

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇEKİRDEĞİ FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ
SANDVIÇ PLAKALARIN DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ
ALTINDAKİ MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
İsmail ÖZKEŞ**

**Danışman
Doç. Dr. Recep GÜNEŞ**

Yüksek Lisans Tezi

**Ağustos 2013
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇEKİRDEĞİ FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ
SANDVIÇ PLAKALARIN DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ
ALTINDAKİ MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

**Hazırlayan
İsmail ÖZKEŞ**

**Danışman
Doç. Dr. Recep GÜNEŞ**

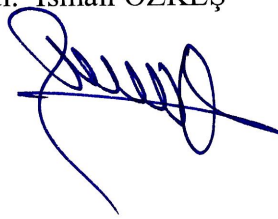
**Ağustos 2013
KAYSERİ**

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: İsmail ÖZKEŞ

İmza :

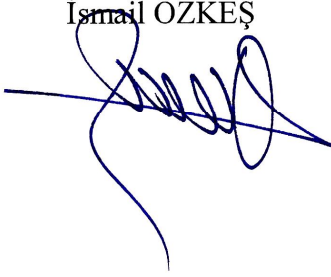


YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Çekirdeği Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Düşük Hızlı Çarpma Yükleri Altındaki Mekanik Davranışlarının İncelenmesi” adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

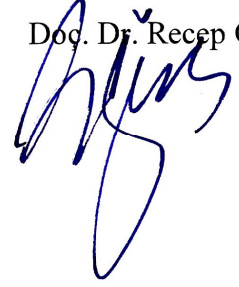
Tezi Hazırlayan

İsmail ÖZKEŞ



Danışman

Doç. Dr. Recep GÜNEŞ



Makine Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. İbrahim UZMAY

Doç. Dr. Recep GÜNEŞ danışmanlığında **İsmail ÖZKEŞ** tarafından hazırlanan “**Çekirdeği Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Düşük Hızlı Çarpma Yükleri Altındaki Mekanik Davranışlarının İncelenmesi**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

15.08.2013

JÜRİ:

Başkan : Prof. Dr. M. Kemal APALAK.....



Üye : Doç. Dr. Recep GÜNEŞ.....



Üye : Doç. Dr. Fehmi NAİR.....

**ONAY:**

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 10/09/2013 tarih ve 2013/39-22 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

10 / 09 / 2013

Prof. Dr. Esim DEŞLİOĞLU
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca her konuda bana yardımcı olan ve yönlendiren, mesaisinin önemli bir kısmından bana vakit ayıran danışmanım Doç. Dr. Recep Güneş hocama, deneysel çalışmalarım sırasında laboratuvar imkânlarını bana sunan ve her aşamada bilgisini esirgemeyen Doç. Dr. Fehmi Nahir hocama, deneysel çalışma sırasında deneyimlerini bana aktaran Öğr. Gör. Murat Aydın hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca her konuda yanında olan ailem, iş arkadaşlarıma desteklerinden dolayı en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

İsmail ÖZKEŞ

Kayseri, Ağustos 2013

ÇEKİRDEĞİ FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ SANDVİÇ PLAKALARIN DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDAKİ MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

İsmail ÖZKEŞ

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ağustos 2013
Danışman: Doç. Dr. Recep GÜNEŞ**

ÖZET

Bu çalışmada, çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların düşük hızlı çarpma yükleri altındaki mekanik davranışları deneysel olarak incelenmiştir. İki farklı (metal-seramik) yapıdan oluşan çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka, alt ve üst yüzeyleri yüzde yüz metal (Al) ve bu yüzeyler arasında metal ve seramik (SiC) bileşenlerin hacimsel oranlarının kalınlık boyunca kademeli olarak değiştirildiği yapıda üretilmiştir. Üretimi yapılan numunelere üst ve alt yüzeylerinden düşük hızlı çarpma testleri yapılmıştır. Deneyler CEAST marka çarpma test cihazı ile yapılarak kuvvet-zaman ve enerji-zaman grafikleri çizilmiştir. Darbe testleri sonrası numunelerin metalografik ve mikromekanik incelemeleri yapılmıştır. Yapılan metalografik ve mikromekanik incelemeler sonucunda numune kesiti boyunca malzeme kompozisyonundaki değişimin teorik karışım kuralına uygun olarak sağlandığı görülmüştür.

Üst yüzeyden yapılan çarpma testleri ($v = 4\text{m/s}$) sonucunda $n = 10.0$ malzeme kompozisyonuna sahip plakada çatlak hasarı oluşurken alt yüzeyden yapılan testler sonucunda ise $n = 1.0$ ve $n = 10.0$ malzeme kompozisyonlarına sahip plakalarda çatlak hasarları oluştu. Darbenin üst yüzey tarafından yapılması ile plaka kalınlığı boyunca iletilen yük dalgası plakanın alt tarafındaki sünek metal-zengin yüzey tarafından karşılanmaktadır. Bu durum plakada oluşacak hasara karşı yapıyı daha dirençli kılmaktadır. Ayrıca fonksiyonel kademelendirilmiş yapının alt ve üst yüzeylerden sünek saf metal katmanlar ile desteklenmesi çarpma hasarına karşı yapının fonksiyonel bütünlüğünün korunmasında önemli bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fonksiyonel kademelendirilmiş malzeme; sandviç yapı; düşük hızlı çarpma testi; metalografik inceleme; mikromekanik inceleme.

