan eleman tipleri 18
Şekil 2.8 Al 6061 alaşımı (elastik-plastik) ve SiC partiküller (elastik) için gerilme-şekil değiştirme diyagramı 19
Şekil 2.9 Analizlerde kullanılan SEM modeli ve vurucunun geometrisi ve sınır şartları .. 20
Şekil 2.10 $V_f \approx$ %10 partikül hacim oranı için a) P_s = 37 (~35) µm, b) P_s= 102 (~105) µm ve c) P_s= 356 (~350) µm partikül boyutlarında rasgele partikül dağılımına sahip PTMMK SEM modelleri 23
Şekil 3.1. P_s = 37 µm partikül boyutu sahip PTMMK' lerin a) V_f = %10, b) V_f = %20 ve c) V_f = %30 partikül hacim oranları için temas kuvvetleri üzerine darbe hızının (V) etkisi... 26
Şekil 3.2. P_s = 102 µm partikül boyutu sahip PTMMK' lerin a) V_f = %10, b) V_f = %20 ve c) V_f = %30 partikül hacim oranları için temas kuvvetleri üzerine darbe hızının (V) etkisi 27
Şekil 3.3. P_s = 356 µm partikül boyutu sahip PTMMK' lerin a) V_f = %10, b) V_f = %20 ve c) V_f = %30 partikül hacim oranları için temas kuvvetleri üzerine darbe hızının (V) etkisi 28
Şekil 3.4. Sabit darbe hızında (V = 2 m/s) a) P_s = 37 µm, b) P_s = 102 µm ve c) P_s = 356 µm partikül boyutlarına sahip PTMMK' ler için temas kuvvetleri üzerine partikül hacim oranının (V_f) etkisi 30
Şekil 3.5. Sabit darbe hızında (V = 2 m/s) a) V_f = %10, b) V_f = %20 ve c) V_f = %30 partikül hacim oranlarına sahip PTMMK' ler için temas kuvvetleri üzerine partikül boyutlarının (P_s) etkisi 32
Şekil 3.6. Takviyesiz alaşımların (V_f = 0) temas kuvvetleri üzerine darbe hızının etkisi ... 33

Şekil 3.7. a) Takviyesiz alaşımların (V_f =0) ve b) V_f = %10, c) V_f = %20, d) V_f = %30 partikül hacim oranları için P_s = 37 μm sabit partikül boyutuna sahip PTMMK' lerin kinetik enerji ve plastik yutulma enerjisi üzerine darbe hızının etkisi 36

Şekil 3.8. 10.09 J (V = 2 m/s) vurucu enerji seviyesi ve a) P_s = 37 μm, b) P_s = 102 μm ve **c)** P_s = 356 μm partikül boyutları için kinetik enerji ve plastik yutulma enerjileri üzerine hacim oranının (V_f) etkisi 37

Şekil 3.9. 10.09 J (V = 2 m/s) vurucu enerji seviyesi ve a) V_f = %10, b) V_f = %20 ve c) V_f = %30 hacim oranları için partikül boyutunun (P_s) kinetik enerji ve plastik yutulma enerjileri üzerine etkisi..... 38

Şekil 3.10. Takviyesiz bir yapıda darbe sonrası oluşan kalıcı eşdeğer gerilme σ_{eqv} (Pa) ve eş değer plastik şekil değiştirme ε_{eqv} dağılımları üzerine darbe hızının (V) etkisi..... 41

Şekil 3.11. P_s = 37 μm ve V_f = %10 olan PTMMK yapının matrisinde darbe sonrası oluşan kalıcı eşdeğer gerilme σ_{eqv} (Pa) ve eş değer plastik şekil değiştirme ε_{eqv} dağılımları üzerine darbe hızının (V) etkisi 42

Şekil 3.12. P_s = 37 μm ve V_f = %10 olan üç rasgele partikül dağılımına sahip PTMMK yapının matrisinde V=1 m/s sabit darbe hızı için darbe sonrası oluşan kalıcı eşdeğer gerilme σ_{eqv} (Pa) ve eş değer plastik şekil değiştirme ε_{eqv} dağılımları.. 43

Şekil 3.13. V = 3 m/s sabit darbe hızı etkisinde ve P_s = 37 μm olan PTMMK yapının matrisinde darbe sonrası oluşan kalıcı eşdeğer gerilme σ_{eqv} (Pa) ve eş değer plastik şekil değiştirme ε_{eqv} dağılımları üzerine partikül hacim oranının (V_f) etkisi 44

Şekil 3.14. V = 3 m/s sabit darbe hızı etkisinde ve V_f = %30 olan PTMMK yapının matrisinde darbe sonrası oluşan kalıcı eşdeğer gerilme σ_{eqv} (Pa) ve eş değer plastik şekil değiştirme ε_{eqv} dağılımları üzerine partikül boyutunun (P_s) etkisi 46

Şekil 3.15. P_s = 102 μm partikül boyutu ve V_f = %20 partikül hacim oranına sahip olan PTMMK' lerin a) V = 1 m/s, b) V = 2 m/s ve c) V = 3 m/s vurucu hızlarında deforme olmuş darbe bölgeleri altındaki kesitlerinin TEM ve SEM görüntüleri 47

Şekil 3.16. P_s = 37 μm sabit partikül boyutu sahip olan PTMMK' lerin a) V_f = %10, b) V_f = %20 ve c) V_f = %30 hacim oranları için V = 2 m/s sabit vurucu hızında deforme olmuş darbe bölgeleri altındaki kesitlerinin TEM ve SEM görüntüleri..... 48
Şekil 3.17. V_f = %20 sabit partikül hacim oranına sahip olan PTMMK' lerin a) P_s = 37 μm, b) P_s = 102 μm ve c) P_s = 356 μm partikül boyutları için V = 3 m/s sabit vurucu hızında deforme olmuş darbe bölgeleri altındaki kesitlerinin TEM ve SEM görüntüleri..... 49

GİRİŞ

Bütün kompozit malzemeler gibi metal matrisli kompozitler (MMK), tek başlarına sağlayamadıkları özellikleri uygun bir şekilde birbiri içinde dağılarak sağlayan en az iki ayrı kimyasal ve fiziksel fazdan oluşmaktadırlar. Bu iki faz, genellikle fiberli veya partiküllü geometrilerdeki bir takviye faz ve takviye fazın içerisine dağıldığı temel, metalik bir matris fazıdır. Güç iletim hatlarında kullanılan Al_2O_3 (alumina) fiber takviyeli alüminyum matrisli kompozitler, süper iletken mıknatıslarda kullanılan Nb-Ti (Niobyum-Titanyum) filaman takviyeli bakır matrisli kompozitler, kesici takımlarda kullanılan WC/Co (Tungsten karbür/Kobalt) partiküllü kompozitler ve uzaysal, otomotiv, ısıl uygulamalarda kullanılan SiC partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozitler farklı kullanım alanlarına örnek olarak verilebilir [1].

Heterojen yapılı malzeme sınıfında yer alan partikül takviyeli metal matrisli kompozitler (PTMMK) homojen ve izotropik malzeme özelliklerine sahip, düşük maliyetli ve nihai ürünü elde etmek için haddeleme, dövme ve ekstrüzyon gibi geleneksel metal üretim yöntemleri kullanılarak şekillendirilebilmelerinden dolayı yapısal uygulamalar için umut vaat eden malzemeler olmuşlardır. Ayrıca, bu kompozitlerin klasik malzemelere göre daha yüksek özgül modül, arttırılmış aşınma direnci, yorulma direnci, yorulma çatlak eşiği, rijitlik/ağırlık oranı, ısıl iletkenlik ve daha düşük ısıl genleşme katsayısı gibi önemli mekanik ve fiziksel özellikleri taşıdıkları aktarılmaktadır. Bunlara ek olarak sürekli fiber takviyeli eşdeğerlerinden daha düşük üretim maliyetine sahip oldukları ve daha izotropik özellikler sergiledikleri belirtilmektedir [1–10].

Mühendislik uygulamalarında, özellikle de mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek herhangi bir ani ve güçlü darbeye (çok eksenli yüklemeye) karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin en uygun cevabı veya davranışı

göstermesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Bu yüzden birçok test tekniği darbe üretmek için kullanılmaktadır. Bununla birlikte MMK malzemelerin darbe davranışını karakterize etmek için standart bir test tekniği veya farklı ülkeler, kuruluşlar ve araştırmacılar arasında yaygın bir şekilde kabul edilen herhangi bir teknik mevcut değildir. Bu durum, farklı kaynaklardan sonuçların karşılaştırılacağı zaman, MMK malzemelerin darbe cevabı için uygun bir model geliştirme girişimleri için problem yaratmaktadır. Bu olumsuzluklara rağmen MMK malzemelerin darbe dirençlerinin belirlenmesi amacıyla günümüzde kullanılan test yöntemleri genellikle ağırlık düşürme testleri, sarkaç testleri (Charpy ve Izod), hava veya gaz silah testleri (düşük hız veya balistik testler) olmak üzere üç kategoride sınıflandırılabilir [11].

Son yıllarda kompozit malzemelerin düşük hızdaki darbe testlerini karakterize etmek için sarkaç veya ağırlık düşürme darbe test cihazlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş darbe test cihazlarının kullanımı giderek artmaktadır. Ağırlık düşürme test yöntemi, kompozit malzemelerin darbe testleri için tercih edilen yöntem olmaya başlamıştır. Bunun en önemli sebebi daha geniş bir alanda test parametrelerinin belirlenmesi mümkündür ve sonuçlar çok daha kolay analiz edilebilmektedir. Ağırlık düşürme test yönteminde kullanılan yeni cihazlar yer değiştirmeyi veya ivmelenmeyi ölçmektedirler. Bu sayede yük, yer değiştirme ve ivmelenmenin çarpma anındaki değişimi kaydedilmekte ve bu sonuçlar, darbe yükü-zaman ve darbe enerjisi-zaman değişimlerine dönüştürülebilmektedir. Bunlar sayesinde, en uç noktadaki yük ve absorbe edilen enerji gibi özellikler malzemede meydana gelen kırılma işlemiyle ilişkilendirilebilmektedir [11].

Pratik uygulamalarda mühendislik malzemeleri çoğu kez ani ve çok eksenli yüklemelere maruz kalırlar. Böyle yüklemeler, darbeli yükleme olarak ifade edilir. Bu tarz bir yüklemeye maruz kalabilecek parçaların yalnızca çekme veya sürünme gibi tek eksenli yüklemelerle elde edilen sonuçlara bakılarak yapılacak tasarım ve üretimleri eksik ve hatalı olacaktır. Darbeli yüklemeler genel olarak düşük hızlı ve yüksek hızlı olarak sınıflandırılmalarına rağmen, yapılan çalışmalar bu iki sınıflandırma arasında net bir geçişin elde edilemediğini göstermektedir. Bununla birlikte düşük hızlı ve yüksek hızlı

darbe ile kompozit malzemeye aktarılacak enerji miktarı farklı hasarlara sebep olacağından dolayı, bunların sınıflandırılması büyük bir öneme sahiptir. Bu konuda yapılan çalışmaların bir kısmı düşük hızlı darbeyi, hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1-10 m/sn arasında değişen hızlar olarak belirtmektedir [12,13]. Uygulamada vurma, çarpma ve genel olarak darbe şeklinde karşımıza çıkan düşük hızlı ani yüklemelere basit bir örnek olarak MMK bir malzeme üzerine imalat veya bakım sırasında kaza sonucu bir parçanın düşmesi verilebilir. Her ne kadar darbe türünü belirlemede hız ve enerji miktarları kullanılsa da bazen hasarın türünü de sınıflandırmada önem kazanmaktadır. Düşük hızlı darbeler, çarpışma anında malzeme içyapısında küçük hasarlar ve kalıcı deformasyon oluşumlarına sebep olan darbelerdir. Şayet takviye faz fiberli ise takviye fazda kopmalar görülür ve bunun yanı sıra matris kırılması ve delaminasyon oluşumu söz konusudur. Düşük hızlı darbede, malzemenin içyapısında darbeye karşı cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir ve sonuç olarak daha fazla enerji elastik olarak absorbe edilir. Yüksek hızdaki darbeler ise çarpan cismin kompozit malzemeye tamamen nüfuziyetinin söz konusu olduğu darbe türüdür. Yüksek hızlı darbede çarpan cismin malzeme üzerinde oluşturduğu gerilme dalgası etkisinde malzeme darbeye karşı cevap verebilme zamanına sahip olmaz ve malzemede çarpan cismin nüfuziyeti ile hasar oluşumu gözlenir [11].

Son yıllarda yapısal uygulamalarda giderek daha fazla kullanılan partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin mukavemetlerine temel katkıyı, yapıya partikül ilavesi yapar ve partikülün hacim oranı, boyutu, şekli ve matris içerisindeki dağılımı gibi yapısal özellikleri partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini etkileyen önmeli parametrelerdir. Bu parametreleri kapsayan doğru bir sayısal modelleme yönteminin ortaya konamaması nedeniyle bu kompozitlerin darbe davranışları çok fazla incelenmemiş ve gerçekleştirilen az sayıda deneysel çalışmadan öte gidilememiştir. Malzeme üzerindeki etkilerinin ne olacağı çok fazla incelenmeyen bu yapısal parametrelerin darbeli bir yükleme esnasında doğuracağı sonuçlar gözardı edilerek yapılan tasarımlar hatalı olacaktır. Dolayısıyla, bu konuda var olan bilgi boşluğunun giderilmesi çalışmamızın gerekliliğini ön plana çıkarmaktadır.

Bu tez çalışmasında, düşük hızlı darbe yüklemesi altındaki partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin deformasyon ve dinamik daranışları, MMK'lerin mekanik özellikleri için uygun bir malzeme modeli ortaya konarak ve non-lineer Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanılarak araştırılmıştır. Partikül boyutu, partikül hacim oranı ve darbe hızı gibi parametrelerin PTMMK' lerin darbe davranışları üzerine etkileri zamana bağlı temas kuvveti ve plastik yutulma diyagramları vasıtasıyla incelenmiştir. Aynı zamanda, buradan elde edilen sayısal sonuçlar, ağırlık düşürme darbe deneylerinden elde edilecek deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak oluşturulan sayısal malzeme modelinin tutarlılığı irdelenmiştir. Ayrıca, yapılan sayısal analizler sayesinde deneysel çalışmalarla belirlenemeyen darbe sonrası kalıcı gerilme ve plastik şekil değiştirme dağılımları ve partikül-matris etkileşimleri gibi önemli etkiler üzerinde durulmuştur.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1 Kompozit Malzemeler

Modern mühendislik araçları ve uygulamaları, istenilen bazı mekanik davranışları elde etmek amacıyla özel olarak tasarlanan kompozit malzemelerin kullanımıyla önemli bir şekilde geliştirilmiştir. Kompozit malzemeler, belirgin karakteristikleri ve yaygın uygulama olanaklarından dolayı malzeme mekaniği alanına yeni bir boyut getirmişlerdir. Bu malzemeler, iki veya daha fazla homojen fazın heterojen olarak karıştırılması ile elde edilmektedirler. Kompozit malzemelerde birinci veya temel faz matris olarak isimlendirilir ve genellikle reçine veya hafif bir metaldir (alüminyum, titanyum, vb.). İkinci faz ise bir takviye elemanıdır ve genellikle partikül veya fiber formundadır [14].

Genel olarak kompozit malzemelerin sağladığı en önemli avantajlar, rijitlik, mukavemet ve hafifliğin arttırılmasıdır. Buna ilave olarak üretimlerindeki esneklik, iyi korozyon ve aşınma dirençleri, uzun yorulma ömürleri ve düşük ısı iletkenlikleri ile birçok uygulama alanında klasik malzemelere oranla üstünlük sağlamaktadır [1-3,15].

1.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler bir çok kritere göre sınıflandırılabilmektedir. Malzeme kombinasyonları (metal-organik veya metal-inorganik), takviye fazların karakteristikleri (örneğin sürekli fiber, süreksiz partiküller), fonksiyonları (elektriksel veya yapısal) ve özellikleri göz önüne alınarak kompozit malzemelerin çok değişik

sınıflandırmaları yapılmıştır. Kompozit malzemeler kullanılan matris malzemesine göre üçe ayrılabilirler [1-3,15]:

• Metal matrisli kompozitler

• Polimer matrisli kompozitler

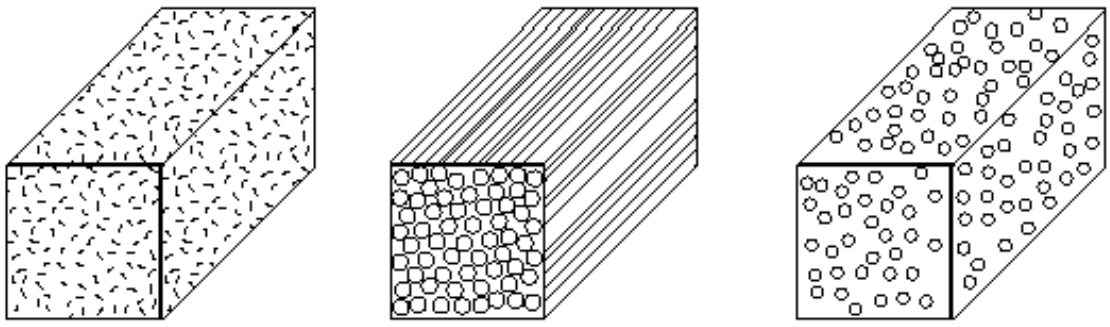
• Seramik matrisli kompozitler

Takviye bileşenlerin şekline göre yapılan bir sınıflandırma işlemi aşağıdaki gibidir:

• Kısa fiber takviyeli kompozitler

• Sürekli fiber takviyeli veya tabakalı kompozitler

• Partikül takviyeli kompozitler



a) Kısa fiber takviyeli **b)** Sürekli fiber takviyeli veya tabakalı **c)** Partikül takviyeli

Şekil 1.1. Takviye elemanı tipine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması [15].

1.3 Partikül Takviyeli Metal Matrisli Kompozitler

Adından da anlaşılacağı üzere bu kompozitlerde takviye elemanı partiküllü yapıdadır. Partiküller şekil olarak kübik, dörtgen veya düzenli ya da düzensiz geometriye sahip olabilirler. Parikül takviyeli metal matrisli kompozitler homojen özelliklere sahiptirler. Uzay, otomotiv ve savunma sanayisinde gibi kritik öneme sahip uygulamlarda kendine özgü avantajlar sağlamasından dolayı, partikül takviyeli metal matris kompozitler (PTMMK) mühendislik malzemeleri arasında önemli bir yere sahiptir. Geleneksel metal

işleme teknikleri ile şekillendirebilmelerinin yanı sıra ham madde maliyetinin düşük olması ve ayrıca yüksek özgül modülleri, rijitlikleri ve mukavemetleri, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, mükemmel aşınma dayanıklılığı ve izotropik özellikleri partikül takviyeli metal matris kompozitleri (PTMMK) performans ve fiyat bakımından hassas uygulamalarda tercih edilebilecek önemli bir aday haline getirmektedir [1-3,5,16-18]. Seramik partiküllerin metalik faza ilave edilmesinin yanı sıra, metalik matris ve seramik partiküllerin arasındaki karşılıklı etkileşimin PTMMK' lerin mukavemetinin artışına ana katkıyı sağlamaktadır. Bununla birlikte, PTMMK' lerin çoğu mekanik özellikleri partikül hacim oranı, partikül boyutu, partikül şekil ve dağılımı gibi takviye seramik partiküllere bağlı parametrelerden etkilenmektedir. PTMMK'ler, birçok alanda kritik önem taşıyan ciddi yapısal uygulamalarda darbe gibi ani dinamik yüklenmelere maruz kalabilirler. Bundan dolayı, darbe yüklenmelerine verilecek tepki de bu malzemeleri çalışma şartlarında güvenle kullanabilme adına oldukça önemli bir tasarım etkenidir [19-21].

Yapılan literatür araştırmasında hem deneysel ve hem de sayısal çalışmalarla çoğu statik tarzdaki mekanik özellikleri oldukça fazla bir şekilde araştırılan partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin darbe dayanımları ile ilgili olarak sınırlı sayıda deneysel çalışmaya raslanmış bunun yanı sıra neredeyse hiç sayısal çalışmaya raslanmamıştır. Bunun en önemli nedenlerinden biri, sayısal analizlerde uygun malzeme modelinin orataya konulamamasıdır. Gerçekleştirilen bu çalışma ve ortaya konulan malzeme modeli ile birlikte literatürde ki bu eksikliğin giderilemesi adına önemli bir ilerlemenin kaydedileceği düşünülmektedir. Yapılan literatür araştırması sonucunda bu kompozitlerin darbe dayanımları hakkında aşağıdaki çalışmaların yapıldığı tespit edilmiştir.

1.4 Literatür Araştırması

Oda sıcaklığında gerçekleştirilen bazı çalışmalarda PTMMK' lerin tokluk ve darbe dayanımları incelenmiştir. Kim ve diğerleri [22], SiC partikülleri ile takviye edilen alüminyum 6061-T6 kompozitlerin kırılma tokluğu üzerine mikro yapısal etmenlerin

rolünü araştırmıştır. Hacim oranının artışı ile birlikte Al 6061-T6/SiC kompozitlerinin kırılma tokluğunun azaldığı sonucuna varmışlardır.

Bhattacharya ve diğerleri [23], Al_2O_3 mikro kürelerinin Al 6061 esaslı Al_2O_3 mikro küre takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Takviyeli parçacıkların yapısının malzemenin davranışını etkilediğini gözlemlemişler ve mikro küre takviyeli kompozitlerin mukavemeti artsa da, takviye partikül mikro kürelerin porozite nedeniyle kırılmayı başlatarak tokluğu ve enerji absorpsiyon kapasitesini düşürtüdüğünü tespit etmişlerdir.

Prewo [24], % 30 SiC partikül ile takviyeli Al-6061 metal matris esaslı kompozitlerin darbe davranışını çentikli ve çentiksiz numunerle bir charpy deney düzeneğinde sarkaç darbe deneyi (çentik darbe deneyi) ile incelemiştir. Al 6061-T6/SiC kompozitlerin takviyesiz 6061 Al-T6 alaşımından daha düşük darbe dayanımı sergilediği ve darbe enerjisinin çentik hassasiyeti gösterdiği ve çentikle 10 kat düştüğü sonuçlarını elde etmiştir.

Hasson ve diğerleri [25], ekstrüzyonla ürettikleri % 20 SiC_w (whisker şekilli) ihtiva eden Al 6061 matrisli kompozitin, darbe dayanımına T6 (çözündürme uygulanmış ve yapay olarak yaşlandırılmış) ısıl işleminin etkisini incelemişler, ayrıca kompozitlerden elde edilen sonuçlarla takviyesiz Al6061 alaşımından elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Al 6061/SiC_w-T6 kompozitin dayanımının Al 6061-T6 alaşımınınkinden daha yüksek olduğu, kompozitin darbe dayanımına ısıl işlemin önemli bir etkisinin olmadığı ve darbe dayanımının alaşımınkinden daha düşük olduğu sonuçlarını bulmuşlardır.