**INVESTIGATIONS ON MECHANICAL BEHAVIOUR OF SANDWICH
PLATES WITH FUNCTIONALLY GRADED CORE UNDER LOW-VELOCITY
IMPACT LOADS**

İsmail ÖZKEŞ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, August 2013

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Recep GÜNEŞ

ABSTRACT

In this study, the mechanical behavior of sandwich plates with functionally graded core under low-velocity impact loads was investigated experimentally. Sandwich plate with functionally graded core have two different structures (metal-ceramic), and the upper and lower surfaces are pure metal (Al) and the internal layers of the plate are manufactured with gradually varying material composition through the plate thickness. The low-velocity impact tests were conducted on both upper and lower surfaces of specimens using CEAST low-velocity impact device, and the contact force-time and the energy-time graphs were plotted. Metallographic and micromechanical examinations were carried out on the specimens after impact tests. As a result of the metallographic and micromechanical examinations, the material composition variation through the specimen thickness was obtained in accordance with the rule of the theoretical mixture.

As a result of impact tests ($v = 4\text{m/s}$) on upper surface, crack damages occurs on the plates with $n = 10.0$ material composition whereas the specimens with $n = 1.0$ and $n = 10.0$ material compositions have crack damages after impact tests on its lower surfaces. Impact force on the ceramic-rich upper surface provides to meet the transferred load waves through the plate thickness by metal-rich bottom surface. This situation makes the structure more resistant against to damage. Moreover, the upper and lower surfaces of the functionally graded structure reinforced by ductile pure metal layers provides an important contribution to protection of functional integrity of the structure against to damage.

Keywords: Functionally graded materials; sandwich structure; low-velocity impact test; metallographic analysis; micromechanical analysis.

İÇİNDEKİLER

ÇEKİRDEĞİ FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ SANDVIÇ PLAKALARIN DÜŞÜK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDAKİ MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

	<u>Sayfa</u>
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

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. Giriş	4
1.2. Literatür Araştırması	4

2. BÖLÜM

KARIŞIM TEORİSİ VE DENEYSEL YÖNTEM

2.1. Giriş	11
------------------	----

2.2. Karışım Teorisi	11
2.3. Deneysel Yöntem	12

2.3.1 Numune Geometrisi ve Tasarımı	12
2.3.2 Numunelerin Üretilmesi	14
2.3.3 Düşük Hızlı Çarpışma Testleri	17

3. BÖLÜM

DENEYSEL BULGULAR

3.1. Giriş	20
3.2. Düşük Hızlı Darbe Testi Bulguları	20
3.3. Metalografik ve Mikromekanik Bulgular	44

3.3.1. Malzeme Kompozisyonunun Etkisi	46
3.3.2. Vurucu Enerjisinin Etkisi	51

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma	66
4.2 Sonuçlar ve Öneriler	66

KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ.....	74

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş plakayı oluşturan bileşenlerin mekanik özellikleri.....	13
Tablo 2.2. Çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş plaka katmanlarını oluşturan seramik (SiC) ve metal (Al) bileşenlerin hacim ve ağırlık oranları.	15

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka	11
Şekil 2.2. Fonksiyonel kademelendirilmiş bölgede çeşitli n değerleri için seramik fazın hacimsel oranı	12
Şekil 2.3. Çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka geometrisi	13
Şekil 2.4. Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka üretimi için kullanılan sıcak pres ünitesi	14
Şekil 2.5. Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka üretimi için sıcak iş çeliğinden (AISI 2344) imal edilmiş kalıp sistemi	16
Şekil 2.6. CEAST Fractovis ağırlık düşürme darbe cihazı	17
Şekil 2.7. Anti-rebound sistem	18
Şekil 2.8 Çarpma cihazı nunune bağlantı aparatı.	18
Şekil 3.1. Seramik-zengin üst yüzeylerinden çarpmaya maruz çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) dairesel sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 10.09 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg) ...	22
Şekil 3.2. Metal-zengin alt yüzeylerinden çarpmaya maruz çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) dairesel sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 10.09 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg)	23
Şekil 3.3. Saf metal plakalar ile çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel sandviç plakalarda düşük hızlı çarpma sonrası oluşan kalıcı izler (vurucu enerjisi = 10.09 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg)	24
Şekil 3.4. Seramik-zengin üst yüzeylerinden çarpmaya maruz çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) dairesel sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).	25
Şekil 3.5. Metal-zengin alt yüzeylerinden çarpmaya maruz çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) dairesel sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg)	26

Şekil 3.6. Saf metal plakalar ile çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel sandviç plakalarda düşük hızlı çarpma sonrası oluşan kalıcı izler (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).....	27
Şekil 3.7. Seramik-zengin üst yüzeylerinden çarpmaya maruz çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) dairesel sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 40.36 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg)	29
Şekil 3.8. Metal-zengin alt yüzeylerinden çarpmaya maruz çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) dairesel sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 40.36 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg)	30
Şekil 3.9. Saf metal plakalar ile çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel sandviç plakalarda düşük hızlı çarpma sonrası oluşan kalıcı izler (vurucu enerjisi = 40.36 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).....	31
Şekil 3.10. Seramik-zengin üst yüzeylerinden çarpmaya maruz fonksiyonel kademelendirilmiş ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) dairesel plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).....	33
Şekil 3.11. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların üst yüzeylerinden yapılan düşük hızlı çarpma testleri sonrası plakalarda oluşan kalıcı izler (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).....	34
Şekil 3.12. Metal-zengin alt yüzeylerinden çarpmaya maruz fonksiyonel kademelendirilmiş ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) dairesel plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).....	35
Şekil 3.13. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların alt yüzeylerinden yapılan düşük hızlı çarpma testleri sonrası plakalarda oluşan kalıcı izler ve hasarlar (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg)	36
Şekil 3.14. Üst yüzeylerinden çarpmaya maruz metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).....	37

- Şekil 3.15. Alt yüzeylerinden çarpmaya maruz metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).....39
- Şekil 3.16. Üst yüzeylerinden çarpmaya maruz lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg)40
- Şekil 3.17. Alt yüzeylerinden çarpmaya maruz lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg)41
- Şekil 3.18. Üst yüzeylerinden çarpmaya maruz seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).....42
- Şekil 3.19. Alt yüzeylerinden çarpmaya maruz seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).....43
- Şekil 3.20. Darbe deneyinden sonra metallografik analiz için numuneden kesit alınması..45
- Şekil 3.21. Vurucu enerjisi 22.7 Joule ile üst yüzeyden darbeye maruz bırakılmış metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyona sahip numunenin çarpma sonrası kesit görüntüsü.....47
- Şekil 3.22. Üst yüzeyden 22.7 Joule vurucu enerjisi ile darbeye maruz bırakılmış ve Şekil 3.21’de gösterilen metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip numunenin çarpma sonrası kesit görüntüsünün ayrıntıları.48

Şekil 3.23. Vurucu enerjisi 22.7 Joule iken üst yüzeyden darbeye maruz bırakılmış lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyona sahip numunenin çarpma sonrası kesit görüntüsü.....	49
Şekil 3.24. Üst yüzeyden 22.7 Joule vurucu enerjisi ile darbeye maruz bırakılmış ve Şekil 3.23’ de gösterilen lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunenin çarpma sonrası kesit görüntüsünün ayrıntıları	50
Şekil 3.25. Seramik partikül çevresinde Al partiküllerin tane görüntüsü.....	51
Şekil 3.26. Vurucu enerjisi 22.7 Joule iken üst yüzeyden darbeye maruz bırakılmış seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyona sahip numunenin çarpma sonrası kesit görüntüsü ve ayrıntıları	52
Şekil 3.27. Lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunelerde darbe sonrası yüzeylerde oluşan kalıcı deformasyonların kesit ve üst görüntüleri. Vurucu enerjisi a) 10.09 J, b) 22.7 J ve c) 40.36 J	53
Şekil 3.28. Metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip numuneye alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası oluşan hasarlar (vurucu enerjisi= 22.7 Joule).....	55
Şekil 3.29. Lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunede alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası oluşan hasar (vurucu enerjisi = 22.7 Joule)	56
Şekil 3.30. Seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunede alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası oluşan hasar (vurucu enerjisi = 22.7 Joule).....	57
Şekil 3.31. Seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunede alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası kırılma hasarları (vurucu enerjisi = 40.36 Joule).....	58
Şekil 3.32. Lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numuneye alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası kesit görüntüsü (vurucu enerjisi = 10.09 Joule) ..	59
Şekil 3.33. Lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numuneye alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası numune kesitinde oluşan hasar (vurucu enerjisi = 40.36 Joule).....	60
Şekil 3.34. Matriks yapı içerisindeki kılcal çatlaklar (Şekil 3.33-A bölgesinin ayrıntısı)...	61
Şekil 3.35. Üst yüzeylerinden çarpmaya maruz fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların çarpma testi sonrası kesit görüntüleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).....	62

- Şekil 3.36. Alt yüzeylerinden çarpmaya maruz fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların çarpma testi sonrası kesit görüntüleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg)..... 63
- Şekil 3.37. a) metal-zengin ($n = 0.1$), b) lineer ($n = 1.0$) ve c) seramik-zengin ($n = 10.0$) numunelere kalınlık boyunca yapılan HR_T sertlik ölçüm izleri..... 64
- Şekil 3.38. a) metal-zengin ($n = 0.1$), b) lineer ($n = 1.0$) ve c) seramik-zengin ($n = 10.0$) numunelere kalınlık boyunca yapılan HR_T sertlik ölçüm değerleri..... 64