%20 Al_2O_3 ihtiva eden Al 6061 matrisli kompozitin darbe direncine yaşlandırma sürelerinin etkisini araştıran Unsworth ve Bandyopadhyay [26], 175 °C de 4 saat yaşlandırıldıktan sonra kompozitin yaşlandırma sertleşmesi ile kırılgan bir hal aldığını ve bunun darbe dayanımında keskin bir düşüşe sebep olduğunu belirtmişlerdir. Yaşlandırma süresinin artışı ile birlikte matris ve takviye elemanı arayüzeyinde çökelme ile oluşan ve gittikçe artan intermetalik Mg_2Si bileşikleri, %20 Al_2O_3 takviyeli Al6061

matrisli kompozitin sertliğini, dolayısıyla gevrekliğini arttırmaktadır. Böylece içerisinde ihtiva ettiği kırılgan Al_2O_3 partiküllerle zaten kırılgan olan kompozitlerin enerji absobe etme kabiliyetleri daha da düşük bir hale gelmiştir.

Ahlatcı ve diğerleri [27], % 60 SiC partikül ihtiva eden saf Al(% 99.8) kompozitin darbe davranışı üzerine tane boyutunun etkisini araştırmışlar ve SiC tane boyutu arttıkça kompozitin darbe dayanımının düştüğünü ifade etmişlerdir. Ahlatcı *et al.*, bunu partikül boyutunun artışı ile partiküllerdeki kırılma hasarının artmasına bağlamışlardır.

Alüminyum kompozitlerin ihtiva ettiği SiC'ün darbe yüklemesi altında enerji absorbe etme kabiliyetini azalttığını belirten Ellis ve Lewandowski [28], MB-85 Al (Al-Cu-Mg)/SiC partikül takviyeli kompozite takviyesiz Al bir tabaka ilave ederek sünekliğini arttırmışlar ve bu sayede darbe direncini iyileştirmişlerdir.

PTMMK' lerin darbe davranışları üzerine sıcaklığın etkisi konusunda da bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. -196 °C, 24 °C ve 100 °C sıcaklıklarda Al 2024 - %10 Al_2O_3 kompozitin darbe dayanımını araştıran Surappa ve Sivakumar [29], sıcaklık artışıyla birlikte kompozitlerin darbe enerjilerinin düştüğünü ve buna karşın takviyesiz alaşımlarının darbe enerjilerinin arttığı sonucunu bulmuşlardır. Buna sebep olan kırılgan Al_2O_3 partiküllerinin kompozitlerin darbe dayanımını düşürdüğü belirtilmektedir.

Bonollo *et al.* [30], 25 °C den 200 °C' ye değişen bir sıcaklık aralığında Al 2014-T6 + %17 Al_2O_3 ve Al 6061-T6 + %20 Al2O3 kompozitlerin darbe dayanımlarını incelenmişlerdir. Al 2014-T6 + %17 Al_2O_3 ve Al 6061-T6 + %20 Al_2O_3 kompozitlerin darbe dayanımlarının Al2014-T6 ve Al6061-T6 alaşımlarıyla karşılaştırıldığında, en yüksek darbe dayanıma Al6061-T6 alaşımının sahip olması ile birlikte kompozitlerin bünyelerinde ihtiva ettikleri kırılgan partiküllerden dolayı daha düşük, alaşımların ise daha yüksek darbe dayanımı gösterdiklerini ifade etmişlerdir. Bonollo ve diğerleri, ayrıca deney sıcaklığının, genel olarak darbe enerjilerini arttırırken, hasar mekanizmalarına önemli bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.

Ozden ve diğerleri [31], Alüminyum esaslı SiC partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin darbe davranışlarını -176’ dan 300 °C’ ye değişen bir sıcaklık aralığında incelemişlerdir. Çalışmalarında üç farklı alüminyum alaşımı (Al 2124, Al 5083 ve Al 6063), ki bunlardan Al6063’ ün T6 yaşlandırma etkisi de dikkate alımıştır, iki faklı SiC partikül boyutu (157 lm and 511 µm) ve iki farklı ekstrüzyon oranı (13,63:1 and 19,63:1) kullanan Ozden ve diğerleri, kompozit numunelerin takviyesiz alaşımlardan daha düşük darbe dayanımı sergilediklerini ve takviyesiz Al 6063 alaşımının en büyük darbe dayanımına sahip olduğunu belirlemişlerdir. Kompozit yapıların içerdiği partiküllerin üretim yöntemine bağlı olarak kümelenme ve topaklanmalarının bunun en önemli sebeplerinden olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, partikül boyutu ve ekstrüzyon oranı artışının darbe dayanımında artışlara sebep olduğu gözlenmiş, sıcaklık değişiminin darbe dayanımına önemli bir etkisi gözlenmemesine rağmen, bazı takviyesiz alaşımların (Al 2124 and Al 6063) ve bunların kompozitlerinin özellikle 100 °C civarında darbe dayanımında düşüşlere neden olmuştur.

Wang ve diğerleri [32], TiB_2/Al kompozitlerin darbe davranışları üzerine -50’ den 200 °C’ ye değişen aralıktaki sıcaklığın, ısıl işlemin ve takviye elemanının etkilerini incelemişlerdir. Hem ısıl işlemle yapılan yaşlandırmanın neden olduğu çökelmelerin ve hem de TiB_2 takviye fazının matris içerisindeki varlığının darbe tokluğunu düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, oda sıcaklığı ile kıyaslandığında sıfırın altında ve daha yüksek sıcaklıklarda TiB_2/Al kompozitler daha yüksek darbe dirençleri sergilemişlerdir.

2. BÖLÜM

GEREÇ VE YÖNTEM

2.1. Giriş

Bu tez çalışması deneysel ve sayısal çalışmalardan oluşan iki temel aşamada gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar numune üretiminden sonra bu numuneler üzerinde darbe testlerinin gerçekleştirilmesi ile tamamlanmıştır. Sayısal modelleme aşamasında ise PTMMK malzemeler için bir malzeme modeli ortaya konulmuş ve bu modele uygun olarak sonlu elemanlar metodu (SEM) ile oluşturulan kompozit yapıların analizleri gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda numune üretimi, Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bünyesindeki kompozit üretim laboratuvarı imkanlarından faydalanarak PTMMK numunelerin üretimleri toz metalurjisi yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Kompozit yapılarda matris olarak Al 6061 (Alüminyum 6061) alaşımı ve takviye faz olarak SiC (Silisyum Karbür) toz halde kullanılmıştır. Üretilen numuneler üzerinde düşük hızlı darbe testleri yine Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bünyesindeki Mekanik Laboratuvarındaki CEAST Fractovis Plus ağırlık düşürme darbe deney cihazı ile yapılmıştır. Sayısal modelleme ve analizler Sonlu Elemanlar Metodu vasıtasıyla (SEM) ABAQUS FEA® (Finite Element Analysis) [33] yazılımı yardımı ile gerçekleştirilmiştir.

2.2. Deneysel Çalışmalar

Üretimlerde kullanılan Al 6061 matris malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 2.1' de verilmiştir. Al 6061 matris malzemesi ortalama P_s = 10 μm partikül boyutuna sahip iken, SiC partikülleri P_s = 37, 102 ve 356 μm olmak üzere üç farklı ortalama partikül boyutunda üretimde kullanılmıştır. Her boyuttaki SiC partikülleri için üç farklı hacim

Oranında V_f = %10, %20 ve %30 olacak şekilde üretim yapılmıştır. Üretimi yapılacak olan belirli bir boyutta takviye SiC partikül ihtiva edecek numunenin SiC partikül hacim oranı, içerisine katılacak tozların (SiC ve Al 6061) ağırlıkça yüzdelerinin hesaplanmasıyla belirlenmektedir. Daha sonra buradan elde edilecek SiC-Al 6061 toz karışımı Turbula T2F (Şekil 2.1) marka mikserde homojen bir toz karışımı elde etmek amacıyla yaklaşık 20 saat karıştırılmıştır. Bundan başka, karıştırma işlemine tabi tutulmadan PTMMK numunelerle birlikte aynı üretim şartlarında takviyesiz Al 6061 alaşımlarının üretimleri de yapılmıştır. Bu takviyesiz alaşımlar daha sonra gerçekleştirilecek darbe deneylerinde PTMMK numunelerle karşılaştırma amacıyla kullanılmışlardır.

Tablo 2.1. Al 6061 matris alaşımın kimyasal bileşimi (Wt. %).

Malzeme	% Al	% Cu	% Fe	% Mg	% Cr	% Si	% Mn	% Ti	% Zn
Al 6061	Denge	Max. 0,4	Max. 0,7	Max. 1,2	Max. 0,35	Max. 0,8	Max. 0,15	Max. 0,15	Max. 0,25



Şekil 2.1. Turbula T2F toz karıştırıcı mikser.

Karıştırma işleminden sonra numunenin üretiminde kullanılan sistem Şekil 2.2' de görülmektedir. Sistemde üretim esnasında zımbanın, tablanın ve pres'in ısıdan zarar

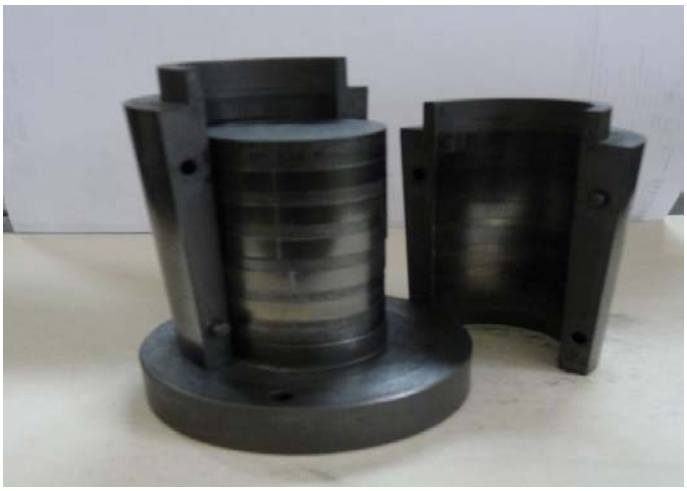
görmemesi için alt kovan, orta kapak ve üst zımba su soğutmalı olarak tasarlanmıştır. Su üst zımba, kapak ve alt tabla içerisinde dolaştıktan sonra tahliye kanallarıyla dışarı atılmaktadır. Üst zımba orta kapak içerisinde hareket edebilmektedir. Zımba, kapakta sızdırmazlığı sağlayan o-ring içerisinden geçer, kapak o-ringin ısıdan zarar görmemesi icin soğutulmaktadır. Ayrıca, üretimin koruyucu gaz atmosferi altında gerçekleşebilmesi için argon gazı fırın içerisine gönderilmektedir. Üretilecek numunelerin içerisinde sinterleneceği kalıp, sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiştir. Kalıp, sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş iki parçalı dairesel bir geometriye sahiptir ve aralarına pullar yerleştirilerek tek seferde beş numune üretebilecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 2.3' de üretimde kullanılan kalıp verilmiştir.



Şekil 2.2. PTMMK numunelerin üretiminde kullanılan hidrolik pres.



a) Dairesel kalıp ve parçaları



b) Üretimden sonra ayrılmış halde bulunan kalıp

Şekil 2.3. Numune üretiminde kullanılan iki parçalı dairesel kalıp.

Toz karıştırma işlemini soğuk presleme işlemi takip etmektedir. Soğuk presleme işleminde, kalıp içerisine her bir numune için toz karışımı döküldükten sonra üzerine pul yerleştirilerek soğuk pres uygulanmaktadır. Bu şekilde toz karışımları kompakt bir form kazanmaktadır. İki parçalı dairesel kalıp (Şekil 2.3) içerisinde aralarına pullar bulunan kompakt toz karışımları, koruyucu argon gazı atmosferinde 615 ºC sıcaklıkta ve 350 MPa basınç altında 30 dakika tek eksenli sinterleme (sıcak presleme) uygulanmak suretiyle bekletilmektedir. Bekletme esnasında, üst zımbadaki eksenel baskı kuvveti küçük zımbaya iletilerek baskı yükü sürekli uygulanmak suretiyle basınç sabit tutulmakta ve boşlukların veya porozitelerin giderilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca,

burada numunelerin kalıplara yapışmaması için numune ve kalıp arasında grafit malzemesi kullanılmaktadır. Tüm bu işlemlerin ardından kalıplar birbirinden ayrılmakta ve üst kalıp içerisindeki 7 mm yüksekliğinde ve 50 mm çapındaki silindirik numuneler çıkartılmaktadır. Üretilen numunelerin görüntüleri Şekil 2.4' de verilmiştir.



Şekil 2.4. Üretilen bazı numunelerin görüntüleri.

Düşük hızlı darbe deneyleri CEAST Fractovis Plus marka ağırlık düşürme darbe deney düzeneğinde gerçekleştirildi (Şekil 2.5). Fractovis Plus yer çekimi esasıyla 0.75-4.6 m/s aralığında darbe hızı ve 0.6-755 J (Joule) aralığında darbe enerjisi oluşturabilen bir deney düzeneğidir. Darbe enerjisi, 2-70 kg aralığında vurucu kütlesi ve 30-1100 mm aralığında düşürme yüksekliği için uygun kombinasyonlar seçilerek cihazın kapasitesi içerisindeki istenilen darbe enejisine ulaşılabilmektedir. Cihaza adapte edilen ikinci bir sistemle darbe enerjisi ve hız seviyeleri sırasıyla 1800 J ve 24 m/s değerlerine ulaşılabilmektedir. Temas kuvveti üst limiti 40 kN olan ve vurucuya bağlanan bir kuvvet sensörü ile ölçülmektedir. Temas kuvveti verisi bir veri toplama sistemi

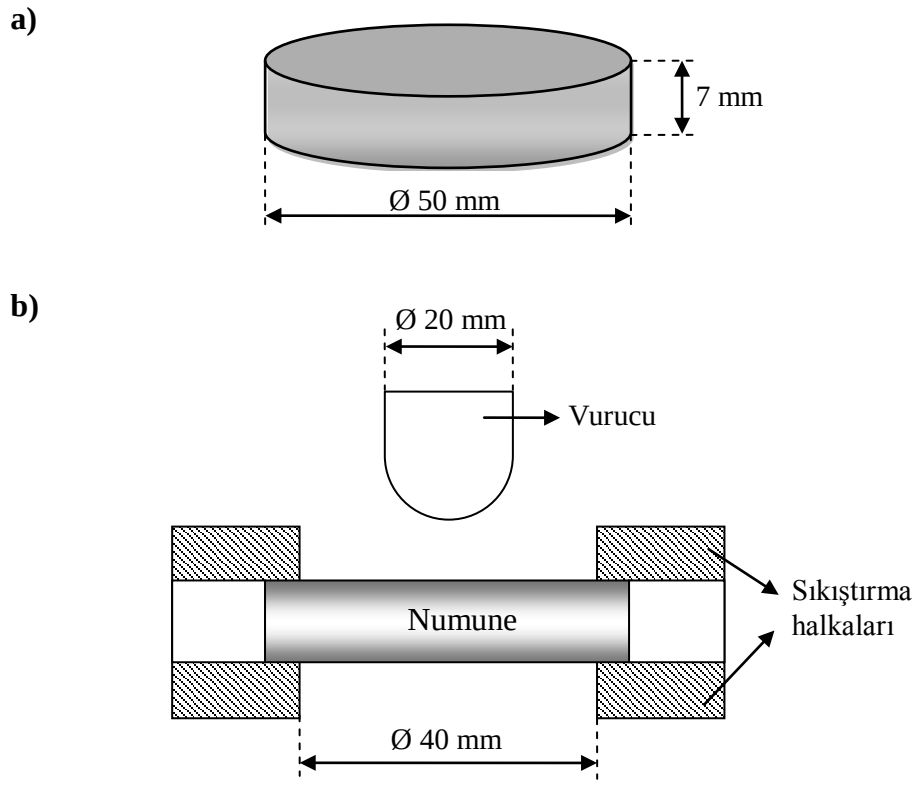
vasıtasıyla kaydedilmektedir (DAS 16000). Ayrıca, vurucunun tekralı darbesini önlemek için anti-rebound sistemi cihazda yer almaktadır.



Şekil 2.5. CEAST Fractovis Plus ağırlık düşürme darbe deney cihazı.

50 mm çapa sahip numuneler, altından ve üstünden iç çapı 40 mm olan iki sıkıştırma halkası vasıtasıyla pnömatik bir sistem kullanılarak sabitlenmektedir (Şekil 2.6). Yarı çapı r = 10 mm ve toplam kütlesi m = 5.045 kg olan yarı küresel bir vurucu, sabitlenen numunenin üst yüzeyinin merkezine düşürülelerek darbe deneyleri yapılmaktadır. Üç farklı partikül boyutunun P_s = 37, 102 ve 356 μm her biri için üç farklı hacim oranında V_f = %10, %20 ve %30 üretilen numunelerin hepsi sırasıyla V = 1, 2 ve 3 m/s vurucu hızlarına kaşlık gelen 2.52, 10.09 ve 22.7 J çarpma enerjilerinde deneylerimiz gerçekleştirilmiştir. Çarpma enerjileri vurucunun düşürülme yüksekliği değiştirilerek ayarlanmıştır. Dolayısıyla, kompozit numuneler için üç partikül boyutu, üç hacim oranı ve üç farklı darbe hızı için deneyler ikişer kez tekrarlanarak 3×3×3×2=54 adet darbe

deneyi, takviyesiz alaşımlar için üç hız değerinde ikişer kez tekrarlanan deneylerle 3×2=6 adet ve toplamda 54 + 6 = 60 deney yapılmıştır.

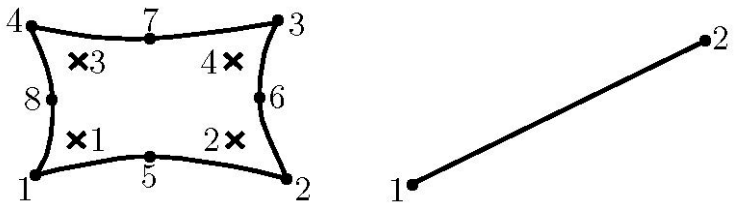


Şekil 2.6. a) Üretilen numunelerin şematik geometrisi ve b) Sıkıştırılmış bir numunenin şematik gösterimi.

Darbe deneylerinden sonra deforme olmuş numunelerin kesitleri Taramalı Elektron Mikroskopu (TEM) kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla numuneler iki parçaya ayrılmış ve TEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) çalışmaları sırasında iyi konumlandırma elde edebilmek için numune kesit yüzey alanları dışarıda olacak şekilde bakalit (soğuyunca katılaşan sıcak preslenmiş akrilik esaslı bir reçine) içerisine alınmıştır. Daha sonra, numunelerin hazırlanması için standart metalografik teknikler uygulanmıştır. Böylece, 1200 gritlik son zımparalama işleminden sonra, nihai yüzeyleri elde etmek amacıyla numuneler 1 μm' lik elmas pasta ile otomatik parlatma cihazı vasıtasıyla parlatılmıştır. Fotoğrafik çalışmalar için Leo 440 TEM cihazı kullanılmıştır.

2.3. Sayısal Çalışmalar

SiC partikül takviyeli Al 6061 esaslı metal matrisli kompozit malzemelerin sayısal modellemesi ve darbe analizleri Lineer Olmayan Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, ABAQUS FEA® Sonlu Elemanlar Analiz programının ABAQUS/Explicit modülü teorik calışmalarda kullanılmıştır. Deneysel sınır şartları mümkün olduğunca uygulanmıştır. Bu amaçla, sonlu elemanlar modellerinin, deneysel çalışmada darbeye maruz yüzeyin net boyutları olan 40 mm çapına ve 7 mm yüksekliğine sahip olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle, bütün teorik analizlerde PTMMK ve takviyesiz yapılar, iki boyutlu aksi-simetrik geometride modellendiklerinden dolayı 20×7 mm boyutlara sahip dikdörtgen geometrili bir alan içerisinde modellenmiştir. PTMMK ve takviyesiz modellerin dikdörtgen alanları, her yönde (kalınlık ve genişlik boyunca) temel olarak yaklaşık 35 μm boyutunda kare mesh elemanlara bölünmüştür. Böylece, sayısal modellerin matris ve partiküllerini ihtiva eden temel modeli, ABAQUSR/Explicit modülünün eleman kütüphanesinde bulunan azaltılmış integrasyonlu sekiz düğüm noktalı biquadratik eksenel-simetrik CAX8R (Sekil 2.7 (a)) elemanları kullanılarak yatay yönde 571 (20×10^{-3}(m)/35×10^{-6}(m)) ve düşey yönde 200 (7×10^{-3}(m)/35×10^{-3}(m)) olmak üzere toplam 114200 (571×200) elemandan oluşmuştur. Aksi-simetrik dairesel bir rijit vurucu 5.045 kg kütleye ve 10 mm yarıçapa sahip olacak şekilde modellenmiştir. Ayrıca, vurucu iki düğüm noktalı lineer RAX2 (Sekil 2.7 (b)) shell elemanları ile meshlenerek 500 elemandan oluşmuştur. Vurucu rijit kabul edildiği için deforme olmadığı farz edilmiştir.



a) CAX8R **b)** RAX2

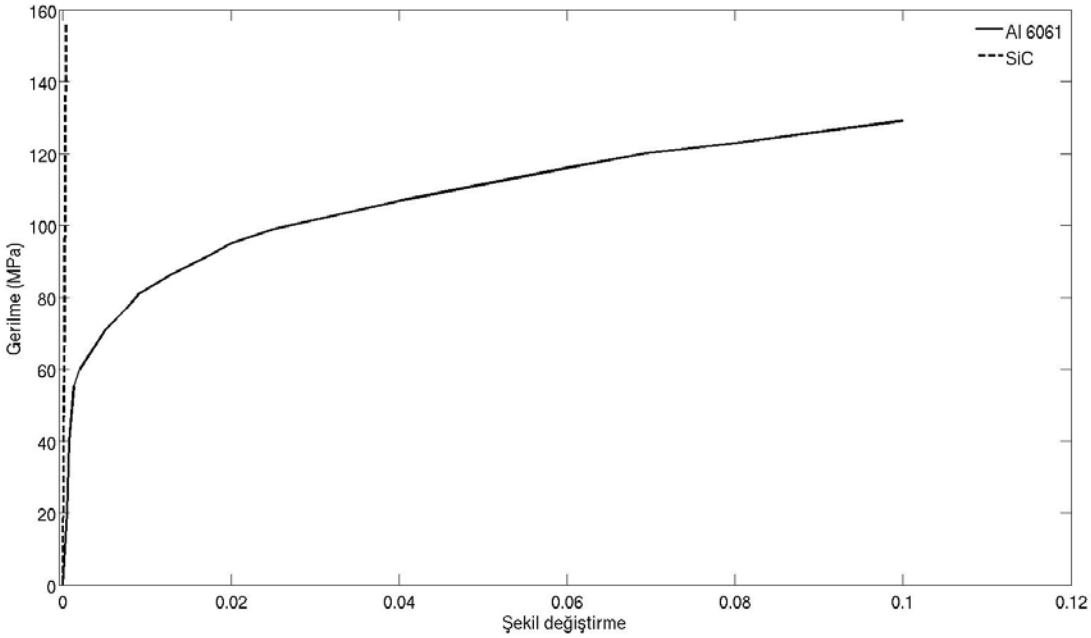
Şekil 2.7. SEM analizlerinde kullanılan eleman tipleri.