GİRİŞ

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, makro seviyede iki farklı malzemenin (genellikle seramik ve metal) önceden belirlenmiş bir kompozisyona göre birleştirilerek belli bir doğrultuda sürekli bir geçişin sağlandığı kompozit yapılardır. Geleneksel malzemeler homojen yapı ve özelliklere sahip iken, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler farklı iki fazın arzu edilen üstün özellikleri arasında bir uzlaşmayı sağlamaktadır. Şöyleki, bir metalin tokluğu ile bir seramiğin ısıya dayanıklılığı; metal ve seramik fazların birleştirilmesiyle elde edilen yeni yapıda üstün bir özellik olarak elde edilmiş olur [1]. Yani bu iki malzemenin de istenilen özelliklerinin kullanılması ve istenmeyen özelliklerinin etkilerinin azaltılması veya işlevsiz hale getirilmesi ile olur. Böylece oluşturulan yeni yapının bir tarafında seramiğin aşınmaya ve ısıya karşı direncinden istifade edilirken, yapının diğer yüzeyinde ise metalin tokluğu ve mukavemetinden yararlanılır. Aynı zamanda fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerde seramik ve metal katmanlar arasındaki ara bölümdeki sürekli geçiş sayesinde, katmanlı kompozit yapılarda ortaya çıkan katmanlar arası artık gerilmeler de minimize edilmiş olur.

Yüksek sertlik ve mukavemet sağlayan seramik katman ile tokluk sağlayan metal katman arasındaki kadelendirilmiş bölgeden oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş yapılarda seramik yüzeyin tokluğu yapılan metal-seramik kademelendirmesi ile artırılmış olur. Böylece üstün özelliğe sahip yeni bir malzeme kombinasyonu elde edilmiş olur. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler zorlu çalışma koşullarında da oldukça önemli uygulamalara sahiptirler. Örneğin aşındırıcı parçacıkların bulunduğu ortamlarda, roketlerin ısı kalkanlarında, ısı eşanjör tüplerinde, termo-elektronik jeneratörlerde, ısı motorlarının parçalarında, füzyon reaktörlerinin plazma yüzeylerinde ve elektrik yalıtımında kullanılmaktadırlar [1]. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzeme fikri ilk olarak 1984 yılında Japonya’da yapılan bir uzay aracı projesinde kesiti 10 milimetrenin altında ve 1000-2000 K aralığında sıcaklığa maruz yüzeylerde ısıya

dayanıklı malzeme üretmek amacıyla ortaya çıkmıştır. O zamandan beri fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve günümüzde hemen hemen ticari gerçekliğe ulaşmıştır [1].

Bununla beraber birçok aşırı ortam uygulamaları için fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerde daha fazla kütleye ihtiyaç duyulmaktadır. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerde kademelendirilmiş ara bölgenin kalınlığı milimetrelerden santimetrelere kadar başarılı bir şekilde üretilebilmektedir. Fakat, fonksiyonel kademelendirilmiş bölge kalınlığının daha fazla olduğu ve daha büyük kütleli yapılar ile ilgili çalışmalar henüz teorik düzeyde sürdürülmektedir. Literatürde kalınlığı fazla olan ve daha fazla kütleli fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin modellenmesi ile ilgili teorik çalışmaların fazla olmasına karşın bu tip FGM yapıların üretimi ve bunlarla ilgili deneysel çalışmaların sayısı oldukça sınırlı kalmaktadır. Bununla birlikte ticari olarak bu yapıların düşük maliyetli üretimleri konusunda çalışmalar devam etmektedir [1]. Son yapılan araştırmalar ile Sydney Üniversitesinde geliştirilen IDR (Impeller Dry Blending) metodu ile fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler seri olarak daha ucuz maliyet ile üretilebilmektedir. Bu yöntem ile düşük üretim maliyeti ve hızlı üretim, milimetreden santimetreye kadar istenilen ürün kalınlığı, kademelenmiş bölgede yüksek seviye kontrolü, düzenli ve devamlı kademelendirme imkanı sağlanabilmektedir [1,2].

Sandviç yapılar özel bir sınıf kompozit olup üç ana yapıdan oluşurlar, bunlar çekirdek, iki adet yüzey plakaları ve çekirdek ile yüzey plakalarını birleştiren yapıştırıcı tabakalarıdır. Genellikle çekirdek düşük sertliğe sahip gözenekli yada hava boşluklu yapıdan oluşurken takviye amaçlı kullanılan yüzey plakaları daha sert yapılı olarak seçilir. Bu kompozit yapıların özelliği sadece çekirdek malzemesinden veya yüzey plakalarından yapılmış kırılganlara göre daha yüksek kesme gerilmesi mukavemetine sahip olmalarıdır [3,4].