Deneysel çalışmalarımızla uyum içerisinde olacak şekilde teorik calışmalarda da matris malzemesi olarak Al 6061 alaşımı ve takviye olarak SiC (Silisyum Karbür) partikülleri kullanılmıştır. Al 6061 alaşımının ve SiC partiküllerin mekanik özelikleri Tablo 2.2' de verilmiştir. Teorik modellemede Al 6061 alaşımı sünek bir elastik-plastik yapıda ve SiC

partiküller izotropik lineer elastik yapıda davranış sergileyecek şekilde modellenmiştir. Sekil 2.8' de Al 6061 alaşımı ve SiC partikülleri için gerilme-şekil değistirme diyagramı verilmiştir. Analizlerde SiC partiküllerin kendilerini çevreleyen Al 6061 matrise kırılma olmaksızın mükemmel bağlandığı kabul edilmiştir. Vurucu yüzeyi ve modellerin üst yüzeyleri arasındaki temas, yüzey yüzeye temas algoritması (surface to surface contact algorithm) uygulanarak sağlanmıştır.

Tablo 2.2. Al 6061 alaşımının ve SiC partiküllerin mekanik özellikleri [34].

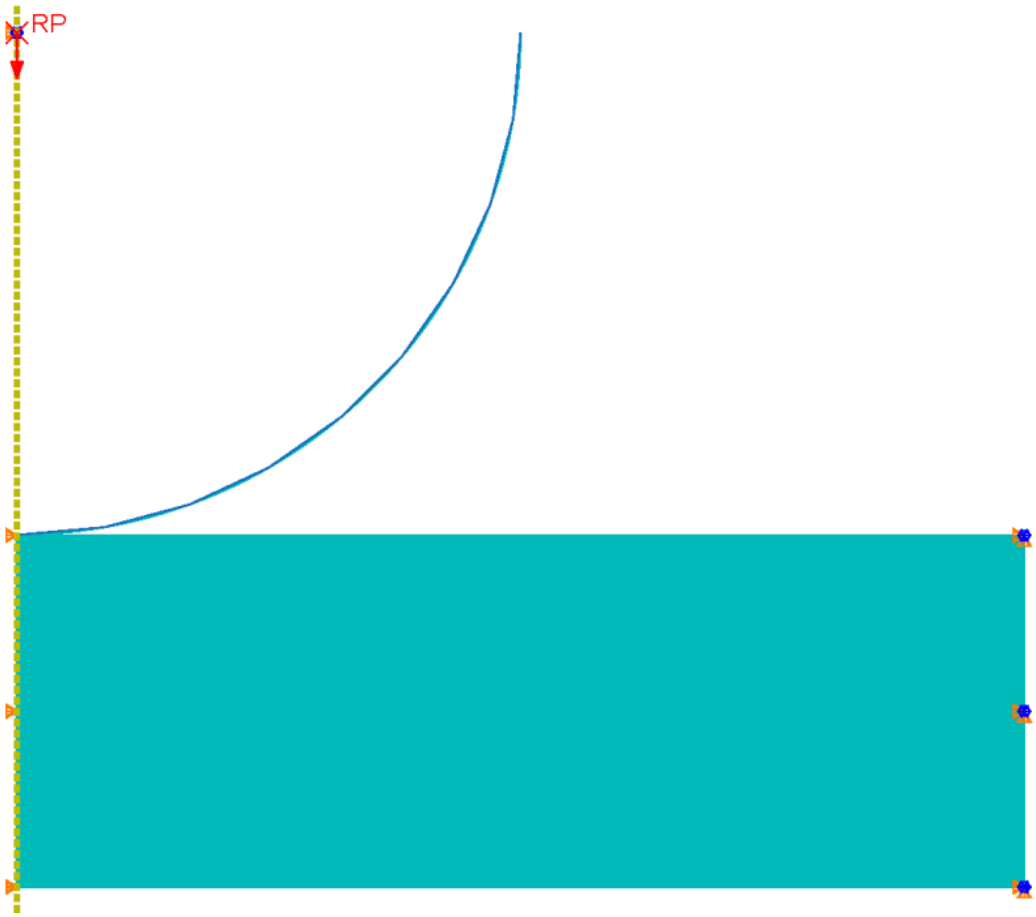
Malzeme	**Elastiklik Modülü (GPa)**	**Poisson Oranı**	**Yoğunluk (kg/m^3)**	**Akma Mukavemeti (MPa)**
Al 6061	68.9	0.33	2700	55.2
SiC	420	0.17	3100	-



Şekil 2.8. Al 6061 alaşımı (elastik-plastik) ve SiC partiküller (elastik) için gerilme-şekil değiştirme diyagramı.

Analizlerde kullanılan SEM modeli ve vurucunun geometrisi ve sınır şartları şekil 2.9' da verilmiştir. Düşük hızlı darbe analizleri, oluşturulan modellerin üst yüzeylerinin merkezine (aksi-simetrik modelde soldaki simetri ekseninin üst moktasına) rijit küresel bir vurucu çarptırılarak gerçekleştirilmiştir. Simetri şartları, yarı bölgenin simetri ekseni

boyunca tüm düğüm noktalı' lara uygulanmıştır. Modellerin üst ve alt kenarları serbest iken, sağ kenar tamamen sabitlenmiş ve simetri ekseni olan sol kenarının sağa ve sola doğru hareket'i kısıtlanmıştır. Vurucunun serbestlik derecesi, dairesel geometrisinin merkezine atanan bir referans noktası ile belirlenmiştir. Çarpma hızı ve kütlesi bu referans noktasına tanımlanmıştır. Ayrıca, vurucunun dönmesi, sağa ve sola doğru hareketi kısıtlanmıştır.



Şekil 2.9. Analizlerde kullanılan SEM modeli ve vurucunun geometrisi ve sınır şartları.

Yukarıda ifade edilen SEM model geometrisi, eleman ağı, malzeme özellikleri, sınır ve yükleme şartları dikkate alındığında ve gerçekleştirilecek analizlerdeki parametreleri (Hız ve PTMMK' ler için V_f ve P_s) de buna dahil ettiğimizde karmaşık bir modelleme aşamasıyla karşılaşmaktayız. Bu durumu kolaylaştırmak, işlemleri hızlandırmak ve analizlerde karşılaşılacak problemlere hemen müdahale yapabilmek amacıyla yukarıda

ifade edilen bütün parametreleri içeren ABAQUS/Explicit SEM programının desteklediği Python [35], programlama dilinde parametrik çalışan bir makro yazılmıştır. Gerçek PTMMK mikroyapısına benzeyecek şekilde kompozit yapıda partiküllerin rasgele dağılması mantığıyla çalışan makro içerisindeki partikül hacim oranı (V_f) ve partikül boyutu (P_s) temel parametreleri aşağıda detayları verilecek olan bir algoritma [36-38] ile düzenlemektedir.

PTMMK yapılarda deneysel çalışmalarda olduğu gibi SEM darbe analizlerinin, P_s = 37, 102 ve 356 μm partikül boyutuna ve V_f = %10, %20 ve %30 partikül hacim oranlarına sahip kompozit yapılar için V = 1, 2 ve 3m/s şeklinde üç farklı darbe hızlarına karşılık gelen E = 2.52, 10.09 ve 22.70 J (Joule) çarpma enerjisilerinde yapılması amaçlanmıştır. 20×7 mm boyutlara sahip dikdörtgen geometrili bir alan içerisinde oluşturulan ana model (Şekil 2.9) içerisinde en küçük partikül boyutu temel eleman ağı boyutuna eşit olarak P_s = 35 μm alınmıştır. Ps = 35 μm' ye göre meshlenen kompozit yapılar 114200 elemandan oluşmakta ve partiküllerin rasgele mantığı ile çalısan bir algoritma ile seçilen hacim oranında istenilen partikül boyutunda kompozit yapı içerisinde rasgele yerleştirilmesi sağlanmaktadır. Bu amaçla, seçilen herhangi bir partikül boyutunda hacim oranı belirlenirken temel mesh eleman sayısı 114200' un doğrudan yüzdesinin alınması ile hesaplama yapılmaktadır. Örneğin, P_s = 20 μm boyutunda ve V_f = %10 partikül hacim oranına sahip PTMMK malzemeler icin 114200' ün %10' u alındığında bulunan 11420 eleman seçilerek kompozit yapı içerisine doğrudan (temel mesh 35 μm boyutunda olduğu için) takviye SiC partikül olarak rasgele atanmaktadır. Diğer hacim oranlarından V_f = %20 için 22840 eleman (114200×0.2) ve V_f = %30 için 34260 eleman (114200×0.3) SiC partikül olarak rasgele atanmaktadır. P_s = 35 μm' den daha büyük partikül boyutlarının modellenmesinde ise belirlenen hacim oranını sağlaması gereken sayıda eleman kullanılarak kare geometrili partiküller oluşturacak şekilde birbirine komşu olma kısıtlamasıyla seçilen temel mesh elemanlarından (35 μm boyutunda) oluşan eleman setlerinin yapı içerisine rasgele dağıtılması mantığı kullanılmaktadır. Bu eleman setleri, her bir analizde değişerek kompozit yapı içerisine rasgele partikül yerleşimi sağlamaktadır. Dolayısıyla, her bir analizde farklı dağılıma sahip SiC partiküller ihtiva eden PTMMK modeller oluşmaktadır.

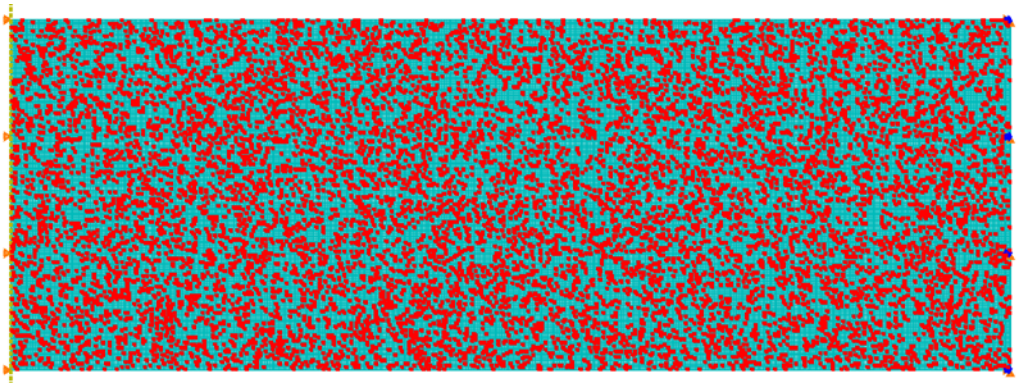
Özetle, oluşturulan algoritmaya göre temel mesh elemanı boyutu P_s = 35 μm' den daha büyük partikül boyutları için oluşturulan SiC partiküllerin boyutları, 35 μm' nin katları şeklinde değişmesi gerekmektedir. Yani, pratikte P_s = 102 μm boyutundaki bir partikül, analizlerde 3 × 3 = 9 adet elemandan oluşan P_s = 105 μm boyutunda bir partiküle karşılık geldiği gibi, pratikte P_s = 356 μm boyutundaki bir partikül 10×10 = 100 elemandan olusan P_s = 350 μm' lik bir partiküle karşılık gelmektedir. Dolayısıyla, sayısal modellemede elde edilen bu partikül boyutları deneysel uygulamalardaki boyutlara yakın değerler olarak kullanılmıştır. Tablo 2.3' de deneysel çalışmalarda kullanılan gerçek partikül boyutları ve hacim oranları ile yakın olacak şekilde teorik çalışmalarda oluşturulan modellerde kullanılan benzetilmiş (simüle edilmiş) partikül boyutları ve hacim oranları verilmiştir.

Tablo 2.3. PTMMK' lerin SEM modellerindeki SiC partikül hacim oranları ve boyutları.

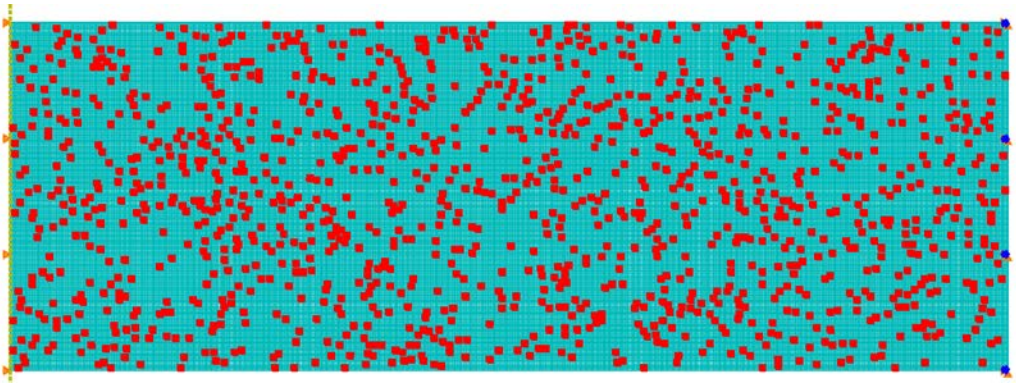
Deneysel P_s (μm)		37		102		356	
SEM P_s (μm)		35		105		350	
Hedeflenen hacim oranı V_f (%)	**Eleman sayısı**	**Benzetilmiş V_f(%)**	**Eleman sayısı**	**Benzetilmiş V_f(%)**	**Eleman sayısı**	**Benzetilmiş V_f(%)**	**Eleman sayısı**
10	11420	10	11420	9,99	11412	9,98	11400
20	22840	20	22840	19,99	22833	19,96	22800
30	34260	30	34260	29,99	34254	29,95	34200

Son olarak makroda kullanılan algoritma gereği belirli bir partikül boyutuna sahip bir PTMMK modellenirken, istenilen hacim oranını sağlamak icin kullanılması gereken eleman sayısının (V_f = %10, %20 ve %30 için sırasıyla 11420, 22840, 34260 adet eleman) aşılmaması gerekmektedir. Farklı boyutlardaki partikülleri oluşturmak için farklı sayılarda elemana ihtiyaç duyulmasından dolayı, olması gereken eleman sayısı aşılabilecediğinden bu kısıtlama kullanılmıştır. Dolayısıyla, yapılan kısıtlama nedeniyle, artan elemanlar yeni bir partikül oluşturmaya yetmeyecekse kullanılmamaktadır. Şekil 2.3' de $V_f \approx$ %10 partikül hacim oranı için P_s = 37 (~35), 102 (~105) ve 356 (~350) μm partikül boyutlarında rasgele partikül dağılımına sahip PTMMK SEM modelleri

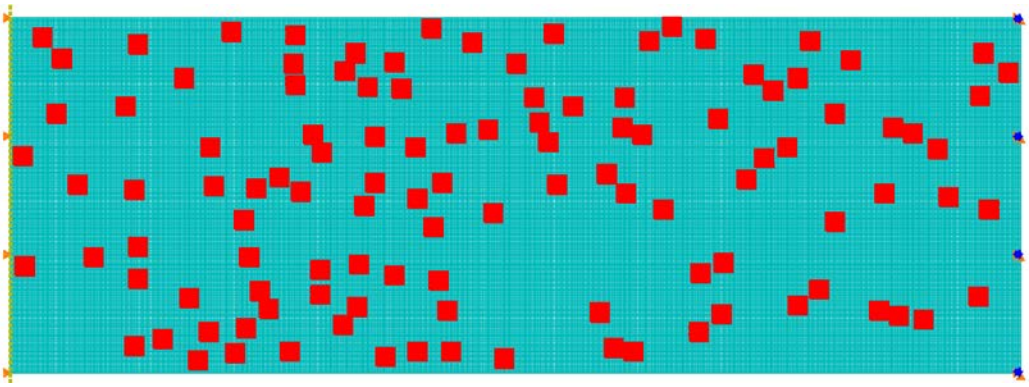
verilmiştir. Bütün analizler 2.4 GHz hızında 8 işlemcili ve 32 Gb Ram' li bir serverda gerçekleştirilmiştir. Tek bir modelin çözüm süresi yaklaşık olarak 10 saat almıştır.



a) P_s= 37 (~35) µm, V_f = % 10



b) P_s= 102 (~105) µm, V_f = ~%9.99



c) P_s= 356 (~350) µm, V_f = ~%9.98

Şekil 2.10. $V_f \approx$ %10 partikül hacim oranı için a) P_s = 37 (~35) µm, b) P_s= 102 (~105) µm ve c) P_s= 356 (~350) µm partikül boyutlarında rasgele partikül dağılımına sahip PTMMK SEM modelleri.

3. BÖLÜM

DENEYSEL VE SAYISAL BULGULAR

3.1. Giriş

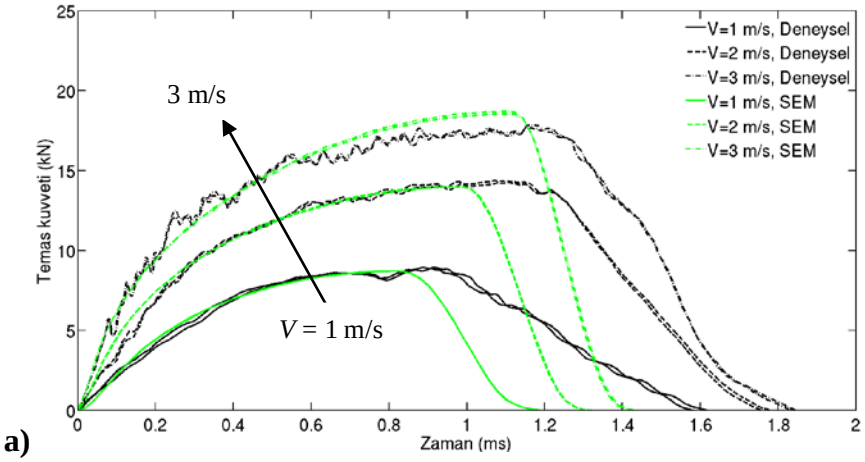
Bu bölümde farklı partikül boyutlarına P_s = 37, 102 ve 356 μm ve farklı partikül hacim oranlarına V_f = %10, %20 ve %30 sahip olan PTMMK' lerin ve takviyesiz alaşımların V = 1, 2 ve 3 m/s hızlarına karşılık gelen E = 2.52, 10.09 ve 22.70 J darbe enerji seviyelerinde gerçekleştirilen deneysel ve sayısal (Sonlu Elemanlar Metodu) düşük hızlı darbe deneylerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Vurucu kütlesi deneysel ve sayısal çalışmalarda sabit m = 5.045 kg olarak kullanılmıştır. Takviyesiz alaşımlar ve aynı partikül hacim oranı ve partikül boyutuna sahip PTMMK' ler için her darbe hızında en az iki deney yapılmıştır. Dolayısıyla, partikül hacim oranı, partikül boyutu ve darbe hızının PTMMK' lerin ve takviyesiz alaşımların darbe davranışları üzerine etkileri, temas kuvveti-zaman diyagramları açısından deneysel ve sayısal sonuçların kıyaslanması şeklinde verilmiştir. Bunun yanı sıra, sayısal analizlerden elde edilen zamana bağlı plastik yutulma diyagramları ve kalıcı gerilme ve plastik şekil değiştirme alanlarındaki değişimler partikül hacim oranı, partikül boyutu ve darbe hızları açısından değerlendirilmiştir. Son olarak, deneysel çalışmalarada PTMMK numunelerin darbeye maruz kalan bölgelerinden alınan kesitler üzerinde gerçekleştirilen Taramalı Elektron Mikroskop (TEM) çalışması, PTMMK' lerin deformasyon şekillerini karakterize etmek amacıyla yine partikül hacim oranı, partikül boyutu ve darbe hızları açısından sunulmuştur.