Yüksek teknolojik malzemelerin araştırılması, geliştirilmesi ve üretilmesi yüksek teknoloji uygulamaların önünü açacaktır. Bilindiği gibi askeri teknolojideki rekabet, denizcilik, havacılık sanayinde ihtiyaç duyulan malzemelerdeki özgül mukavemet değerleri, bazı şartlarda aşınmaya veya ısıya dayanıklılık, geleneksel malzemelerin dışında daha özel yapıya sahip malzemelerin ve dolayısıyla kompozit yapıların araştırılıp geliştirilmesini gerektirmektedir. Böylece fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler ve sandviç yapıların kompozit malzemeler içerisinde sahip olduğu özelliklerin ortaya konması ve araştırılması oldukça önem arz etmektedir.

Yapılan literatür çalışmasıyla dünya genelinde bu tür malzemeler için yapılmış çalışmalar, kullanılan deneysel metotlar, test teknikleri, geliştirilen analiz yaklaşımları incelenmiş ve yapılan bu çalışmanın literatüre katkı sağlayacak şekilde ortaya konması sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç yapıların düşük hızlı çarpma yükleri altındaki mekanik davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla farklı malzeme kompozisyonlarına sahip ($n = 0.1, 1, 10$) alt ve üst yüzeyleri %100 alüminyum ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç yapıların sırasıyla farklı çarpma hızları $v = 2, 3$ ve 4 m/s karşılık gelen 10.09, 22.7 ve 40.36 Joule vurucu enerjilerinde mekanik cevapları araştırılmıştır. Numuneler Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kompozit Malzemeler Araştırma Laboratuvarında üretilerek, düşük hızlı çarpma deneyleri Mekanik Laboratuvarındaki CEAST marka düşük hızlı çarpma test cihazında yapılmıştır.

Bu tez çalışması dört bölümden oluşmuştur. Genel girişten sonra birinci bölümde literatür araştırması yapılarak fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, sandviç yapılar ve düşük hızlı çarpışma testi ile ilgili yapılan çalışmalar özetlenmiştir. İkinci bölümde çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların üretimi ve deneysel metod açıklanmıştır. Üçüncü bölümde deneylerden elde edilen veriler ışığında sonuçlar irdelenmiştir. Dördüncü bölümde ise sonuçlar ve değerlendirme verilmiştir.

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1 Giriş

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler havacılık, otomotiv, denizcilik ve uzay sanayinde uygulama alanlarına sahip olan yüksek teknoloji malzemeleridir. Bu kapsamda bu tür malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi ve geliştirilmesi, aynı zamanda dünya ölçeğindeki gelişmelerin takip edilmesi, ülkemiz açısından da yukarıda sıralanan sektörlerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Yapılan literatür araştırmasında kompozit sandviç yapıların düşük hızlı darbe davranışları konusuna ağırlık verilmiştir. Genel olarak yapılan çalışmalarda malzemelerin elastik sınırlar içindeki gerilme davranışlarının ve enerji sönümleyebilme kabiliyetlerinin araştırıldığı görülmüştür. Bunun yanında yapılan birçok çalışma deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması şeklinde ortaya konmuştur. Ayrıca bazı çalışmalarda çarpma ve sanki-statik yükleme sonuçlarının karşılaştırılması da yapılmıştır. Bu yaklaşımlar ile kompozit yapıların birçok kombinasyonlarında çalışmalar yapılarak en uygun malzeme kombinasyonu bulunmaya çalışılmıştır. Bölüm 1.2’de yukarıda bahsedilen konularda yapılan çalışmalar detaylı olarak irdelenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Belingardi ve Vadiro [5] cam-elyaf takviyeli, katmanlı kompozit plakaların düşük hızlı çarpışma davranışlarını incelediler. Çalışmalarında uygun kompozit yapıların tespiti için çarpışma testlerinden elde edilen kinetik enerji dağılımlarını inceleyerek bir sınıflandırma yapmaya çalıştılar. Bunun için tek yönlü ve örülmüş katmanları üç farklı kombinasyonda katmanlayarak elde ettikleri kompozit plakaları kullandılar. Dairesel kenarlarından ankastre olarak mesnetlemişmiş numuneler için deneysel testleri ASTM standartlarına göre ağırlık düşürme test makinasında yaptılar. Malzemelerin darbe davranışlarını tanımlamak amacıyla hasarın oluştuğu andaki absorbe edilen enerjiyi ve

çarpma kuvveti ile hasar anındaki absorbe edilen maksimum enerji ve çarpma kuvveti değerlerini dikkate alarak bunlara ait grafikleri detaylı olarak sundular. Belingardi ve Vadiro [6] önceki çalışmalarını hem sanki-statik hem de dinamik çarpma yükleri altındaki karbon-fiber takviyeli kompozit yapılar için genişlettiler. Burada ilaveten farklı plaka kalınlıklarının etkilerininide incelediler.

Kim ve Chung [7] tren gövdesinde kullanılacak tabakalı kompozitlerin düşük hızlı çarpma yüklerine karşı cevabını çalıştılar. Gövdede kullanılan kompozit, çekirdeği alüminyum balpeteği ve takviye plakaları ise örme kompozit plakalardan oluşan sandviç bir yapıya sahiptir. Çalışmalarında darbe yükleri için karakteristikleri ve hasar mekanizmalarını değerlendirmek için düşük hızlı çarpma testleri gerçekleştirdiler.