3.2. Deneysel ve Sayısal Düşük Hızlı Darbe Bulguları

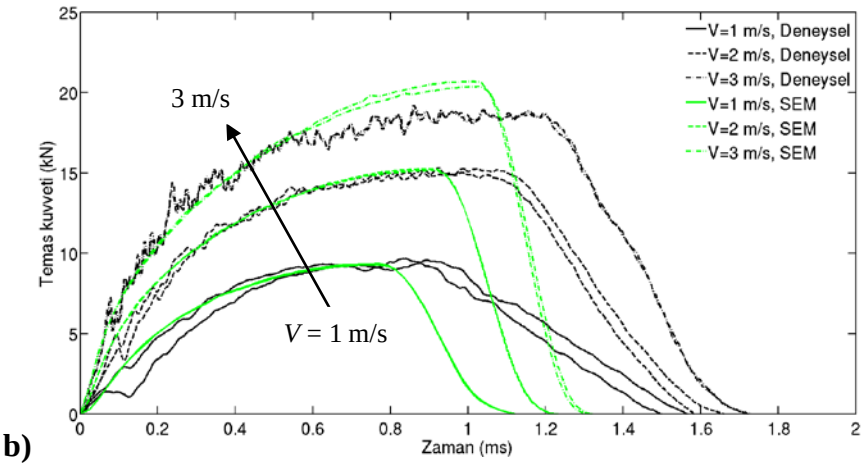
Şekil 3.1' de P_s = 37 μm partikül boyutu ve V_f = %10, %20 ve %30 partikül hacim oranlarına sahip PTMMK' lerin deneysel ve sayısal temas kuvvetleri üzerine darbe hızının (V) etkisi görülmektedir. Bütün numuneler için hem darbe süresi ve hem de en

büyük temas kuvveti darbe hızının artışıyla artmaktadır. Ancak, sayısal temas kuvvetleri en büyük değerlerine, deneysel ölçümlerden daha kısa bir sürede ulaşmıştır. Bu nedenle, V_f = %10 hacim oranına sahip PTMMK için (Şekil 3.1 a) V = 1 m/s darbe hızında sayısal en büyük temas kuvveti 8.9 kN' na 0.81 ms (milisaniye)' de, V = 2 m/s darbe hızında sayısal en büyük temas kuvveti 14.3 kN' a 0.99 ms' de ve V = 3 m/s darbe hızında sayısal en büyük temas kuvveti 18.6 kN' a 1.12 ms' de ulaşılmıştır. Fakat, aynı özelliklerdeki deneysel numunelerde en büyük temas kuvvetlerine V = 1, 2 ve 3 m/s darbe hızları için sırasıyla 8.9 kN (0.9 ms), 14 kN (1.08 ms) ve 17.8 kN (1.16 ms) olarak ulaşılmıştır. Görüldüğü gibi en büyük temas kuvveti ve bu kuvvete ulaşma süresi SEM tarafından başarılı bir şekilde hesaplanmıştır. En büyük temas kuvvetleri ve temas süreleri arasındaki ortalama fark, sırasıyla 0.37 kN ve 0.073 ms dir. Darbe hızı 1'den 3 m/s (Şekil 4-a) artarken, sayısal ve deneysel darbe kuvvetleri sırasıyla 8.9 kN' dan 18.6 kN (2.09 kat)' a ve 8.9 kN' dan 17.8 kN (2 kat)' a artmaktadır. Benzer şekilde, darbe hızı 1'den 3 m/s' ye artarken sayısal ve deneysel darbe süreleri sırasıyla 1.2 ms' den 1.43 ms (1.19 kat)' ye ve 1.6 ms' den 1.83 ms (1.145 kat)' ye artmaktadır. Deneysel en büyük temas kuvvetleri ile kıyaslandığında sayısal en büyük temas kuvvetleri özellikle V = 3 m/s darbe hızında daha yüksek değerlerler almışken diğer hızlarda V = 1 ve 2 m/s daha yakın değerler almıştır. SEM modelleri V = 1 ve 3 m/s darbe hızlarında en büyük temas kuvvetini, sırasıyla %0 ve % 4.3' lük minimum hatalarla tahmin etmiştir. Ancak, toplam darbe süresi, 1 ve 3 m/s darbe hızları için en yüksek hata oranıyla yaklaşık olarak %25 ve %22 değerleriyle tahmin edilmiştir. Bununla birlikte, bu kompozitler Al 6061 matristen dolayı oldukça sünek bir davranış sergilemekte ve darbe hızının (enerjisinin) artışıyla temas süresi ve temas kuvvetinin artmasından dolayı daha fazla darbe enerjisi sönümleyebilmektedirler. Bu aynı zamanda, PTMMK yapı üzerindeki deformasyon bölgesinin darbe hızının artışıyla genişleyeceği anlamına gelmektedir. Bu yüzden, darbe hızının PTMMK' lerin darbe dayanımı üzerine önemli bir etkiye sahiptir. Yukarıda ifade edilenlere benzer sonuçlar, V_f = %10, %20 ve %30 partikül hacim oranlarına sahip P_s = 102 ve 356 μm partikül boyutundaki PTMMK' ler için sırasıyla Şekil 3.2 ve 3.3' den de gözlenebilmektedir. Sonuç olarak, sayısal en büyük temas kuvvetleri özellikle düşük darbe hızlarında deneysel en büyük temas kuvvetleri ile uyum içersinde iken, bütün darbe hızları için sayısal ve deneysel darbe süreleri arasında bazı farklar ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3' e bakıldığında hem sayısal ve hem de deneysel çalışmalardan elde edilen temas kuvveti-zaman diyagramları her parametre

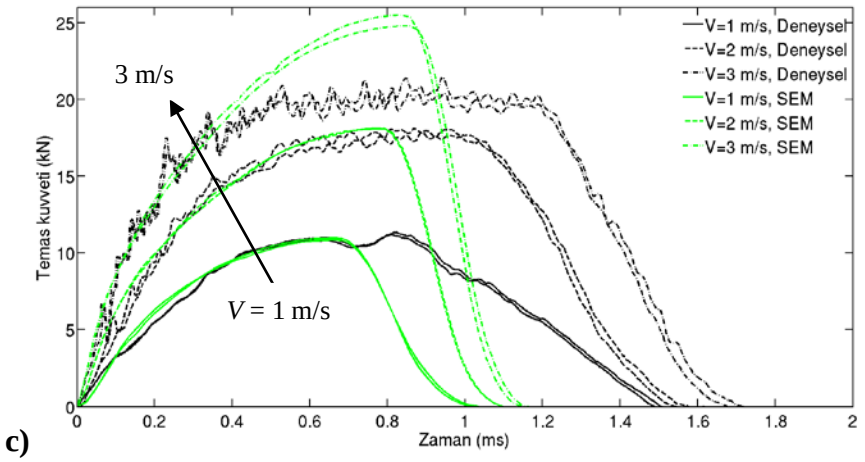
için kendi tekrarlarıyla çakışarak birbiri ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Bu durum, çalışmadan elde dilen tekrarlı verilerde hata oranının çok düşük olduğunu göstermektedir.



a)

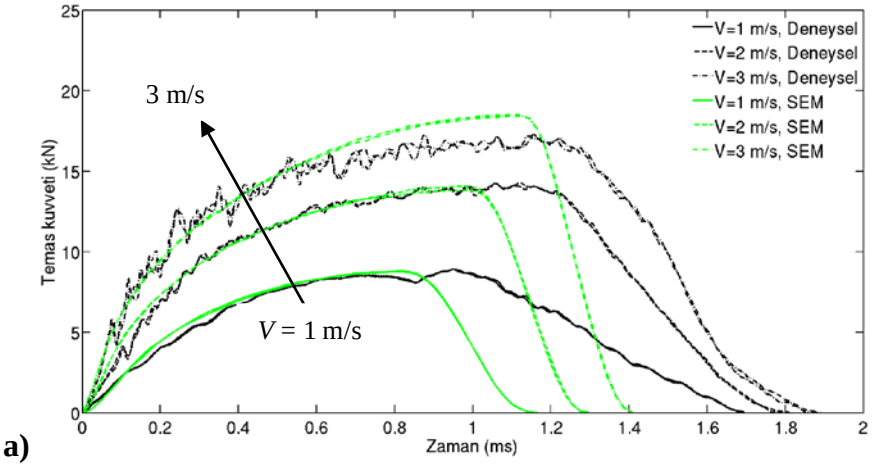


b)

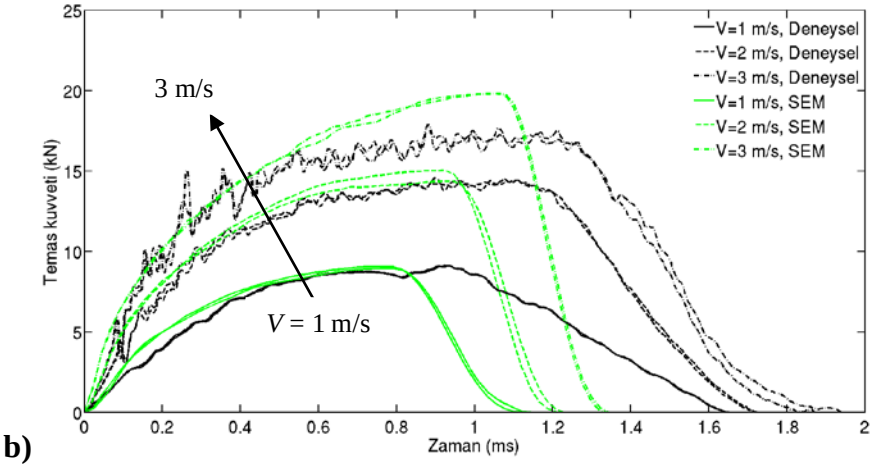


c)

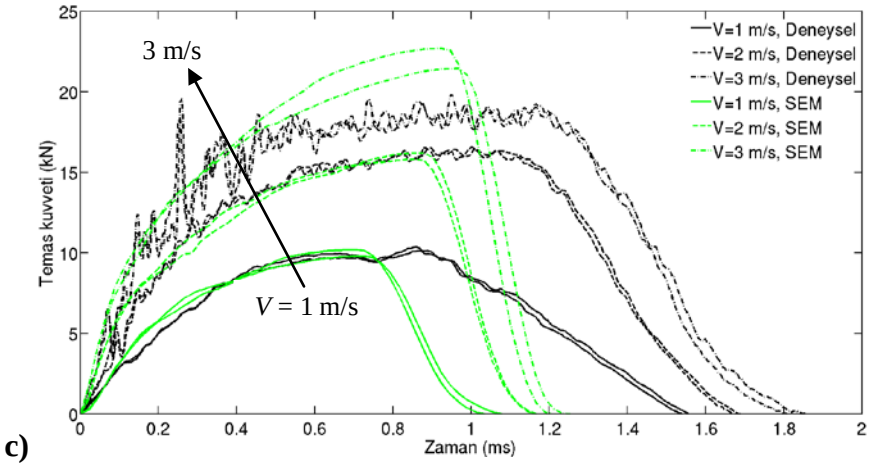
Şekil 3.1. P_s = 37 μm partikül boyutu sahip PTMMK' lerin a) V_f = %10, b) V_f = %20 ve c) V_f = %30 partikül hacim oranları için temas kuvvetleri üzerine darbe hızının (V) etkisi.



a)

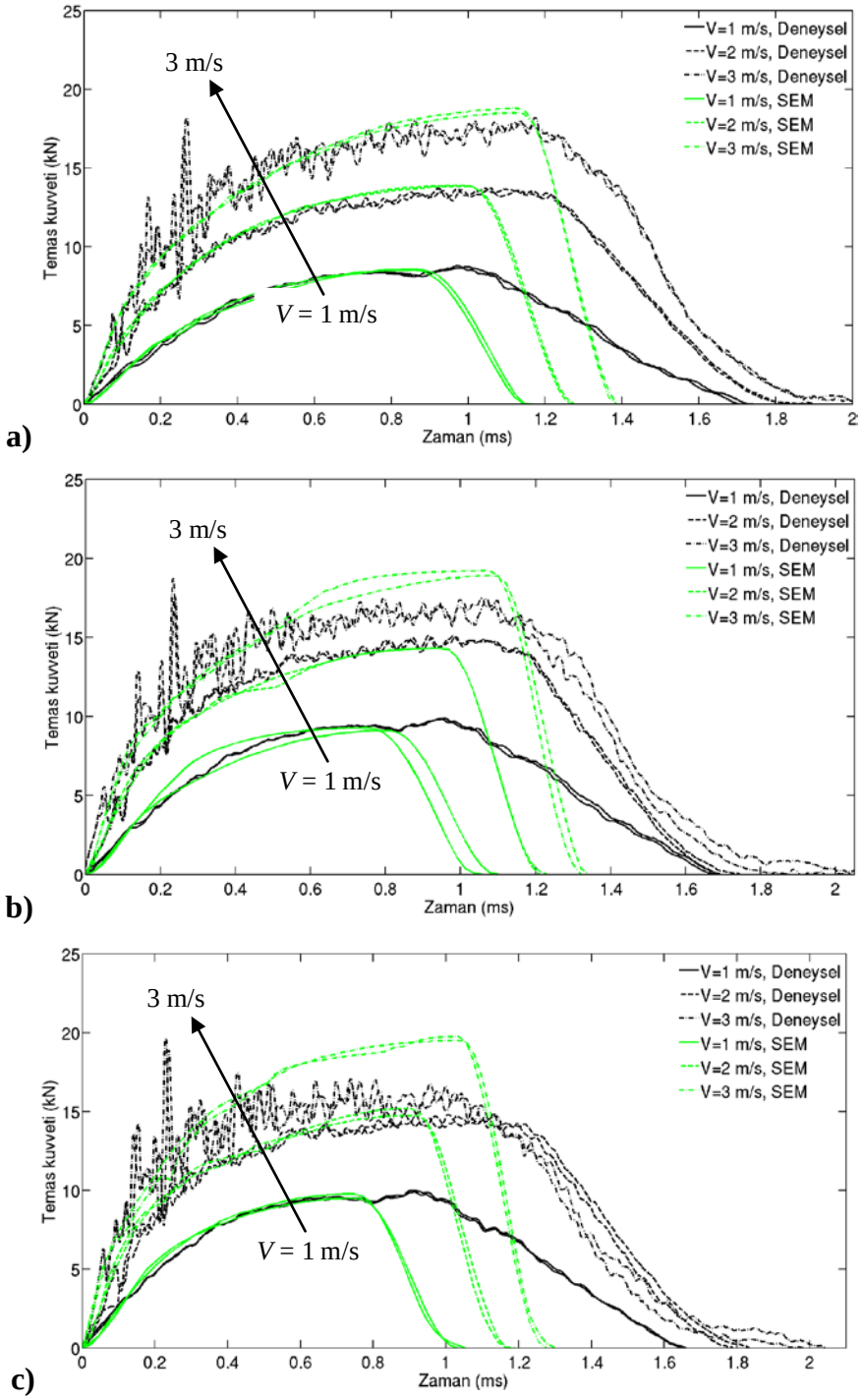


b)



c)

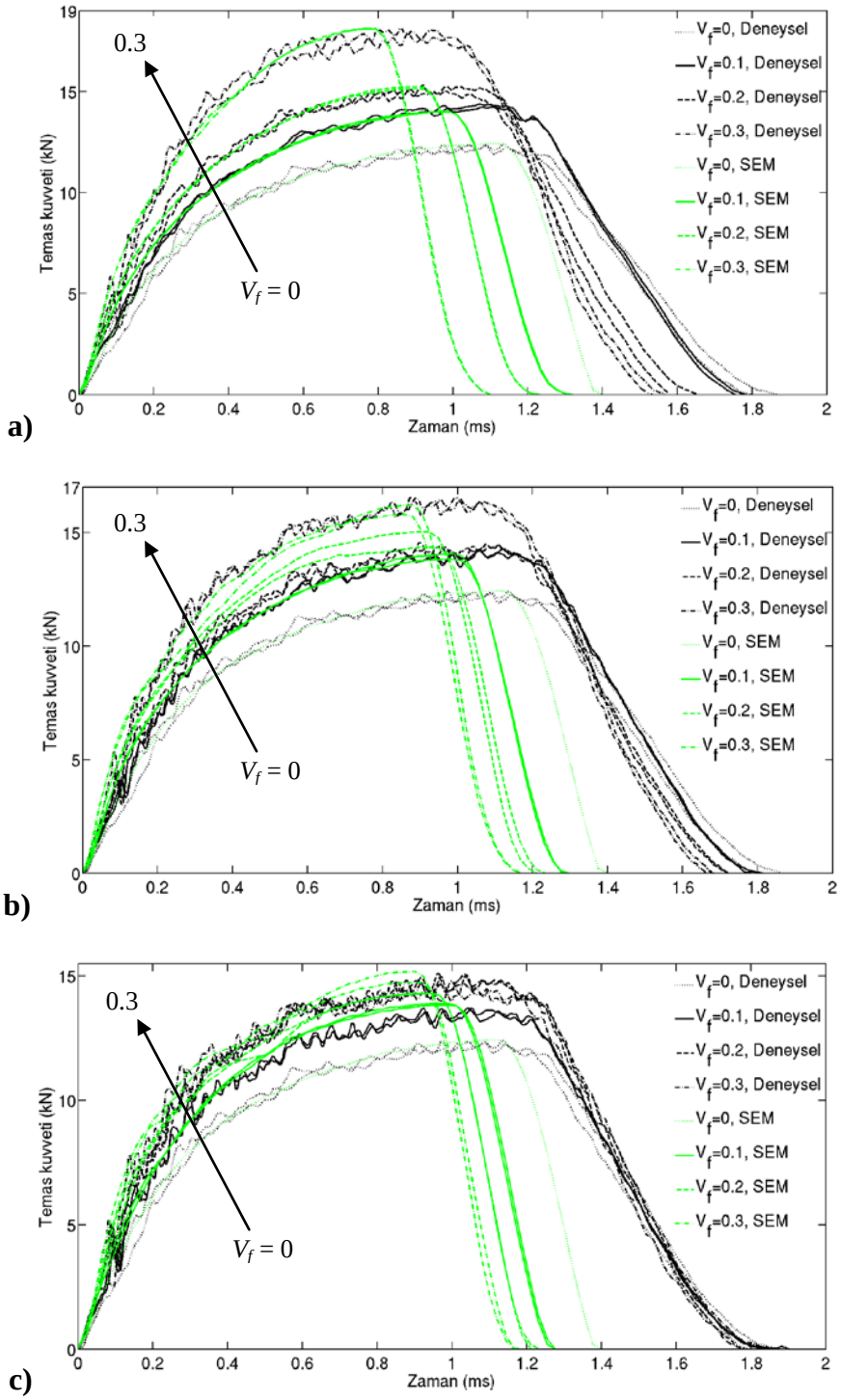
Şekil 3.2. P_s = 102 μm partikül boyutu sahip PTMMK' lerin a) V_f = %10, b) V_f = %20 ve c) V_f = %30 partikül hacim oranları için temas kuvvetleri üzerine darbe hızının (V) etkisi.



Şekil 3.3. P_s = 356 µm partikül boyutu sahip PTMMK' lerin a) V_f = %10, b) V_f = %20 ve c) V_f = %30 partikül hacim oranları için temas kuvvetleri üzerine darbe hızının (V) etkisi.

Şekil 3.4 sabit darbe hızında (V = 2 m/s) P_s = 37, 102 ve 356 µm partikül boyutlarına sahip PTMMK' lerin deneysel ve sayısal temas kuvvetleri üzerine partikül hacim oranının (V_f) etkisini göstermektedir. Hacim oranı (V_f) %10' dan %30' a arttıkça

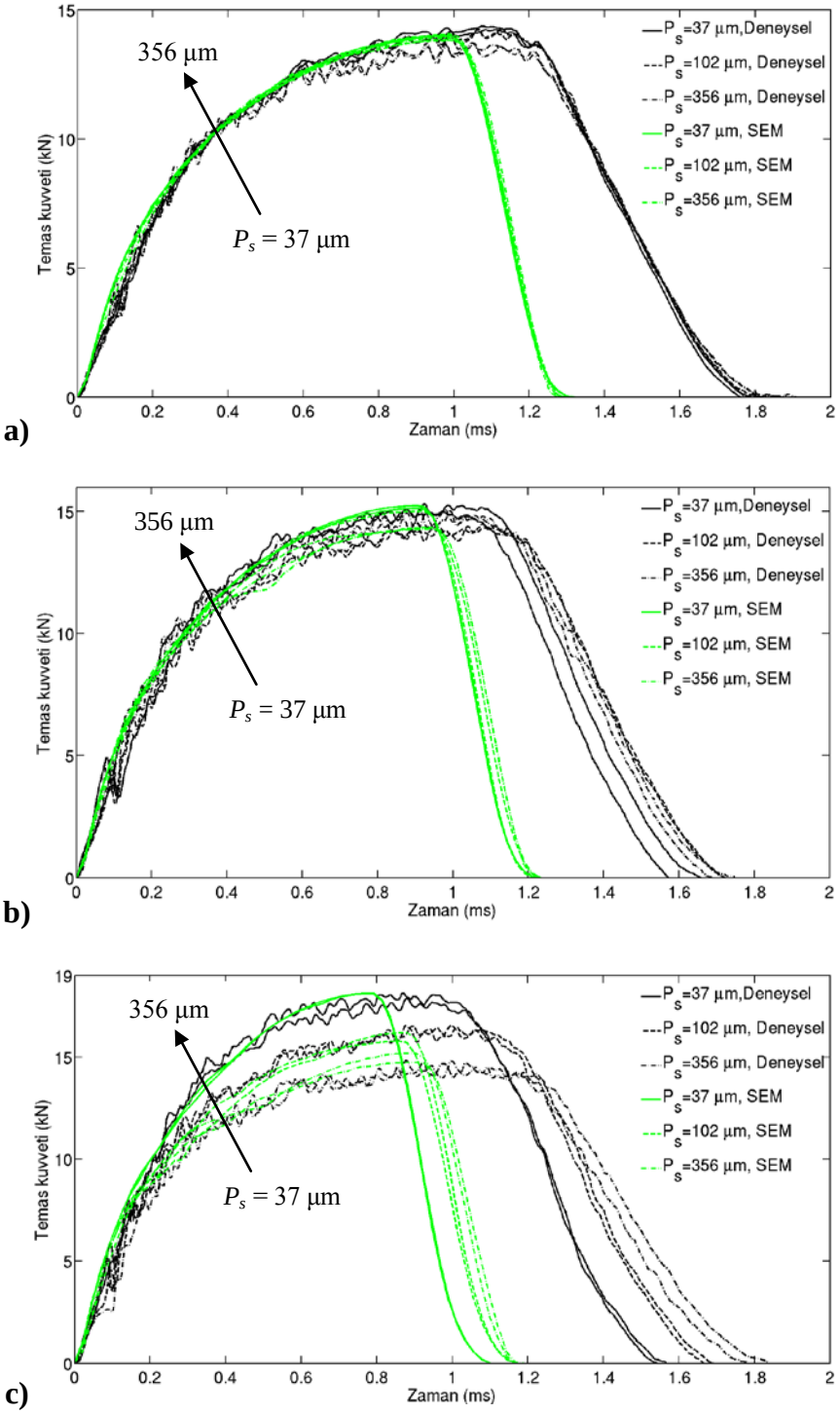
görülmektedir ki en büyük temas kuvveti artarken toplam darbe zamanı kısalmaktadır. Bu küçük partikül boyutlarında daha açık bir biçimde görülmektedir. Partikül boyutunun artışıyla bu etki azalmaktadır. Çünkü, partikül boyutunun artışıyla partiküller arası mesafe artmakta ve malzeme sünekleşmektedir ve ayrıca bu şekilde PTMMK yapı daha büyük plastik deformasyonlara maruz kalmaktadır. Böylece, PTMMK' lerin temas kuvvetleri ve darbe süreleri takviyesiz alaşımınkilere (Şekil 3.6) yaklaşmakatadır. V = 2 m/s darbe hızında deneyleri yapılan P_s = 37 μm partikül boyutuna sahip olan PTMMK' lerin (Şekil 3.4 a) V_f = %10, %20 ve %30 hacim oranları için en büyük temas kuvvetleri sırasıyla 14 kN (1.08 ms), 15.3 kN (0.98 ms) ve 18 kN (0.88 ms) olarak tespit edilmiştir. SEM analizlerinde ise aynı partikül boyutundaki (P_s = 37 μm) PTMMK modellerin V_f = %10, %20 ve %30 hacim oranları için (Şekil 3.4 a) en büyük temas kuvvetleri sırasıyla 14.3 kN (0.99 ms), 15.2 kN (0.9 ms) ve 18.1 kN (0.79 ms) olarak bulunmuştur. En büyük temas kuvvetleri ve bunlara ulaşma süreleri sırsıyla 0.17 kN ve 0.09 ms ortalama farklarla başarılı bir şekilde SEM modelleri ile belirlenmiştir. Deneysel ölçümlerde, P_s = 37 μm partikül boyutundaki PTMMK' lerde V_f = %10, %20 ve %30 hacim oranları için toplam darbe süresi sırasıyla 1.77, 1.63 ve 1.53 ms olarak belirlenirken, SEM analizlerinde bu değerler sırasıyla 1.33, 1.23 ve 1.1 ms olarak tespit edilmiştir. Hacim oranı (V_f) %10' dan %30' a arttıkça deneysel ölçümlerde en büyük darbe kuvveti 1.286 kat artarken, sayısal ölçümlerde 1.266 kat artmıştır. Bununla birlite, hacim oranı (V_f) %10' dan %30' a artışıyla deneysel darbe süreleri 1.157 kat ve sayısal darbe süreleri 1.463 kat kısalmıştır. SEM modelleri V_f = %10, %20 ve %30 hacim oranları için en büyük temas kuvvetlerini sırasıyla %2.1, %0.65 ve %0.55 şeklinde küçük hatalarla tespit etmiştir. Fakat, toplam darbe süreleri V_f = %10, %20 ve %30 hacim oranları için %24.9, %24.5 ve %28.1 şeklinde daha yüksek hatalarla gerçekleşmiştir. Diğer partikül boyutları P_s = 102 ve 356 μm için (Şekil 3.4 b ve c) benzer sonuçlar elde edilmiş, ancak hem en büyük temas kuvveti ve hem de darbe süreleri arasındaki ortama farklar daha düşük olarak elde edilmiştir. Ayrıca, hem deneysel numuneler ve hem de sayısal modeller birbirlerine daha yakın sonuçlar vermiştir. Dolayısıyla, partikül hacim oranının PTMMK' lerin temas kuvvetleri üzerine oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu sonucu açıkça görülmektedir.



Şekil 3.4. Sabit darbe hızında (V = 2 m/s) a) P_s = 37 µm, b) P_s = 102 µm ve c) P_s = 356 µm partikül boyutlarına sahip PTMMK' ler için temas kuvvetleri üzerine partikül hacim oranının (V_f) etkisi.

Şekil 3.5 sabit darbe hızında (V = 2 m/s) V_f = %10, %20 ve %30 partikül hacim oranlarına sahip PTMMK' lerin deneysel ve sayısal temas kuvvetleri üzerine partikül

boyutunun (P_s) etkisini göstermektedir. Genel olarak partikül boyutunun artışıyla en büyük temas kuvvetinin düştüğü, fakat darbe süresinin uzadığı gözlenmektedir. Bu durum yüksek hacim oranlarında daha belirgin olmaktadır. Küçük partikül boyutlarında rijit SiC partiküller yapı içerisinde daha sık bir yerleşime sahip olmaları ve matris fazdan SiC partiküllere yük transferinin yüksek olması nedeniyle PTMMK yapılar daha rijit bir davranış sergilemektedirler. Partikül hacim oranı V_f = %30 olan (Şekil 3.5 c) P_s = 37, 102 ve 356 μm partikül boyutlarına sahip sayısal PTMMK modeller için en büyük darbe kuvvetleri sırasıyla 18.1 kN (0.79 ms), 16 kN (0.88 ms) ve 15 kN (0.91 ms) olarak belirlenirken, deneysel sonuçlar sırasıyla 18 kN (0.88 ms), 16.5 kN (1.01 ms) ve 14.6 kN (1.03 ms) olarak bulunmuştur. Deneysel olarak ölçülen ve sayısal olarak hesaplanan en büyük temas kuvveti ve darbe süresi için ortalama farklar sırasıyla 0.3 kN ve 0.11 ms dir. Ayrıca,) P_s = 37, 102 ve 356 μm partikül boyutlarına sahip PTMMK' ler için sayısal darbe süreleri sırasıyla 1.1, 1.17 ve 1.18 ms olarak ortaya çıkarken, deneysel darbe süreleri 1.53 ms, 1.68 ms ve 1.81 ms olarak ölçülmüştür. Buna göre SEM modellerinde partikül boyutunun P_s = 37 μm' den 356 μm' ye artışıyla en büyük temas kuvveti 1.207 kat düşerken, deneysel temas kuvveti 1.233 kat düşmektedir. Bununla birlikte, partikül boyutunun P_s = 37 μm' den 356 μm' ye artışı SEM analizlerinde darbe sürelesini 1.073 kat arttırırken deneysel de bu artış 1.183 kat olmaktadır. Yukarıdaki değerlendirmeler ışığında, SEM modelleri en büyük temas kuvvetlerini P_s = 37, 102 ve 356 μm partikül boyutları için sırasıyla %0.55, %3.03 ve %2.67 şeklinde küçük hatlarla belirleyebilmiştir, ancak toplam darbe sürelerini sırasıyla %28.1, % 30.4 ve %34.8 şeklinde daha büyük hatalarla bulabilmiştir. Görüldüğü gibi SEM modelleri en büyük temas kuvvetlerini daha doğru bir şekilde hesaplayabilmektedir. Ortaya çıkan hataların SEM modelleri içerisine porozite, düzensiz partikül şekilleri ve boyutları, partikül kırılma etkileri (partikül/matris arayüzeyinde çatlak büyümesi), boşluk oluşumu, dislokasyonlar, üç boyutlu modelleme ve iyi çalışan bir hasar modeli gibi bazı kabullerin ilave edilmesi ve probleme daha gerçekçi bir yapı kazandırılması ile azaltılabilineceği düşünülmektedir. Fakat, iyi bilinmektedir ki, günümüzde sahip olduğumuz sayısal hesaplama koşullarında bu yapısal parametrelerin çoğunun SEM modelleri içerisine dahil edilmesi oldukça zordur. Basit bir hesaplamayla, problemimize eşdeğer olacak şekilde 7×40×40 mm boyutunda üç boyutlu bir dikdörtgenler prizması şeklindeki hacmi, her yönde 35 μm temel mesh

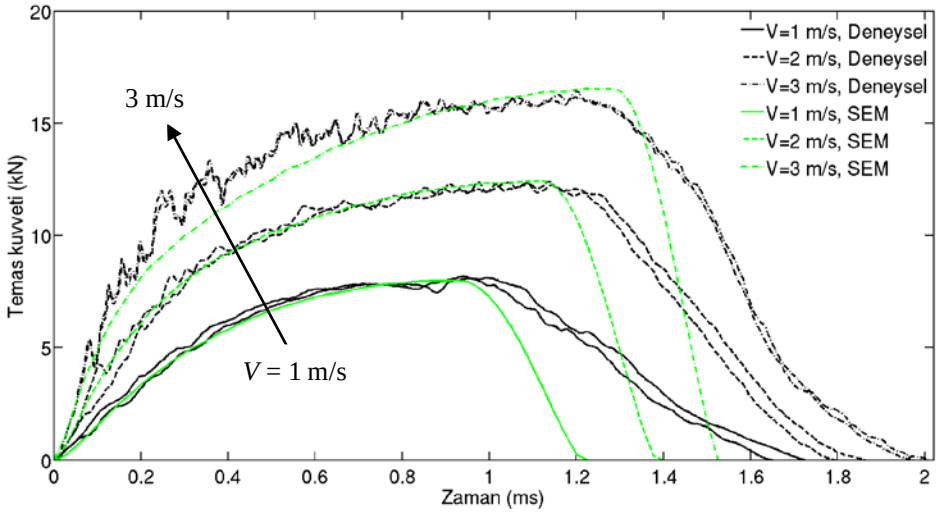


Şekil 3.5. Sabit darbe hızında (V = 2 m/s) a) V_f = %10, b) V_f = %20 ve c) V_f = %30 partikül hacim oranlarına sahip PTMMK' ler için temas kuvvetleri üzerine partikül boyutlarının (P_s) etkisi.

boyutumuzda meshlersek yaklaşık 260 milyon sonlu elemana ihtiyaç duyarız. Bu eleman sayısı ve serbestlik derecesi problemimizin çözümünü, şuan sahip olduğumuz

bilgisayar altyapısıyla neredeyse imkansız hale getirmektedir.

Şekil 3.6 takviyesiz alaşımların temas kuvvetleri üzerine darbe hızının etkisini göstermektedir. Hem en büyük temas kuvveti ve hem de darbe süresi darbe hızının artışıyla artmaktadır. Sayısal temas kuvvetleri V = 1, 2 ve 3 m/s darbe hızları için sırasıyla 8 kN (0.92 ms), 12.4 kN (1.11 ms) ve 16.5 kN (1.18 ms) ulaşılmışken, deneysel temas kuvvetleri sırasıyla 8.1 kN (0.95 ms), 12.4 kN (1.14 ms) ve 16.4 kN (1.21 ms) ulaşılmıştır. Darbe hızı V = 1 m/s' den 3 m/s' ye arttıkça sayısal en büyük temas kuvveti 2.063 kat artarken, deneysel temas kuvveti 2.05 kat artmaktadır. Görüldüğü gibi takviyesiz alaşımların en büyük temas kuvveti değişimleri PTMMK' lerde olduğu gibi, deneysel ve SEM modelleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Bununla birlikte, deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki farklar olduğu da görülebilmektedir. Darbe hızının V = 1 m/s' den 3 m/s' ye arttışıyla sayısal darbe süresi 1.23 ms' den 1.53 ms' ye (1.24 kat) ve deneysel darbe süresi 1.68 ms' den 2 ms' ye (1.19 kat) artmıştır. Böylece, SEM modellerinin darbe hızının V = 1 m/s' den 3 m/s' ye arttışıyla en büyük temas kuvvetini sırasıyla %1.2 ve %0.61 şeklinde küçük hatalarla, ancak darbe sürelerini sırasıyla % 27 ve %23.5 olacak şekilde daha yüksek hatalarla bulduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, SEM modelleri PTMMK yapılarda olduğu gibi takviyesiz yapılarda da en büyük temas kuvvetlerini başarılı bir şekilde belirlerken, darbe sürelerini bazı hatalarla belirleyebilmektedir.



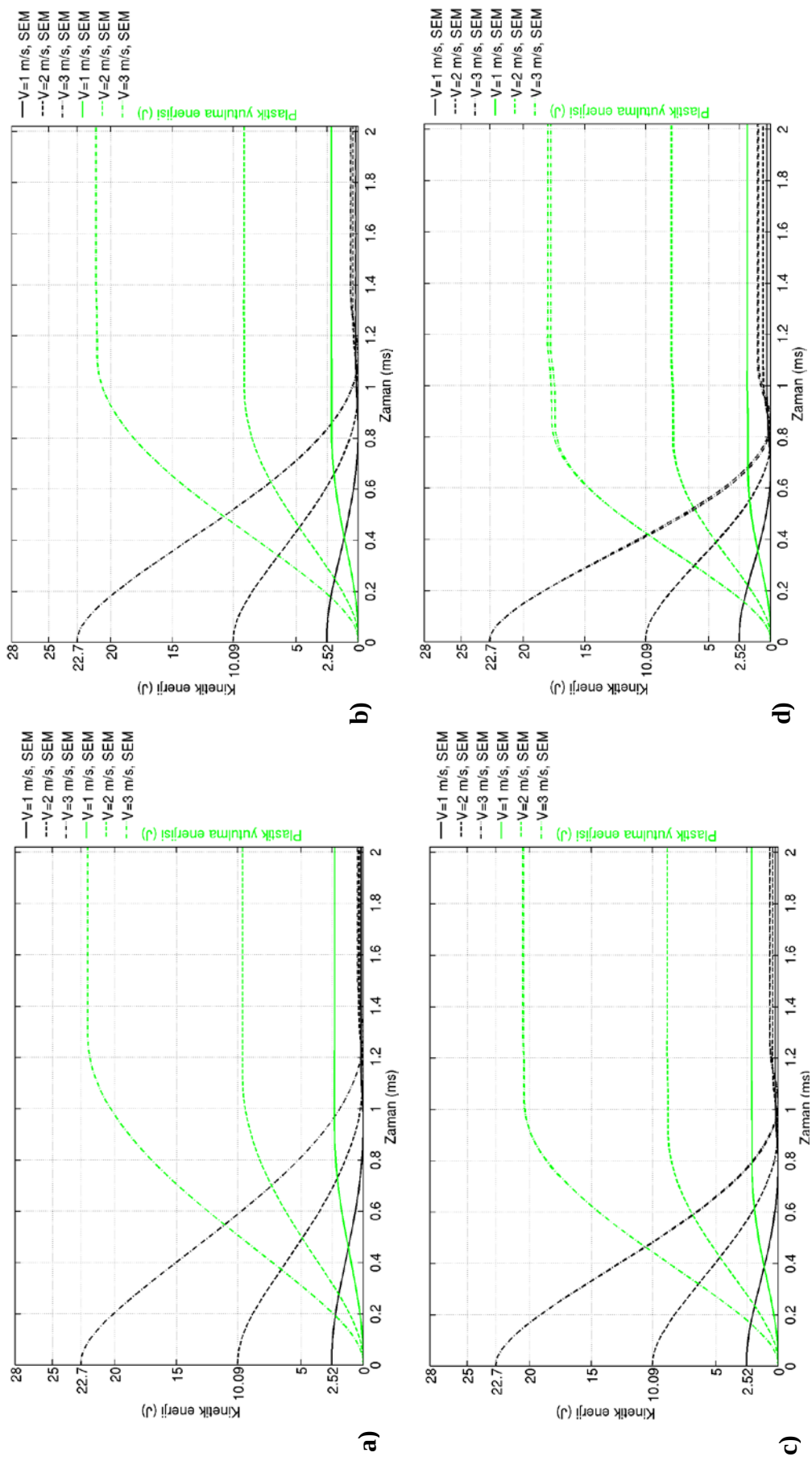
Şekil 3.6. Takviyesiz alaşımların (V_f = 0) temas kuvvetleri üzerine darbe hızının etkisi.

Şekil 3.7 a' da takviyesiz alaşımların ve Şekil 3.7 b, c ve d' de ise P_s = 37 μm sabit partikül boyutuna ve sırasıyla V_f = %10, %20 ve %30 hacim oranına sahip PTMMK' lerin plastik yutulma enerjisi üzerine darbe hızının etkileri gösterilmektedir. 2.52 (V = 1 m/s' de), 10.09 (V = 2 m/s' de) ve 22.7 (V = 3 m/s' de) J vurucu darbe enerji seviyeleri için takviyesiz alaşımların kayıp enerji seviyeleri sırasıyla 2.31, 9.69 ve 22.16 J olarak görülmektedir. Böylece, takviyesiz alaşımlarda 2.52, 10.09 ve 22.7 J vurucu darbe enerji seviyeleri için vurucunun kinetik enerjisinin sırasıyla %91.6, %96 ve %97.6' sı kaybolmaktadır. 2.52, 10.09 ve 22.7 J vurucu darbe enerji seviyeleri için P_s = 37 μm sabit partikül boyutuna ve V_f = %10 partikül hacim oranına sahip PTMMK' lerin (Şekil 3.7 b) plastik yutulma enerji seviyeleri sırasıyla 2.16, 9.23 ve 21.16 J olarak belirlenmektedir. Böylece, 2.52, 10.09 ve 22.7 J darbe enerji seviyeleri için vurucu sahip olduğu kinetik enerjinin sırasıyla % 85.7, %91.5 ve %93.2'sini kaybetmektedir. 2.52, 10.09 ve 22.7 J vurucu darbe enerjileri için aynı partikül boyutu ve V_f = %20 partikül hacim oranındaki PTMMK' lerin (Şekil 3.7 c) kayıp enerji seviyeleri sırasıyla 2.12, 8.91 ve 20.5 J olarak belirlenirken, V_f = %30 partikül hacim oranındaki PTMMK' lerin (Şekil 3.7 d) ise kayıp enerji seviyeleri sırasıyla 1.89, 8 ve 17.9 J olarak bulunmuştur. Dolayısıyla, 2.52-22.7 J aralığındaki vurucu darbe enerji seviyeleri, V_f = %20 ve %30 partikül hacim oranlarındaki PTMMK yapılarda sırasıyla %84.1-%90.3 ve %75-%78.8 olacak şekil kaybolmaktadır. Sonuç olarak, darbe enerjisi veya vurucu hızının artışıyla absorbe olan enerji seviyesinde önemli bir artış olmaktadır.

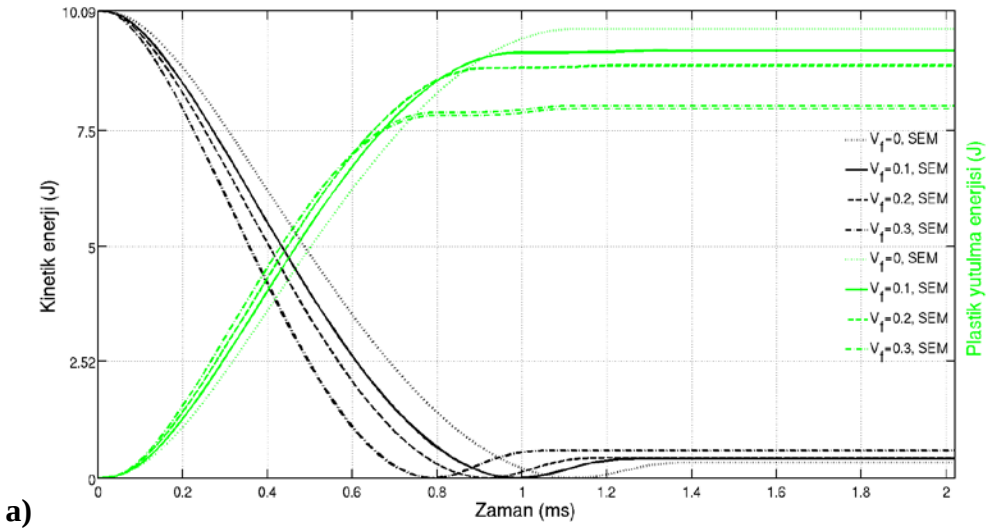
P_s = 37, 102 ve 356 μm partikül boyutuna sahip olan PTMMK' lerin 10.09 J (V = 2 m/s) vurucu enerji seviyesi için plastik yutulma enerjileri üzerine hacim oranının etkisi Şekil 3.8' de gösterilmektedir. Sabit 10.09 J vurucu enerji seviyesi için PTMMK' lerin partikül hacim oranı (V_f) artışı bereberinde rijitliği arttırmakta ve plastik yutulma enerji seviyesini düşürmektedir. Böylece, vurucu kinetik enerjisi daha kısa bir sürede absorbe edilmektedir. Kompozitlerle kıyaslandığında takviyesiz alaşımlar en yüksek plastik yutulma enerjisine sahiptir ve takviyesiz alaşımlar daha yüksek kinetik enerjiyi plastik deformasyon olarak absorbe etmektedir. Bütün hacim oranları için PTMMK' lerin kayıp enerji seviyeleri, partikül boyutunun artışıyla partiküller arası mesafenin artması nedeniyle takviyesiz alaşımlarınkine yaklaşmaktadır. P_s = 37 μm partikül boyutundaki PTMMK' lerin , V_f = %10, %20 ve %30 partikül hacim oranları için kayıp enerji seviyeleri (Şekil 3.8 a) sırasıyla 9.23, 8.91 ve 8 J dür. Bununla birlikte, aynı hacim

oranları için partikül boyutu P_s = 102 μm (Şekil 3.8 b) iken kayıplar sırasıyla 9.34, 9.27 ve 8.94 J ve partikül boyutu P_s = 356 μm (Şekil 3.8 c) iken kayıplar sırasıyla 9.38, 9.34 ve 9.24 J olarak bulunmuştur. Böylece, vurucunun sabit 10.09 J kinetik enerjisi, hacim oranı V_f = %10 dan %30' a artarken P_s = 37, 102 ve 356 μm partikül boyutları için sırasıyla %91.5-%79.3, %92.6-%88.6 ve %93-%91.6 olarak kaybolmaktadır.

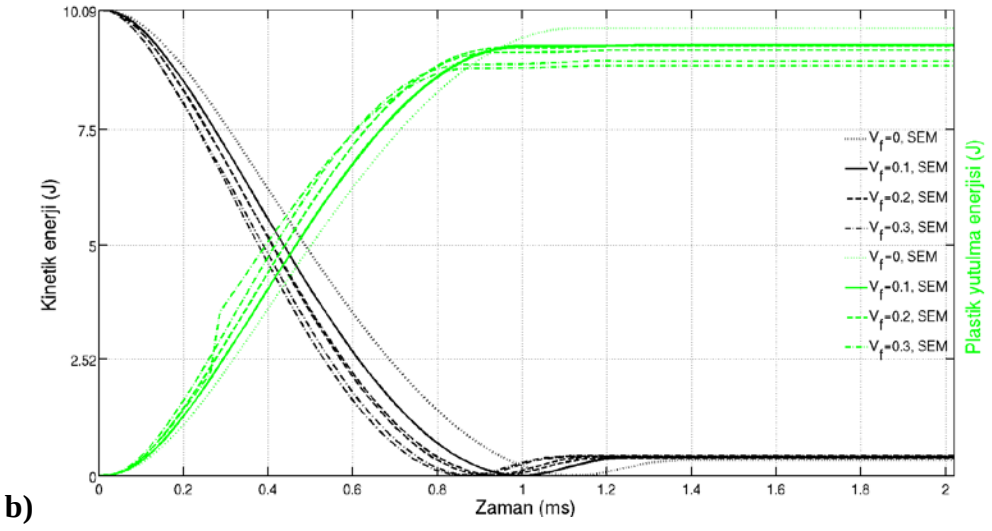
Şekil 3.9 10.09 J (V = 2 m/s) vurucu enerji seviyesi ve V_f = %10, %20 ve %30 hacim oranları için partikül boyutunun (P_s) plastik yutulma enerjileri üzerine etkisini göstermektedir. Düşük partikül hacim oranları için plastik yutulma enerji seviyeleri çok yakın değerler sergilemektedir. Partikül boyutunun (P_s) artmasıyla rijitliğin düşmesi nedeniyle, vurucu kinetik enerjisi, PTMMK' ler tarafından daha uzun bir sürede absorbe edilirken plastik yutulma enerji seviyesi artmaktadır. PTMMK' lerin bütün hacim oranları (Şekil 3.9 a, b ve c) için grafikler incelendiğinde hepsinde en yüksek plastik yutulma enerji P_s = 356 μm partikül boyutunda gerçekleşmektedir. Vurucunun 10.09 J kinetik enerjisi, partikül boyutu P_s = 37 μm' den 356 μm' ye artarken V_f = %10, %20 ve %30 hacim oranları için sırasıyla %91.5-%93, %88.3-%92.6 ve %79.3-%91.6 olarak kaybolmaktadır. PTMMK' ler partikül boyutunun artışıyla daha sünek bir tarzda deforme olmaktadır ve daha fazla kinetik enerji absorbe edebilmektedir. Bunun en önemli nedeni, partikül boyutunun büyümesi ile partiküller arası mesafenin aynı hacim oranı için artmasıdır. Bu metal matrisli kompozit yapıyı giderek sünekleştirmekte ve yapıyı daha fazla deformasyona zorlamaktadır.