Bueno ve diğerleri [8] tek fazlı alüminyum oksit ve alüminyum oksit-alüminyum titanit yekpare kompozit seramiklerin darbe davranışlarını araştırdılar. Numunelere düşük hızlı darbe testi yapıldıktan sonra kalıcı mukavemeti değerlendirmek için daha sonra numunelere dört nokta eğme testi yaptılar. Darbe esnasında tek fazlı yapıya göre kompozitlerin daha fazla enerji absorbe ettiklerini tespit ettiler ve buna bağlı olarak kompozit yapıların darbe sonrası mukavemetlerinin tek fazlı yapılara göre daha üstün olduğunu belirlediler.

Tita ve diğerleri [9] düşük hızlı darbe yüklerine maruz ince kompozit disklerin hasar analizlerini sayısal ve deneysel olarak çalıştılar. Çalışmalarında katmanlamanın ve darbe enerjisinin etkilerini araştırdılar. Düşük hızlı çarpma deney sonuçlarını batma testinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırdılar. Ayrıca batma testleri için sonlu elemanlar metodunda Hill modelini kullanarak simülasyonlar da gerçekleştirdiler.

Aryaei ve diğerleri [10] vurucu bilya çaplarının düşük hızlı çarpma testi sonrasında numunelerin düzelme katsayısı ve enerji kayıp yüzdeleri üzerindeki etkilerini sayısal ve deneysel olarak incelediler. Çelikten ve alüminyumdan yapılmış vurucu bilyaların çapları 6 ile 12 mm arasında değişmekte olup yine çelik ve alüminyumdan yapılmış plakalar üzerine düşürüldüler. Sonuç olarak vurucu bilya çapı büyüdükçe düzelme katsayısının azaldığını gösterdiler.

Wang ve diğerleri [11] karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit yapıların artık çekme mukavemetini ve düşük hızlı çarpma karakteristiklerini sayısal ve deneysel olarak araştırdılar. Hasar simülasyonları için Hashin ve Yeh hasar kriterlerini Abaqus sonlu elemanlar yazılımına bir kullanıcı alt programı ile dahil ettiler. Bu metodu kullanarak

temas kuvveti ve çekme mukavemeti değerleri doğru şekilde değerlendirildi. Farklı çarpışma enerjilerinden sonra iki farklı çekme hasar modu, üç farklı artık çekme mukavemeti modu olduğunu tespit ettiler.

Lin ve diğerleri [12] çeşitli nano partikül katılmış polimer reçine esaslı kompozitlerin düşük hızlı çarpma testleri konusunda çalıştılar. Nano partiküllerin yapı içerisinde homojen bir şekilde dağılımıyla kompozit yapının mekanik özelliklerinde belirgin bir iyileşme olduğunu ve buna bağlı olarak yapının çekme mukavemetinde de iyileşme olduğu sonucuna vardılar.

Vaidya ve diğerleri [13] çok fonksiyonlu sandviç kompozitlerin üretimi ve çarpmaya karşı yüksek şekil değiştirme cevabının araştırılması konusunda çalıştılar. Çalışmalarında balpeteği içerisine Z-pimler ile takviyelendirilmiş köpük dolgu yaparak elde ettikleri sandviç yapıyı kullandılar. Bu tasarımı geleneksel sandviç yapılara göre elektronik bileşenlerin yapıya bağlanabilmesi, yapının enine rijitliğinin artması ve titreşim sönümleme konusunda daha toleranslı olması gibi daha fonksiyonel özellikler sağlaması nedeniyle önerdiler.

Gustin ve diğerleri [14] düşük hızlı çarpmaya maruz ve çarpma yüzeyinde takviye plakaların Kevlar/karbon fiber ve hibrit/karbon fiber kombinasyonlarına sahip sandviç kompozitlerin darbe, darbe sonrası basınç ve çekme rijitliği özelliklerini incelediler. Sandviç kompozitin alt yüzeydeki takviye plaka yüksek esneklik sağlaması bakımından tamamen karbon fiber olarak tasarladılar. Bu çalışmanın temel amacını çarpma yüzeyindeki takviye plakanın karbon fiber ile Kevlar veya hibrit katmanlardan oluşturulmasının sandviç yapının darbe özelliklerinde meydana getireceği iyileştirmeyi tespit etmek olarak ortaya koydular.

Palazotto ve diğerleri [15] düşük hızlı çarpma yükleri altında Z-fiber takviyeli sandviç panellerin hasar karakteristiklerini araştırdılar. Çalışmalarında iki farklı doğrultuya sahip Z-fiber açısını dikkate aldılar. Darbe testlerini sarkaç tipi vurucuya sahip darbe test cihazında çok düşük enerji seviyelerinde gerçekleştirdiler. Sandviç plakalarda gözlenebilen hasarın başladığı eşik enerji seviyelerini deneysel olarak belirlediler. Ayrıca mukayese amacıyla numunelere statik batma testleride yaptılar.