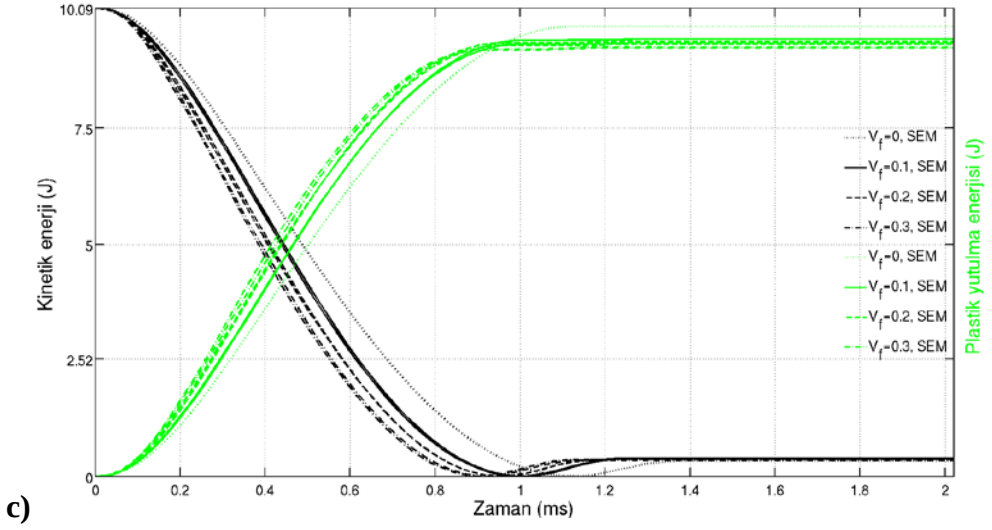
Şekil 3.7. a) Takviyesiz alaşımların (V_f =0) ve b) V_f = %10, c) V_f = %20, d) V_f = %30 partikül hacim oranları için P_s = 37 µm sabit partikül boyutuna sahip PTMMK' lerin kinetik enerji ve plastik yutulma enerjisi üzerine darbe hızının etkisi



a)

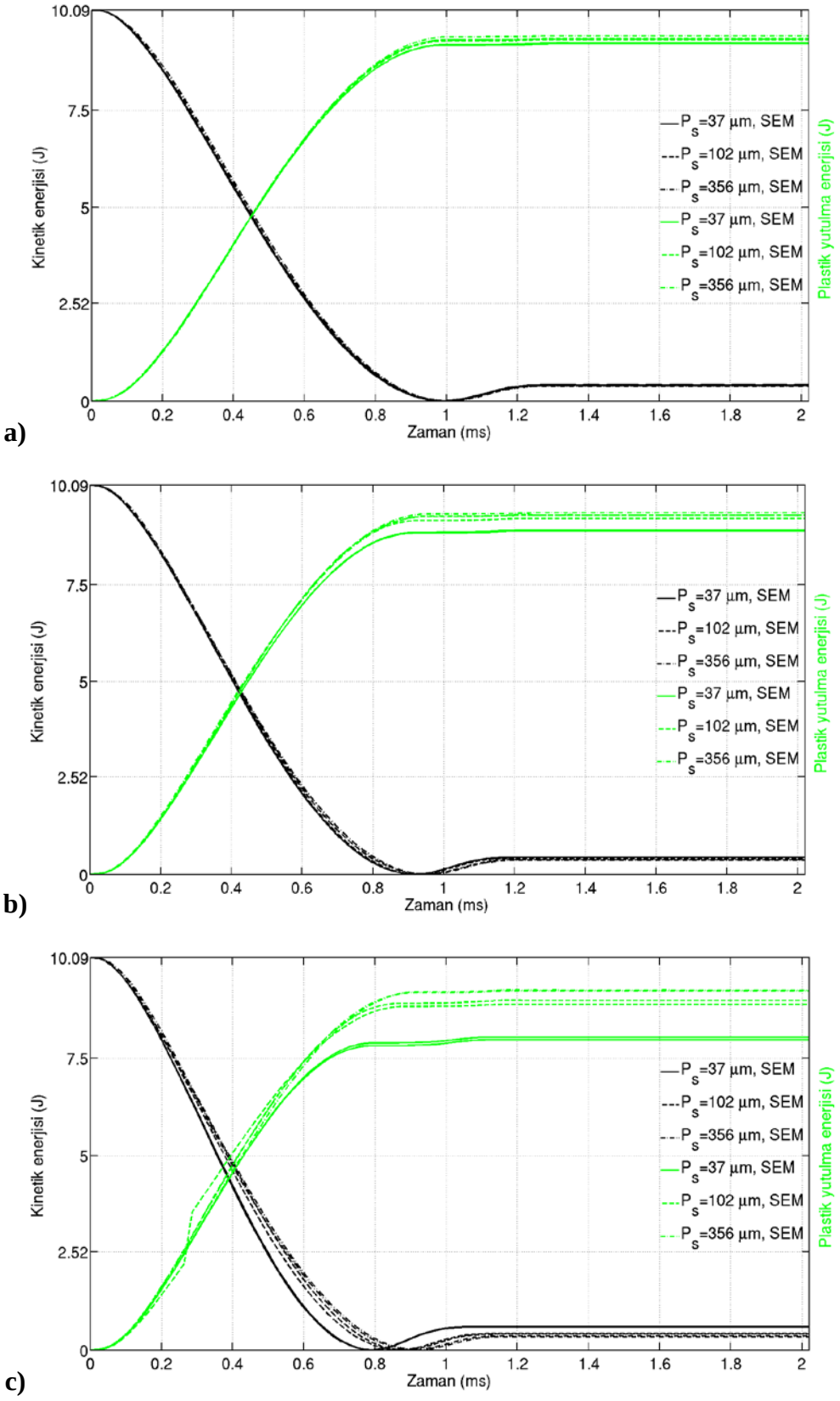


b)



c)

Şekil 3.8. 10.09 J (V = 2 m/s) vurucu enerji seviyesi ve a) P_s = 37 µm, b) P_s = 102 µm ve **c)** P_s = 356 µm partikül boyutları için kinetik enerji ve plastik yutulma enerjileri üzerine hacim oranının (V_f) etkisi.



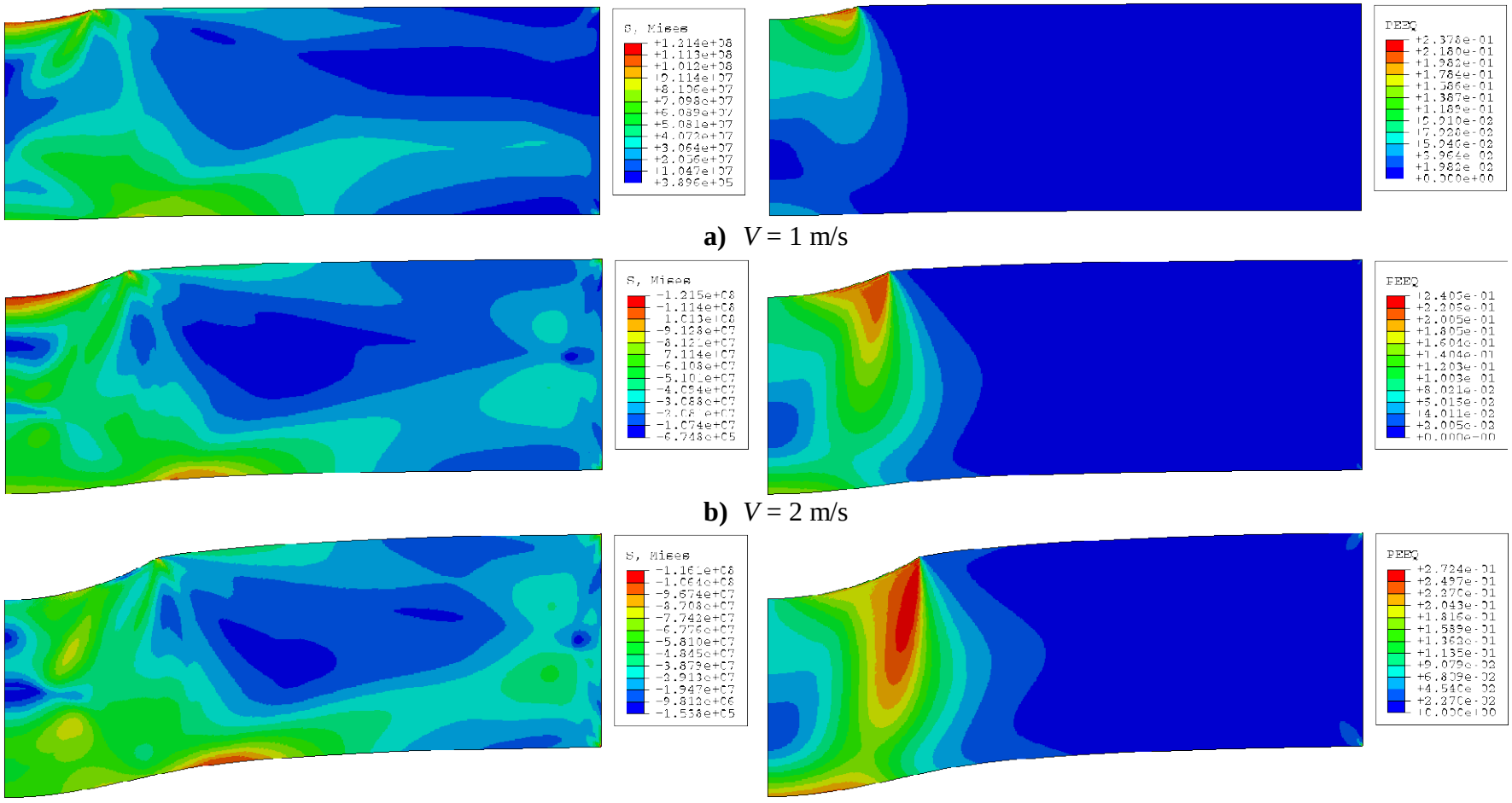
Şekil 3.9. 10.09 J (V = 2 m/s) vurucu enerji seviyesi ve a) V_f = %10, b) V_f = %20 ve c) V_f = %30 hacim oranları için partikül boyutunun (P_s) kinetik enerji ve plastik yutulma enerjileri üzerine etkisi.

Şekil 3.10 takviyesiz bir yapının kesiti boyunca darbe sonrası oluşan kalıcı eşdeğer gerilme σ_{eqv} dağılımları ve eş değer plastik şekil değiştirme ε_{eqv} dağılımları üzerine darbe hızının (V = 1, 2, 3 m/s) etkisini göstermektedir. Kalıcı gerilmeler ve plastik şekil değiştirme dağılımları takviyesiz yapı için uniform bir şekilde değişmektedir. En büyük kalıcı gerilme dağılımı, düşük darbe hızları için takviyesiz yapının üst yüzeyinin hemen altında gözlemlenirken, artan darbe hızıyla yapının arka yüzeyi üzerindeki yüksek deformasyondan düşük deformasyona geçiş bölgesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bunun nedeni, yapının arka yüzeyinin artan darbe hızıyla daha fazla kayma etkisine maruz kalmasıdır. Yüksek bir darbe hızı (vurucu enerjisi) takviyesiz yapı üzerinde bir hayli yüksek bir deformasyon bölgesi oluşturmaktadır ve aynı zamanda takviyesiz yapının merkezi enine yer değiştirmesini de arttırmaktadır. Ayrıca, eşdeğer plastik şekil değiştirme değerleri de vurucu hızının artışıyla artmakta ve plastik şekil değiştirme dağılımı artan plastik deformasyon nedeniyle yatay ve düşey yönde genişlemektedir. Bunun bir sonucu olarak, en büyük plastik şekil değiştirme, vurucu hızının 1 m/s' den 3 m/s' ye artmasıyla 1.146 kat artmaktadır. Maksimum eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı, darbe hızı artarken takviyesiz yapının üst yüzeyinde yüksek deformasyondan düşük deformasyona geçiş bölgesinde oluşmakta ve takviyesiz yapının kesiti boyunca aşağı doğru genişlemektedir.

P_s = 37 μm partikül boyutu ve V_f = %10 partikül hacim oranına sahip olan PTMMK' in darbe sonrası kesiti boyunca matrsite oluşan kalıcı eşdeğer gerilme σ_{eqv} ve eş değer plastik şekil değiştirme ε_{eqv} dağılımları V = 1, 2, 3 m/s darbe hızları için Şekil 3.11' de görülmektedir. Burada kalıcı gerilme ve şekil değiştirme dağılımları verilirken, elastik olmaları nedeniyle gerilme seviyelerini aşırı derecede yükseltmesi ve matris fazdaki gerilme dağılımının görülememesinden dolayı SiC partiküller PTMMK yapılardan çıkarılmıştır. Takviyesiz yapılarla (Şekil 3.10) kıyasla PTMMK yapılarda en büyük kalıcı gerilme dağılımı, kesit boyunca daha yoğun bir şekilde değişmektedir. Metal matris içerisindeki seramik SiC partiküller eşdeğer kalıcı gerilme ve plastik şekil değiştirmeleri önemli bir şekilde etkiler. Ayrıca, darbe hızının artışıyla en büyük kalıcı gerilme dağılımının yoğunluğu, PTMMK yapının özellikle arka yüzeyine doğru yayılmaktadır. PTMMK yapının darbe bölgesi altında bir çok ince enine şekil değiştirme bantları gözlemlenir ve bu şekil değiştirme bantları deformasyon geçiş bölgesi üzerinde yoğunlaşır. Darbe hızının artışı ile birlikte, bu ince enine şekil

değiştirme bantları, deformasyon bölgesinin genişlemesinden dolayı (Şekil 3.15' e bakınız) darbe merkezinden sağa, deformasyon geçiş bölgesine doğru kaymaktadır. En büyük plastik şekil değiştirme, vurucu hızının 1 m/s' den 3 m/s' ye artmasıyla 4.078 kat artmaktadır. Şekil 3.12' de ise sırasıyla P_s = 37 μm ve V_f = %10 partikül boyutu ve hacim oranına sahip olan PTMMK' lerin V = 1 m/s sabit darbe hızı için üç rasgele partikül dağılımında darbe sonrası matrsite oluşan kalıcı eşdeğer gerilme σ_{eqv} ve eş değer plastik şekil değiştirme ε_{eqv} dağılımları verilmiştir. Partikül dağılımının rasgele olması kalıcı gerilme ve şekil değişimi dağılımlarını belirgin bir şekilde olmasa da etkilemektedir.

P_s = 37 μm sabit partikül boyutu ve V = 3 m/s sabit darbe hızı için partikül hacim oranının V_f = %10' dan %30' a artmasıyla metal matristeki en büyük kalıcı gerilme dağılımı, PTMMK yapının kesiti boyunca giderek yoğunlaşmaktadır (Şekil 3.13). En büyük kalıcı gerilme gerilme dağılımı, V_f = %30 partikül hacim oranı için darbe bölgesinin hemen altında PTMMK kesiti boyunca tamamen üniform olmaktadır. Hacim oranının artışı ile birlikte ince enine şekil değiştirme bantları yavaş yavaş kaybolmaktadır. PTMMK yapının rijitliği düşük hacim oranı için daha düşüktür ve darbe yükü çoğunlukla metal matris tarafından taşınmaktadır. Bu nedenle, aynı darbe hızı ve partikül boyutu için metal matris daha yüksek plastik deformasyona maruz kalmakta ve daha fazla darbe enerjisi absorbe etmektedir. Fakat, artan partikül hacim oranı rijitliği arttırır ve darbe yükü çoğunlukla elastik SiC partiküller tarafından taşınmaya başlar. Bu şekilde metal matris de daha az darbe enerjisi absorbe eder. Elastik SiC partiküller darbe esnasında bir hayli yüksek elastik deformasyona maruz kalır ve darbe tamamen bitmeden hemen önce darbe yükünün yapı üzerinden kalkması esnasında elastik partiküller kendi orjinal şekillerine geri dönme eğilimi göstereceklerdir. Fakat, plastik olarak deforme olan metal matris, kendi elastik deformasyonlarını geri verene kadar buna izin verecektir. Bu noktadan sonra, metal matris, seramik SiC partiküller tarafından elastik yüklere maruz kalacaktır. Bu, hacim oranının artmasıyla yapının enine merkezi yer değiştirmesinin azalmasına rağmen (Şekil 3.16' ya bakınız), darbe bölgesindeki metal matriste hem kalıcı gerilmeleri ve hem de plastik şekil değiştirmeleri maksimum seviyeye çıkarmaktadır.

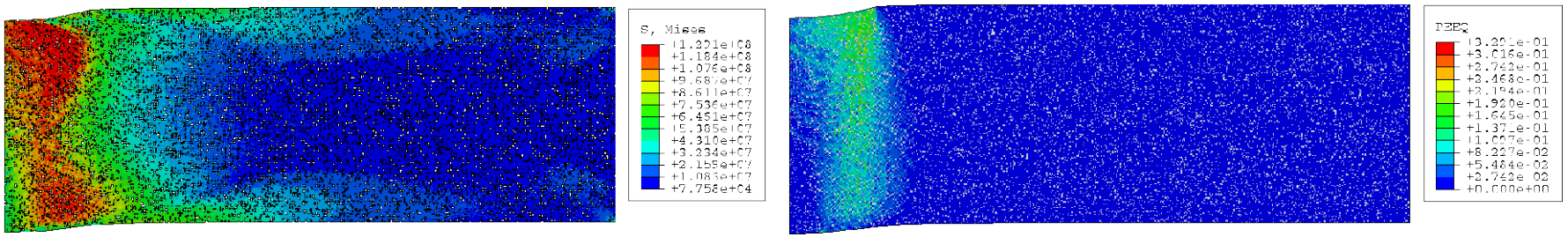


a) V = 1 m/s

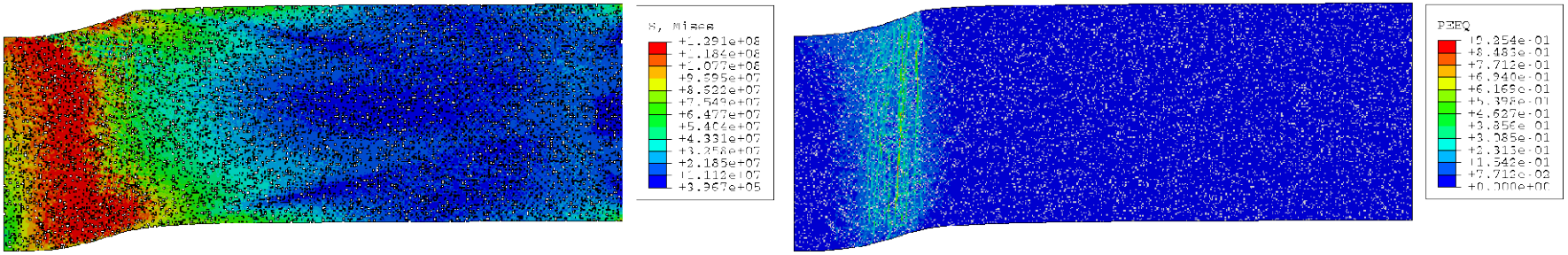
b) V = 2 m/s

c) V = 3 m/s

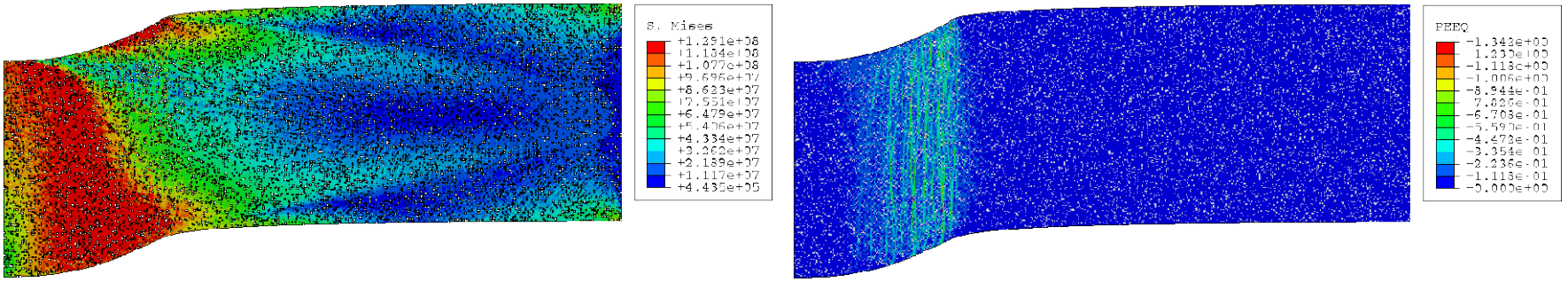
Şekil 3.10. Takviyesiz bir yapıda darbe sonrası oluşan kalıcı eşdeğer gerilme σ_{eqv} (Pa) ve eş değer plastik şekil değiştirme ε_{eqv} dağılımları üzerine darbe hızının (V) etkisi.