Mahmoudabadi ve Sadighi [16] quasi-statik ve düşük hızlı çarpma yükleri altında metal altıgen balpeteği yapıların ezilmelerini teorik ve deneysel olarak incelediler. Sundukları teorik modeller eksenel yönde uygulanan quasi-statik ve düşük hızlı darbe yüklerine

maruz farklı iç çaplara ve hücre et kalınlıklarına sahip üç tip balpeteğinden elde edilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldı. Teorik ve deneysel sonuçlar arasında mükemmel bir uyum gözlemlendi.

Herup ve Palazotto [17] grafit/epoksi katmanlı kompozit takviye plakalı ve Nomex balpeteği çekirdekli sandviç plakaların düşük hızlı çarpma yükleri altındaki hasar başlangıçlarını araştırdılar. Çalışmalarında hem düşük hızlı çarpma hem de statik batma testleri uyguladıkları çekirdeği Nomex balpeteği yapılı ve yüzeyde grafit/epoksi kompozit plaka takviyeli sandviç yapılarda takviye plakanın kalınlığı ve yükleme değerlerinin oluşan hasar karakterleri üzerindeki etkilerini incelediler. Çarpışma sırasında oluşan kuvvet değişimi ve ortaya çıkan enerjiyi kaydederek enerji değişiminin hasar oluşumunda etkili olduğunu gösterdiler. Statik batma ve çarpma testlerinde oluşan hasarların benzer olduğu gözlemlenirken, statik batma testinde hasarın başladığı kuvvet değerinin düşük hızlı darbe testindekinden daha küçük olduğu sonucuna vardılar. Bu iki farklı yükleme durumu için oluşturulan grafiklerde bu farklılıkları tartıştılar ve takviye plaka kalınlığının artmasıyla statik ve düşük hızlı darbe testleri arasındaki farkında arttığını gözlemlediler.

Dear ve diğerleri [18] farklı ağırlıklardaki kompozit takviye malzemelerin ve balpeteği sandviç panellerin darbe dayanımlarını araştırdılar. Farklı kombinasyonlardaki takviye plaka ve çekirdek yapılarında hazırlanan sandviç panelleri ağırlık düşürme darbe cihazıyla test ederek, çalışmalar neticesinde kullanım alanına göre düşük ağırlıklı ve yüksek mukavemetli sandviç yapıları araştırdılar.

Park ve diğerleri [19] Nomex balpeteği çekirdekli (kalınlığı: 10 mm ve 20 mm) ve iki farklı yapıdaki (karbon/epoksi ve cam/epoksi) takviye plakalı sandviç yapıların düşük hızlı çarpma yükleri altındaki hasar dirençlerini araştırdılar. Ağırlık düşürme çarpma cihazıyla oluşturulan hasarı incelemek için taramalı akustik mikroskop (scanning acoustic microscope = SAM) cihazını kullandılar. Çalışmalarında sandviç yapıların hasar direncinin tanımlanmasında kuvvet ve enerjinin zamana göre değişimleri kullanılarak çarpma hasar parametreleri elde edilmiş ve bu parametreler kullanılarak düşük hızlı çarpma yükü altında çekirdeğin ve takviye plakaların hasar direnci üzerindeki etkilerini incelediler.

Castanie ve diğerleri [20] düşük enerjili ve düşük hızlı çarpmaya maruz metal takviye plakalı Nomex bal peteği çekirdekli sandviç yapıların modellenmesi konusunda

çalıştılar. Önceki çalışmalarında [21] lineer olmayan yay sistemi kullanarak modelledikleri bal peteği çekirdek yapının keskin uçlu vurucular için uygun olmadığını tespit ettiler. Ayrıca bal peteğinin modellenmesinde yay elemanların kullanılmasıyla sandviç yapının eğilmesi esnasında enine kaymaların hesaplanamadığı sonucuna da vardılar. Bu eksikliklerin üstesinden gelmek için bu çalışmalarında çok düzeyli bir yaklaşım sundular. Şöyle ki; sandviç yapıyı Mindlin plaka elemanları kullanarak modellerken sandviç yapı ile vurucu arasına yerleştirilen bir nonlinear yaya uygulanan hesaplamalı temas yasası kullandılar. Böylece metal takviyeli sandviç yapıların düşük enerjili ve düşük hızlı çarpmaya karşı dinamik yapısal cevabını iyi bir korelasyon ile tahmin ettiler.

Schubel ve diğerleri [22] basit mesnetli PVC köpük çekirdekli ve örme-karbon/epoksi takviye plakalı sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışlarını incelediler. Testler ile plakaların yük dağılımlarını ve plakalardaki hasar oluşumlarının nasıl meydana geldiğini ortaya koydular. Ayrıca dinamik çarpma testleriyle karşılaştırma yapmak için eşdeğer plakalara merkezi noktasal sanki-statik yükleme testleri de yaptılar. Diğer çalışmalarında Schubel ve diğerleri [23] önceki çalışmalarındaki hasarlı paneller üzerinden darbe sonrası basınç değerlerini ölçtüler. Daha sonra hasarlı numunelerde oluşan basma mukavemetlerini hasarsız numunelerinkiler ile karşılaştırdılar ve elde ettikleri sonuçların sandviç yapıların hasar toleransları için kullanılabilir olduğu sonucuna vardılar.