a) V = 1 m/s

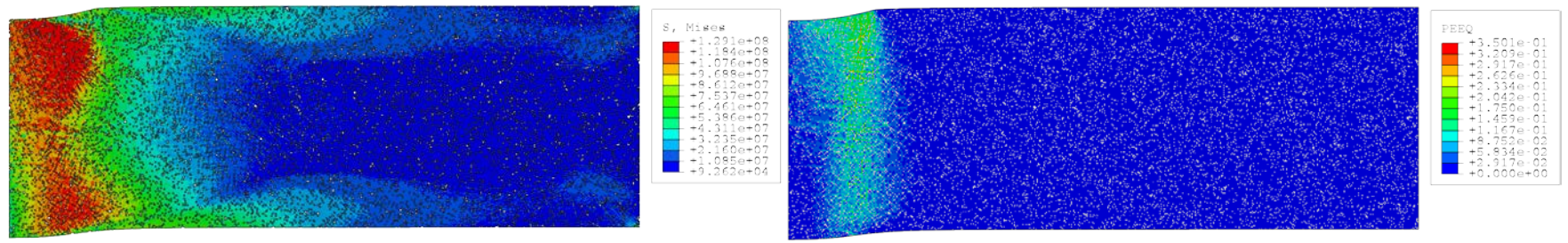


b) V = 2 m/s

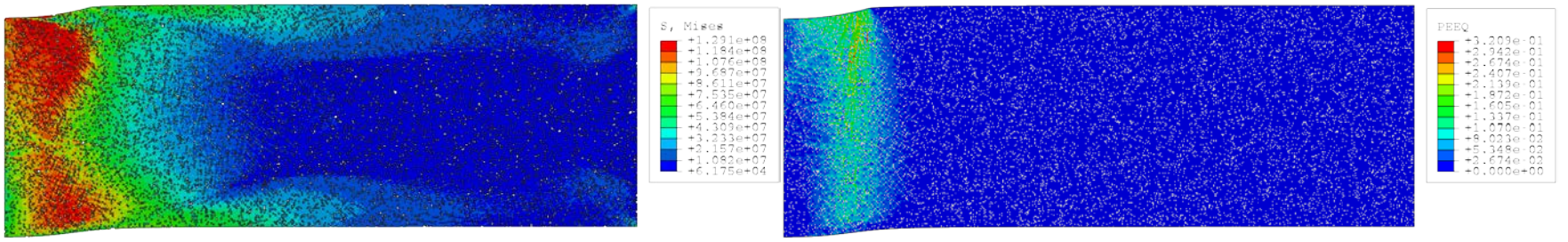


c) V = 3 m/s

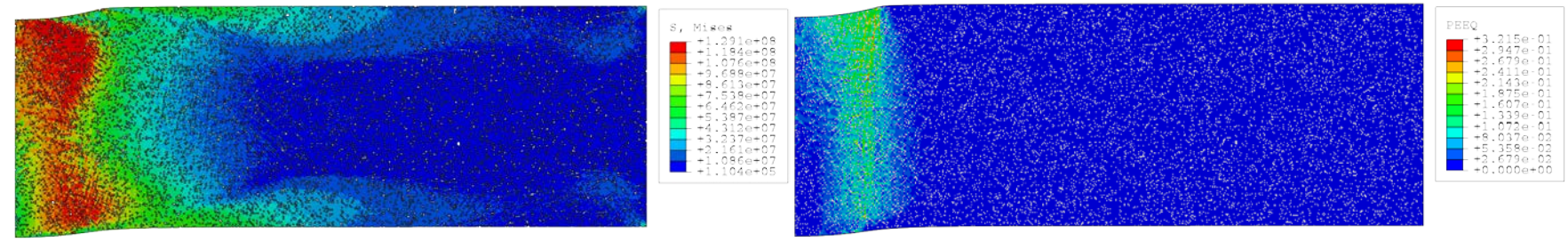
Şekil 3.11. P_s = 37 µm ve V_f = %10 olan PTMMK yapının matrisinde darbe sonrası oluşan kalıcı eşdeğer gerilme σ_{eqv} (Pa)ve eş değer plastik şekil değiştirme ε_{eqv} dağılımları üzerine darbe hızının (V) etkisi.



a) 1. çözüm

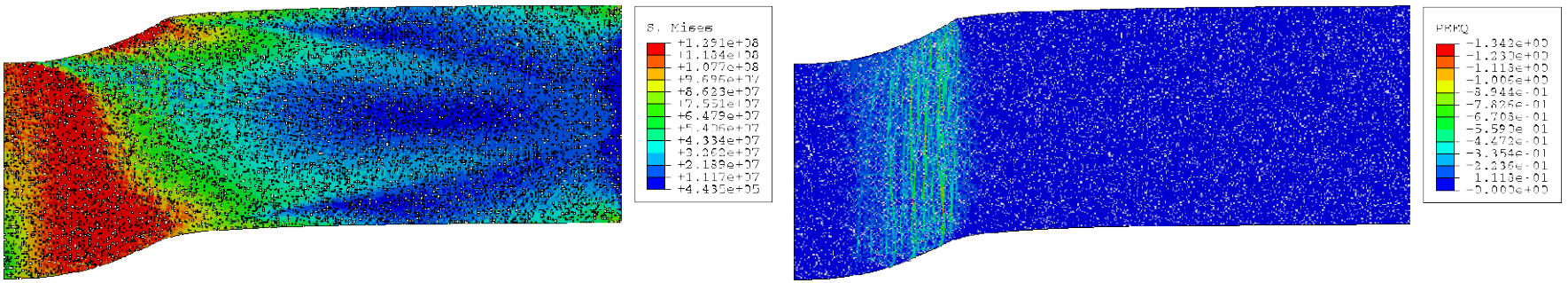


b) 2. çözüm

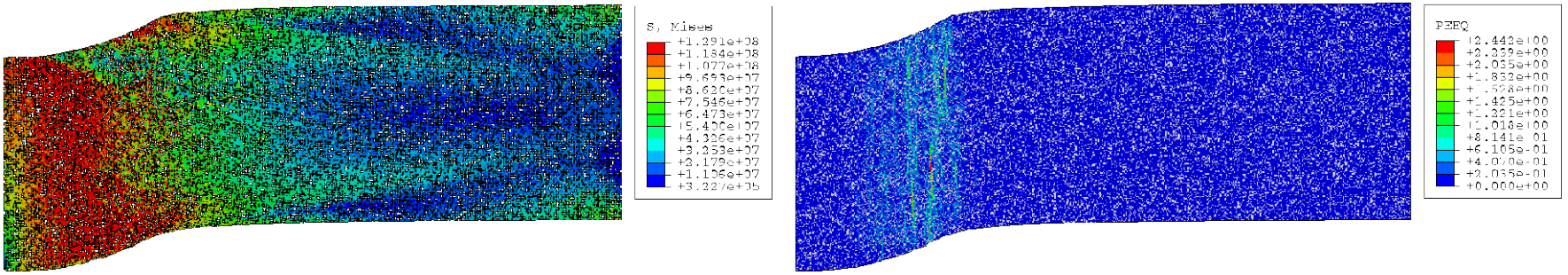


c) 3. çözüm

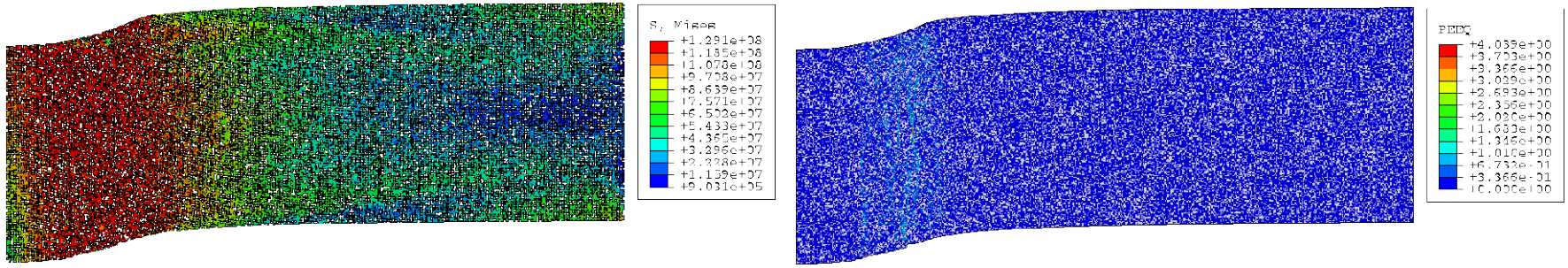
Şekil 3.12. P_s = 37 µm ve V_f = %10 olan üç rasgele partikül dağılımına sahip PTMMK yapının matrisinde V=1 m/s sabit darbe hızı için darbe sonrası oluşan kalıcı eşdeğer gerilme σ_{eqv} (Pa) ve eş değer plastik şekil değiştirme ε_{eqv} dağılımları.



a) V_f = % 10



b) V_f = % 20

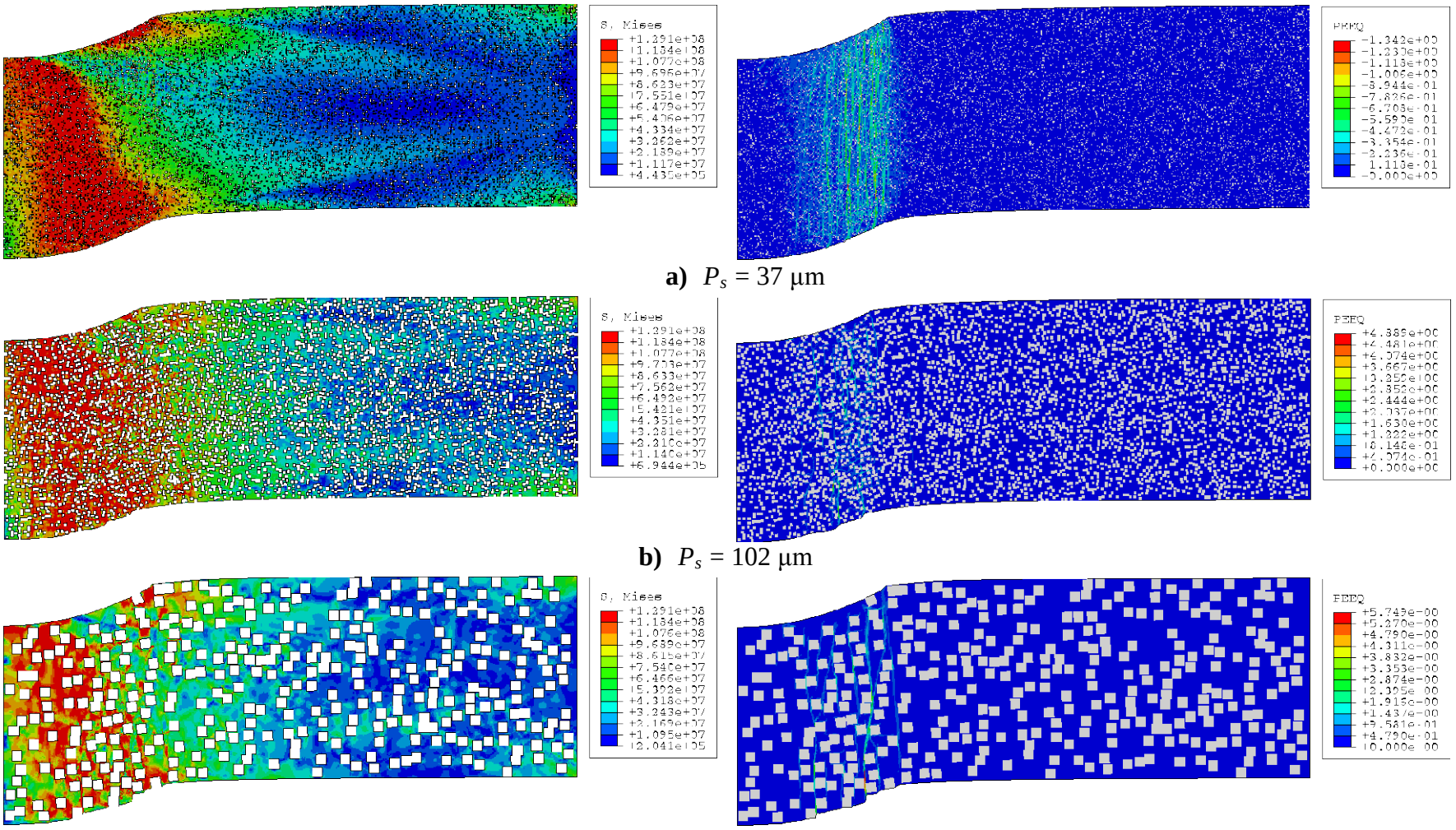


c) V_f = % 30

Şekil 3.13. V = 3 m/s sabit darbe hızı etkisinde ve P_s = 37 µm olan PTMMK yapının matrisinde darbe sonrası oluşan kalıcı eşdeğer gerilme σ_{eqv} (Pa)ve eş değer plastik şekil değiştirme ε_{eqv} dağılımları üzerine partikül hacim oranının (V_f) etkisi.

Şekil 3.14' den açık bir şekilde görüldüğü gibi sabit V_f = %30 hacim oranı ve V = 3 m/s darbe hızı için partikül boyutunun P_s = 37 μm' den 356 μm' ye artması, kalıcı eşdeğer gerilme σ_{eqv} dağılımını etkilemektedir. Artan partikül boyutu, eşdeğer gerilme dağılımını süreksiz yapmaktadır. Darbe bölgesi altındaki en büyük kalıcı gerilme dağılımı yanal ve düşey olarak küçülmektedir. Bununla birlikte, sabit bir partikül hacim oranı ve darbe hızı için partikül boyutu arttıkça PTMMK yapının rijitliği düşmekte ve alüminyum matriste daha fazla deformasyon elde edilmektedir. Bu, metal matrisin yüksek plastik deformasyona maruz kalması ve bu nedenle, seramik SiC partiküllere daha az yük transfer olması anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, partikül boyutu arttışı darbe bölgesinin büyümesine neden olmaktadır (Şekil 3.17' ya bakınız).

P_s = 102 μm partikül boyutu ve V_f = %20 partikül hacim oranına sahip olan PTMMK' lerin farklı vurucu hızlarında deforme olmuş darbe bölgeleri altındaki kesitlerinin TEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) ve SEM (Sonlu Elemanlar Metodu) resimleri Şekil 3.15' de verilmiştir. Artan darbe hızıyla darbe bölgesinin ve enine merkezi yerdeğiştirmenin büyümesi Şekil 3.15' den açık bir şekilde görülmektedir. Darbe hızı ile birlikte vurucu darbe enerjisindeki artış, PTMMK yapıları daha fazla darbe enerjisi absorbe edebilmek için daha fazla kalıcı deformasyona maruz bırakmaktadır. Böylece, darbe hızının artışı temas kuvveti ve darbe süresinin yanı sıra kompozit yapının enine merkezi yer değiştirmesini de arttırmaktadır. Şekil 3.16 ve 3.17' daki TEM ve SEM görüntüleri sırasıyla partikül hacim oranının ve partikül boyutunun PTMMK yapıların deforme olmuş kesitleri üzerine etklerini göstermektedir. Şekil 3.16' da görüldüğü gibi partikül hacim oranı arttıkça PTMMK' ler daha rijit davranış sergilemekte ve bunun sonucu olarak merkezi enine yer değiştirme miktarı düşmektedir. Böylece, PTMMK yapı daha az darbe enerjisi absorbe etmektedir. Bununla birlikte, partikül boyutunun artışıyla PTMMK yapı daha fazla enerji absorbe ederek sünek bir davranış sergilemekte ve bunun yanı sıra merkezi enine yer değiştirme de artmaktadır (Şekil 3.17). Bu sonuçlara göre, partikül hacim oranının artışının PTMMK' lerin darbe dayanımını arttırdığı ve partikül boyutunun artışının ise darbe dayanımını düşürdüğü söylenebilir. Ayrıca, çalışmamızda incelenen partikül boyutu, partikül hacim oranı ve darbe hızı paremetrelerinin tümünün PTMMK' lerin darbe davranışları üzerinde önemli etkileri olduğu sonucuna varılmıştır.

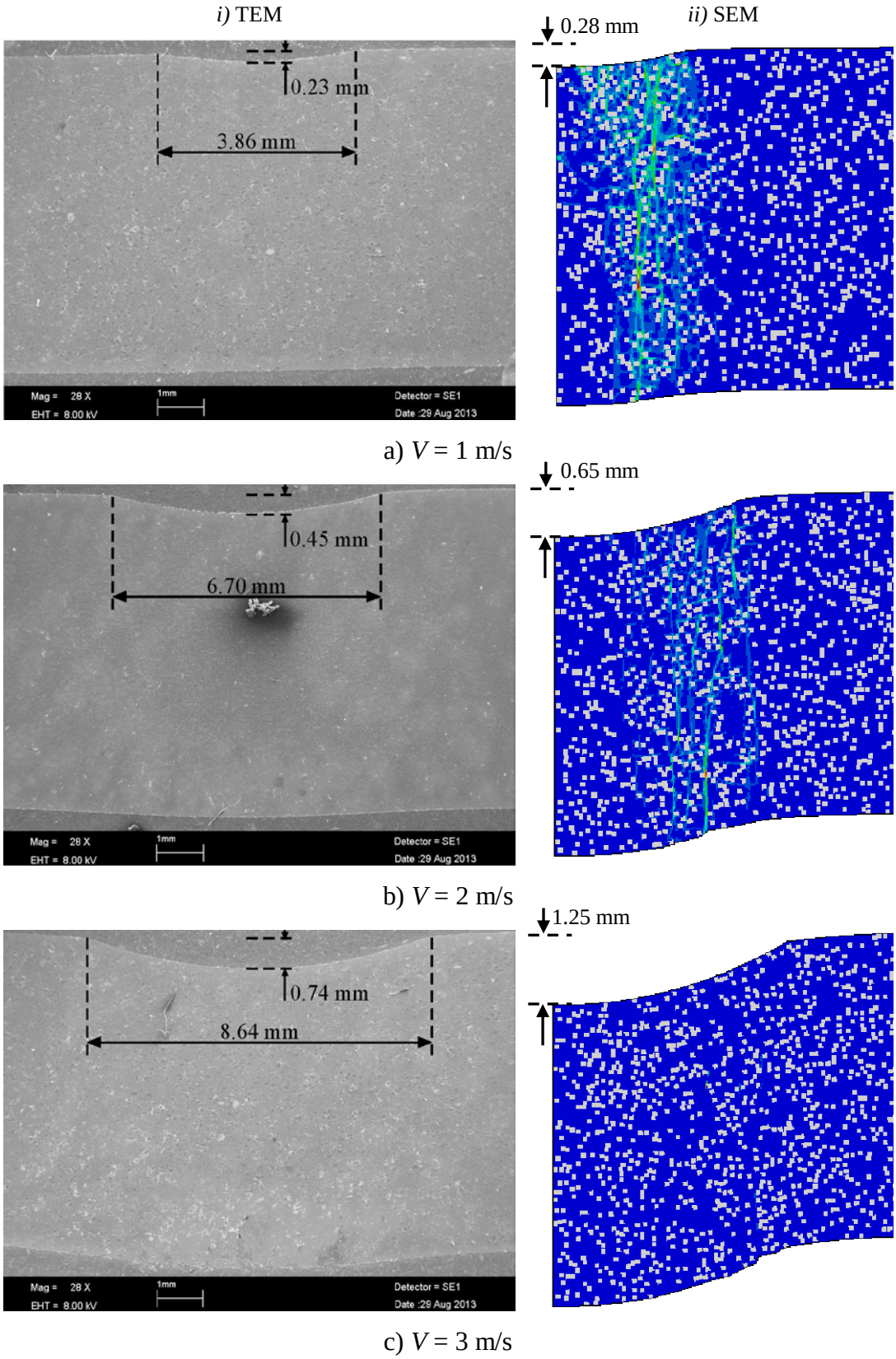


a) P_s = 37 µm

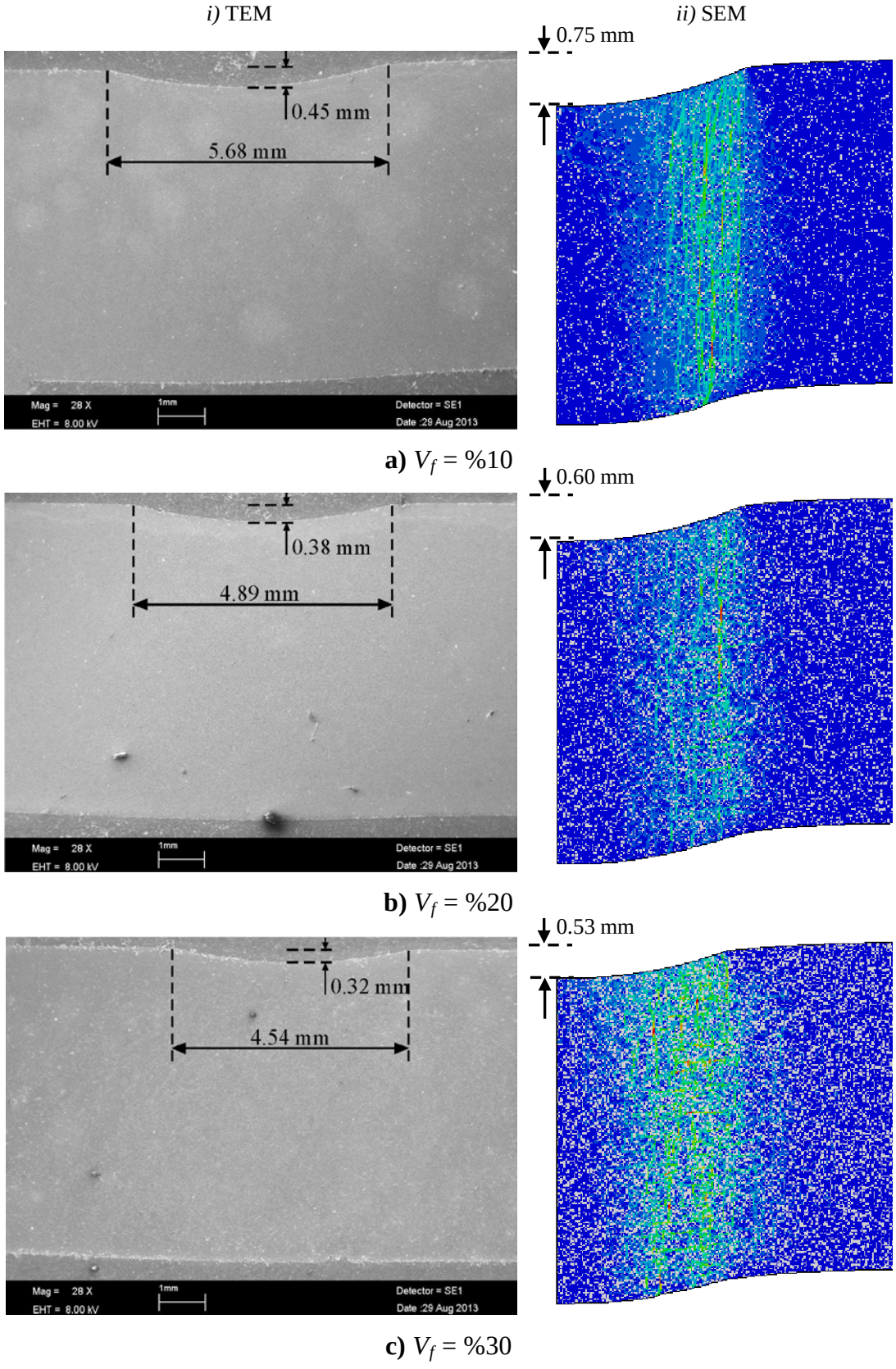
b) P_s = 102 µm

c) P_s = 356 µm

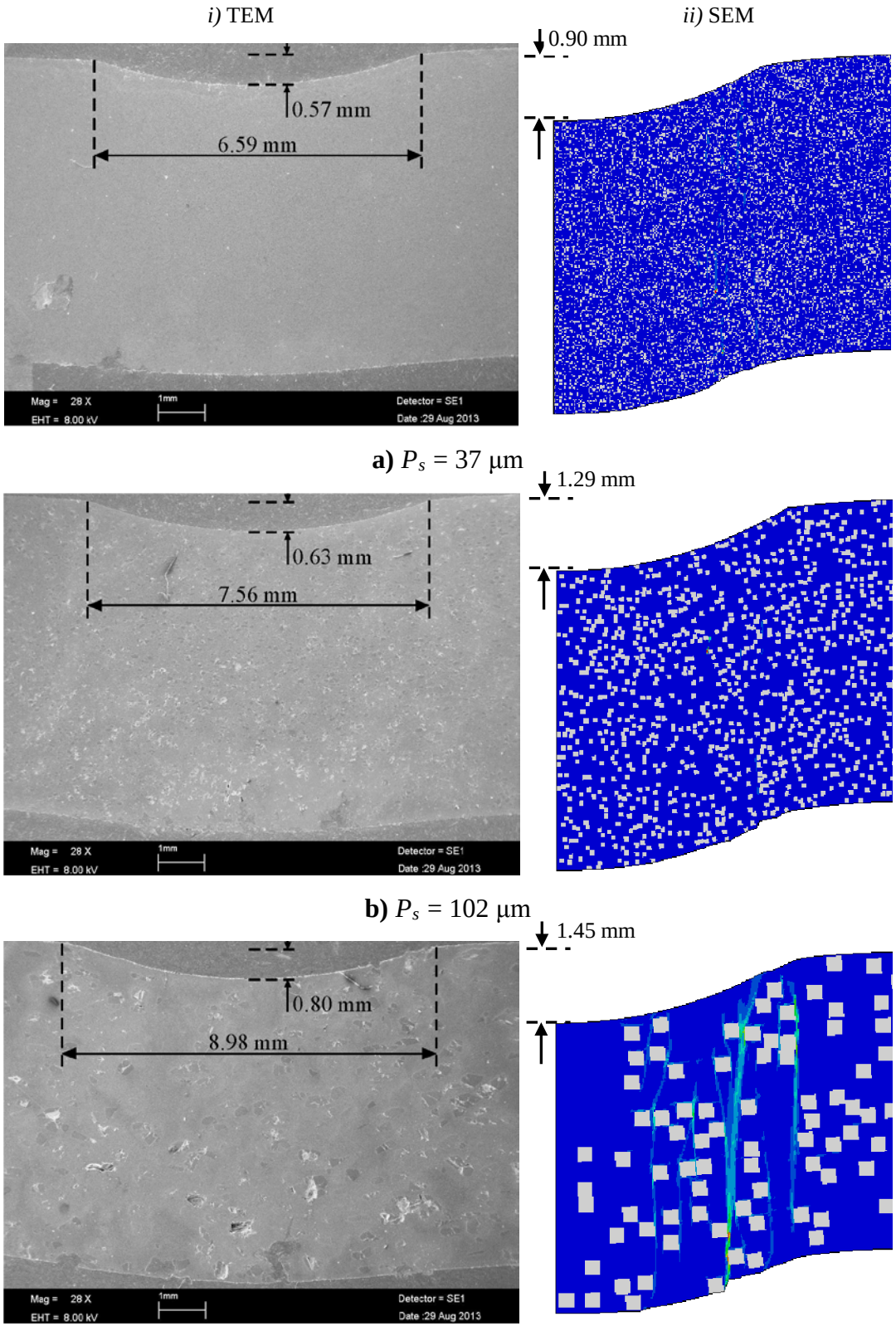
Şekil 3.14. V = 3 m/s sabit darbe hızı etkisinde ve V_f = %30 olan PTMMK yapının matrisinde darbe sonrası oluşan kalıcı eşdeğer gerilme σ_{eqv} (Pa) ve eş değer plastik şekil değiştirme ε_{eqv} dağılımları üzerine partikül boyutunun (P_s) etkisi.



Şekil 3.15. P_s = 102 µm partikül boyutu ve V_f = %20 partikül hacim oranına sahip olan PTMMK' lerin a) V = 1 m/s, b) V = 2 m/s ve c) V = 3 m/s vurucu hızlarında deforme olmuş darbe bölgeleri altındaki kesitlerinin TEM ve SEM görüntüleri.



Şekil 3.16. P_s = 37 µm sabit partikül boyutu sahip olan PTMMK' lerin a) V_f = %10, b) V_f = %20 ve c) V_f = %30 hacim oranları için V = 2 m/s sabit vurucu hızında deforme olmuş darbe bölgeleri altındaki kesitlerinin TEM ve SEM görüntüleri.



Şekil 3.17. V_f = %20 sabit partikül hacim oranına sahip olan PTMMK' lerin a) P_s = 37 µm, b) P_s = 102 µm ve c) P_s = 356 µm partikül boyutları için V = 3 m/s sabit vurucu hızında deforme olmuş darbe bölgeleri altındaki kesitlerinin TEM ve SEM görüntüleri.

4. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Giriş

Bu tez çalışmasında, SiC partikül takviyeli Al 6061 esaslı metal matrisli kompozitlerin düşük hızlı darbe yükleri altında mekanik davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Darbe hızının, partikül hacim oranının ve partikül boyutunun Al 6061/SiC PTMMK' lerin temas kuvveti, plastik yutulma enerjisi, kalıcı gerilme-plastik şekil değiştirme dağılımları ve merkezi enine yer değiştirmeleri üzerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, P_s = 37, 102 ve 356 μm partikül boyutlarına ve V_f = %10, %20 ve %30 partikül hacim oranlarına sahip olan PTMMK' lerin ve karşılaştırma amaçlı kullanılan takviyesiz alaşımların V = 1, 2 ve 3 m/s vurucu hızlarına karşılık gelen E = 2.52, 10.09 ve 22.70 J darbe enerji seviyelerinde deneysel ve sayısal (Sonlu Elemanlar Metodu) düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Vurucu kütlesi deneysel ve sayısal çalışmalarda sabit m = 5.045 kg olarak kullanılmıştır. Düşük hızlı darbe deneylerinde kullanılacak olan numuneler toz metalurjisi yöntemi ile üretilmişlerdir. Deneyler CEAST Fractovis Plus ağırlık düşürme darbe deney düzeneğinde gerçekleştirildiler. Sayısal modelleme ve analiz çalışmaları ABAQUS sonlu elemanlar programında Python programlama dili yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Partikül hacim oranı, partikül boyutu ve darbe hızlarının PTMMK' lerin darbe davranışları üzerine etkileri, deneysel ve sayısal temas kuvveti-zaman diyagramlarının kıyaslanmasıyla değerlendirilmiştir. Bunun yanında, sayısal analizlerden elde edilen zamana bağlı plastik yutulma diyagramları ve kalıcı gerilme ve plastik şekil değiştirme alanlarındaki değişimler, partikül hacim oranı, partikül boyutu ve darbe hızları açısından elde edilen sonuçlar ayrı ayrı tartışılmıştır. Son olarak, düşük hızlı darbe deneylerinden sonra PTMMK numunelerin kalıcı olarak deforme olan bölgelerinden alınan kesitler üzerinde gerçekleştirilen Taramalı Elektron Mikroskop çalışmaları, PTMMK' lerin

deformasyon şekillerini karakterize etmek amacıyla darbe hızı, partikül hacim oranı ve partikül boyutu açısından ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlar ışığında yapılabilecek öneriler genel hatlarıyla aşağıda verilmiştir.

4.2 Sonuçlar

Gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalarda darbe hızının, partikül hacim oranının ve partikül boyutunun PTMMK' lerin darbe davranışları üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu sonucu elde edilmiştir. Buna göre;

1) Bütün numuneler için hem darbe süresi ve hem de en büyük temas kuvveti darbe hızının artışıyla artmaktadır. Ancak, sayısal temas kuvvetleri en büyük değerlerine, deneysel ölçümlerden daha kısa bir sürede ulaşmıştır. Bununla birlikte, en büyük temas kuvveti ve bu kuvvete ulaşma süresi özellikle düşük darbe hızlarında SEM tarafından ihmal edilebilecek bir hatayla başarılı bir şekilde hesaplanmışken, bütün darbe hızları için sayısal ve deneysel darbe süreleri arasında bazı farklar ortaya çıkmaktadır. Takviyesiz alaşımların darbe davranışları PTMMK' lerin davranışlarına benzer bir eğilimle değişmiştir.

2) Sabit bir partikül boyutu için partikül hacim oranı artışı ile birlikte en büyük temas kuvveti artarken toplam darbe zamanı kısalmaktadır. Bu durum küçük partikül boyutlarında daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Çünkü, partikül boyutu arttıkça kompozit yapı daha sünek bir hal almakta ve darbe dayanımları da takviyesiz alaşımlarınkine yakın değerler alarak düşmektedir.

3) Sabit bir hacim oranı için partikül boyutunun artışıyla en büyük temas kuvvetinin düştüğü, fakat darbe süresinin uzadığı yüksek hacim oranlarında daha belirgin olacak şekilde gözlenmiştir. Küçük partikül boyutlarında PTMMK yapılar daha rijit bir davranış sergilemektedirler. Bunun en önemli nedeninin küçük partikül boyutlarında rijitliği yüksek olan SiC partiküllerin matris içerisine daha sık aralıklarla yayılması ve matristen takviye SiC faza yük aktarımının yüksek olması olduğu düşünülmektedir.

4) Darbe enerjisi veya vurucu hızının artışıyla absorbe olan enerji seviyesinde önemli bir artış olmaktadır. Partikül hacim oranı (V_f) artışıyla PTMMK' lerin giderek rijitleşmesinden dolayı, plastik yutulma enerji seviyesi düşmekte ve vurucu kinetik enerjisi daha kısa bir sürede absorbe edilmektedir. Rijitliği düşük olan takviyesiz alaşımlar en yüksek plastik yutulma enerjisine sahiptir ve PTMMK' lerle kıyaslandığında daha yüksek kinetik enerjiyi plastik deformasyon olarak absorbe etmektedirler. Ayrıca, partikül boyutunun (P_s) artmasıyla rijitliğin düşmesi nedeniyle vurucu kinetik enerjisi, PTMMK' ler tarafından daha uzun bir sürede absorbe edilirken plastik yutulma enerji seviyesi artmaktadır.

5) Kalıcı gerilmeler ve plastik şekil değiştirme dağılımları takviyesiz yapı için uniform bir şekilde değişmektedir. En büyük kalıcı gerilme dağılımı, artan darbe hızıyla yapının arka yüzeyi üzerindeki yüksek deformasyondan düşük deformasyona geçiş bölgesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Artan darbe hızı takviyesiz yapı üzerinde giderek büyüyen bir deformasyon bölgesi oluşturmakta ve eşdeğer plastik şekil değiştirme değerleri ile birlikte plastik şekil değiştirme dağılımı yatay ve düşey yönde büyümektedir.

6) PTMMK yapılarda en büyük kalıcı gerilme dağılımı, kesit boyunca daha yoğun bir şekilde değişmektedir. SiC takviye partiküller eşdeğer kalıcı gerilme ve plastik şekil değiştirmeleri önemli bir şekilde etkilemektedir. Ayrıca, darbe hızının artışıyla en büyük kalıcı gerilme dağılımının yoğunluğu, PTMMK yapının özellikle arka yüzeyine doğru yayılmaktadır ve darbe bölgesi altında ince enine şekil değiştirme bantları oluşmaktadır. Darbe hızının artışı ile birlikte, en büyük plastik şekil değiştirme önemli derecede artmaktadır.

7) Partikül hacim oranının artmasıyla metal matristeki en büyük kalıcı gerilme dağılımı, PTMMK yapının kesiti boyunca giderek yoğunlaşarak giderek üniform bir hal almaktadır. Hacim oranının artışı ile birlikte ince enine şekil değiştirme bantları yavaş yavaş kaybolmaktadır. Düşük hacim oranı için darbe yükü çoğunlukla metal matris tarafından taşınmaktadır ve bu nedenle, aynı darbe hızı ve partikül boyutu için metal matris daha yüksek plastik deformasyona maruz kalmaktadır. Fakat, PTMMK yapı içersindeki elastik SiC partiküllerin darbe sonrası yük boşaltma etkisinden dolayı, hacim

oranının artmasıyla darbe bölgesindeki metal matriste hem kalıcı gerilmeleri ve hem de plastik şekil değiştirmeleri maksimum seviyeye çıkarmaktadır.

8) Partikül boyutunun artışı, eşdeğer gerilme dağılımını süreksiz yapmaktadır. Darbe bölgesi altındaki en büyük kalıcı gerilme dağılımı küçülmektedir. Ayrıca, sabit bir partikül hacim oranı ve darbe hızı için partikül boyutu arttıkça PTMMK yapının rijitliği düşmekte ve bu, metal matrisin yüksek plastik deformasyona maruz kalması anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, partikül boyutu arttışı darbe bölgesinin büyümesine neden olmaktadır.

4.2.2 Öneriler

Darbe hızının artışı, yapının merkezi enine yer değiştirmesini de arttırmaktadır. Partikül hacim oranı arttıkça PTMMK' lerde merkezi enine yer değiştirme miktarı düşmektedir. Böylece, PTMMK yapı daha az darbe enerjisi absorbe etmektedir. Bununla birlikte, partikül boyutunun artışıyla PTMMK yapı daha fazla enerji absorbe ederek sünek bir davranış sergilemekte ve bunun yanı sıra merkezi enine yer değiştirme de artmaktadır. Buna göre, partikül hacim oranının artışının PTMMK' lerin darbe dayanımını arttırdığı ve partikül boyutunun artışının ise darbe dayanımını düşürdüğü sonucu ön plana çıkmaktadır. Fakat, bu sonucun hangi partikül boyutu ve özellikle hangi hacim oranı değerine kadar geçerlilik göstereceği veya yeni sonuçlara ulaşılıp ulaşılamayacağı yapılacak ilave çalışmalarla belirlenebilir. Bununla birlikte, darbe hızı parametresi daha yüksek değerlerde PTMMK yapıda hasarı arttıracağı için sayısal analizlerin buna uygun bir hasar modeli ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

1. Chawla, N., Chawla, K. K., 2006. Metal Matrix Composites. Springer, New York, 401 pp.

2. Chawla, K. K., 1997. Composite Materials-Science and Engineering-2nd ed. Springer, New York, 483 pp.

3. Lloyd, D.J., 1994. Particle Reinforced Aluminium and Magnesium Matrix Composites. **International Materials Reviews, 39** (1): 1-21.

4. Bhanuprasad, V.V., Bhat, R.B.V., Kuruvilla, A.K., Prasad, K.S., Pandey, A.B., Mahajan, Y.R., 1991. P/M Processing of Al-SiC Composites. **The International Journal of Powder Metallurgy, 27** (3): 227-235.

5. Ibrahim, I.A., Mohammed, F.A., Javernia, E.J., 1991. Particulate Reinforced Metal Matrix Composites-A Review. **Journal of Materials Science, 26** (5): 1137-1156.

6. Srivatsan, T.S., Ibrahim, I.A., Mohammed, F.A., Javernia, E.J., 1991. Processing Techniques for Particulate-Reinforced Metal Aluminium Matrix Composites. **Journal of Materials Science, 26** (22): 5965-5978.

7. Li, M., Ghosh, S., Richmond, O., Weiland, H., Rouns, T.N., 1999. Three Dimensional Characterization and Modeling of Particle Reinforced Metal Matrix Composites: Part I: Quantitative Description of Microstructural Morphology. **Materials Science and Engineering A, 265** (1-2): 153-173.

8. Li, M., Ghosh, S., Richmond, O., Weiland, H., Rouns, T.N., 1999. Three Dimensional Characterization and Modelling of Particle Reinforced Metal Matrix Composites: Part II: Damage Characterization. **Materials Science and Engineering A, 266** (1-2): 221-240.

9. Ayyar, A., Chawla, N., 2006. Microstructure-Based Modeling of Crack Growth in Particle Reinforced Composites. **Composites Science and Technology, 66** (13): 1980-1994.

10. Chawla, N., Chawla, K.K., 2006. Microstructure-Based Modeling of the Deformation Behavior of Particle Reinforced Metal Matrix Composites. **Journal of Materials Science, 41** (3): 913-925.

11. Ceyhun, V., Turan, M., 2003. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı. **Mühendis ve Makina Dergisi, 44** (516): 35-41.

12. Sjoblem, P. O., Hartness, J. T., Cordell, T. M., 1988. On Low Velocity Impact Testing of Composite Materials. **Journal of Composite Materials, 22** (1): 30-52.

13. Shivakumar, K. N., Elber, W., Illg, W., 1988. Prediction of Low Velocity Impact Damage in Thin Circular Laminates. **American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA Journal), 23** (3): 442-449.

14. Carol, I., Lopez, C. and Roa, O., 2001. Micromechanical Analysis of Quasi-Brittle Materials Using Fracture-Based Interfae Elements. **International Journal for Numerical Methods in Engineering, 52** (12): 193-215.

15. http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/composites/comp_intro.cfm

16. Arsenault R. J., 1984. The Strengthening of Aluminum Alloy 6061 by Fiber and Platelet Silicon Carbide. **Material Science Engineering, 64**: 171–181.

17. McDaneals D.L., 1985. Analysis of Stress, Strain, Fracture and Ductility Behavior of Al Matrix Composite Containing Discontinuous SiC Reinforcement. **Metallurgical and Materials Transactions A, 16A**: 1105–1115.

18. Clyne, T. W. and Withers, P. J., 1993. An Introduction to Metal Matrix Composites. Cambridge University Press, Cambridge.

19. Sakthivel, A., Palaninathan, R., Velmuruganb, R., Rao, P. R., 2011. The Effect of Silicon Carbide Particulates on Tensile, Fatigue, Impact and Final Fracture Behaviour of 2618 Aluminium Alloy Matrix Composites. **International Journal of Aerospace Innovations, 3:** 193-205.

20. Tirtom, I., Guden, M. and Yildiz H., 2008. Simulation of The Strain Rate Sensitive Flow Behavior of SiC-Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites. **Computational Materials Science, 42:** 570–578.

21. Deshmanya, I. B. and Purohit, G. K., 2011. Development of Models for Predicting Impact Strength of Al 7075/Al_2O_3 Composites Produced by Stir-Casting. **International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies, 11**: 238–252.

22. Kim, H.J., Kobayashi, T. and Yoon H.S., 1992. Micromechanical Fracture Process of SiC Particulate Reinforced Al Alloy 6061-T6 MMCs. **Materials Science and Engineering A, 154**: 35–41.

23. Bhattacharyya, J.D., Bowis, M.E., Gregory, J.T., 1992. The Influence of Alumina Microsphere Reinforcement on the Mechanical Behavior and Weldability of an Al Metal Matrix Composite, pp.49-56, *In: Proceedings of The Machining Composite Materials Symposium, ASM Materials wWeek*, 1-5 Nov, Chicago, IL, USA.

24. Prewo, K.M., 1982. The Impact of Fibre and Particulate Reinforced MMCs, pp.181-194. *In: Proceedings Conference on Mechanical Behavior of Metal Matrix Composites, 111th AIME Annual Meeting*, Dallas, TX, USA.

25. Hasson, D. F., Hoover, S. M., Crowe, C. R., 1985. Effect of Thermal Treatment on the Mechanical and Toughness Properties of Extruded SiC_w/Aluminium 6061 Metal Matrix Composites. **Journal of Materials Science, 20** (11): 4147-4154.

26. Unsworth, J. P. and Bandyopadhyay, S., 1994. Effect of Thermal Ageing on Hardness, Tensile and Impact Properties of An Alumina Microsphere-Reinforced Aluminium Metal-Matrix Composite. **Journal of Materials Science, 29** (17): 4645-4650.

27. Ahlatci, H., Candan, E., Çimenoğlu, H., 2002. Effect of Particle Size on the Mechanical Properties pf 60 vol. % SiCp Reinforced Al Matrix Composites. **Zeitschrift fur Metallkunde, 93** (4): 330-333.

28. Ellis, Y. L. and Lewandowski, J. J., 1994. Effects of Layer Thickness on Impact Toughness of Al/Al-SiC_p Laminates, **Materials Science and Engineering A, 183** (1-2): 59-67.

29. Surappa, M. K., Sivakumar, P., 1993. Fracture Toughness Evaluation of 2024-Al/Al_2O_3 Particulate Composites by Instrumented Impact. **Composites Science and Technology, 46** (3): 287-292.

30. Bonollo, F., Ceschini, L., Garagnani, G. L., 1997. Mechanical and Impact Behaviour of (Al_2O_3)p/2014 and (Al_2O_3)p/6061 Al Metal Matrix Composites in the 25-200 °C Range. **Applied Composite Materials, 4**: 173-185.

31. Ozden, S., Ekici, R., Nair, F., 2007. Investigation of Impact Behaviour of Aluminium Based SiC Particle Reinforced Metal–Matrix Composites. **Composites: Part A, 38** (2) :484–494.

32. Wang, F., Ma, N., Li, Y., Li, X., Wang, H., 2011. Impact Behavior of in Situ TiB_2/Al Composite at Various Temperatures. **Journal of Materials Science, 46**: 5192-5196.

33. ABAQUS/Standart (Ver. 6.8-1), SIMULIA Dassault Systemes, www.simulia.com, 2008.

34. www.matweb.com.

35. Python Programming Language, www.python.org.

36. Ekici, R., 2009. Metal Matrisli Kompozitlerin Batma Altında Mekanik Davranışlarına Mikroyapının Etkisi. Erciyes Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Doktora tezi, 154 s.

37. Apalak, M.K., Ekici, R., Yildirim, M., Nair, F., 2009. Effects of Random Particle Dispersion and Particle Volume Fraction on the Indentation Behavior of SiC Particle-Reinforced Metal Matrix Composites, **Journal of Composite Materials, 43**: 3191-3210.

38. Ekici, R., Apalak, M.K., Yildirim, M., Nair, F., 2010. Effects of Random Particle Dispersion and Size on the Indentation Behavior of SiC Particle-Reinforced Metal Matrix Composites, **Materials & Design, 31**: 2818-2833.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Musa KABURCUK
Uyruğu: Türkiye (TC)
Doğum Tarihi ve Yeri: 22 Mart 1986 , SİVAS
Medeni Durumu: Bekâr
Tel: 0506 288 25 21
email: mskbrck@gmail.com
Yazışma Adresi: Mavi Bulvar Yeşilyurt mah. 71249 sok. no:17/2
Dadak plaza B blok kat:9 D:17 Seyhan / ADANA

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	EÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği	2008
Lise	Borsa Lisesi	2003

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2010	Binart Yapı Ltd.Şti.	Proje Mühendisi
2011	Özler Doğalgaz Ltd.Şti.	Proje Mühendisi
2012-…	Akcan Holding(Shell Madeniyağ Dist.)	Madeniyağ Teknik Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Ekici R., Kaburcuk M., **(in press)** "Low-Velocity İmpact behavior of Al 6061/SiC Particulate Metal Matrix Composites"**, Journal of Composite Materials.**