Yu ve diğerleri [24] alüminyum köpük çekirdekli sandviç kirişlerin, quasi-statik ve düşük hızlı çarpma davranışlarını incelediler. Sandviç yapıların deformasyon ve hasar davranışları araştırıldı. Hasar modu ve yük değişimi, modifiye edilmiş Gibson modeli kullanılarak hesaplandı ve elde edilen sonuçların quasi-statik deney verileri ile uyumlu olduğunu belirlendi. Darbe yüklemesine maruz kirişlerin hasar modlarının ve kırılma süreçlerinin sanki-statik yüke maruz kirişlerinki ile benzer olduğunu, fakat kuvvet-yerdeğiştirme değişiminin ise çok farklı olduğunu belirlediler. Buna göre, 5 m/sn'den küçük darbe hızlarında sandviç kirişlerin başlangıç dinamik hasarlarının modellenmesinde sanki-statik modelin başarılı olduğunu ifade ettiler.

Yapılan literatür incelemesinde fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin düşük hızlı darbe davranışları konusunda yapılan çalışmalar aşağıda değerlendirilmiştir.

Gong ve diğerkleri [25] düşük hızlı çarpma nedeniyle fonksiyonel kademelendirilmiş silindirik kabukların dinamik tepkilerinin analitik çözümünü sundular. Apetre ve diğerkleri [26] çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş bir sandviç yapının düşük hızlı çarpma problemini çözdüler. Neticede verilen bir çarpma enerjisi için sandviç yapının orta kısmındaki maksimum şekil değıştirmenin önemli derecede azaltılabileceğini gösterdiler. Böylece, çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç yapılarda çarpma hasarının minimize edilebileceği sonucuna vardılar. Kubair ve Lakshmana [27] çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş katmanlı kompozit kirişlerin düşük hızlı çarpma hasarını nümerik olarak incelediler. Hasarın başlaması ve ilerlemesini simüle etmek için karışık mod yapıştırıcı bölgesi modeli kullandılar. Yaptıkları parametrik simülasyonlar ile kiriş merkezinde fonksiyonel kademelendirilmiş yapının kullanılmasıyla hasar enerjisinin değıştirilebileceği sonucuna vardılar. Etemadi ve diğerkleri [28] çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç levhaların düşük hızlı çarpma yükleri altındaki üç boyutlu sonlu eleman simülasyonunu yaptılar. Çalışmalarında vurucu hızı, kinetik enerji ve levha boyutlarının etkilerini ayrı ayrı incelediler. Çarpma yükü altında çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç levhalar ile çekirdeği homojen olan sandviç levhaların düşük hızlı darbe davranışlarını kıyasladılar ve sonuç olarak çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç levhalarda temas kuvvetinin daha yüksek olduğunu, buna karşın yerdeğıştirmenin daha düşük olduğunu gösterdiler. Larson ve diğerkleri [29] metal-seramik fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların düşük hızlı çarpma davranışlarını deneysel ve sayısal teknikler kullanarak araştırdılar. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların mühendislik uygulamalarında etkili bir şekilde modellenebilmesi için çarpmaya karşı verdikleri cevaplar ile ilgili deneyler ve simülasyonlar yaptılar.

Güneş ve diğerkleri kalınlık boyunca fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı çarpma yükleri altında elastik [30] ve elastik-plastik [31] mekanik davranışlarını incelediler. Kademelendirilmiş bölgedeki yerel malzeme özelliklerinin hesaplanmasında mikromekanik model olarak Mori-Tanaka şemasını kullandılar. Elasto-plastik analizler için iki farklı bileşene sahip yapılarda bileşenlerin tek eksenli gerilme-şekil değıştirme değerlerini kullanarak kompozit malzemenin gerilme şekil değıştirme eğrisini veren TTO (Tamura-Tomota-Ozowa) modeli kullandılar.

Yapılan detaylı literatür incelemesi göstermiştir ki fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların darbe davranışlarıyla ilgili yapılan çalışmalar büyük oranda teoriktir. Üretimlerinin zor olması, yüksek üretim maliyetleri ve bu tip malzemelere uygulamada sınırlı olarak ulaşılabilmesi, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler ile ilgili deneysel çalışmaların sınırlı kalmasına sebep olan faktörler olarak söylenebilir. Özellikle düşük hızlı darbeye maruz çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç yapılar ile ilgili yapılan çalışmaların oldukça az olduğu ve bu çalışmalarında teorik çalışmalar olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, literatürde önemli bir boşluğu dolduracağı düşünülen bu tez çalışmasında çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir.

2. BÖLÜM

KARIŞIM TEORİSİ VE DENEYSEL YÖNTEM

2.1. Giriş

Çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar kademelendirilmiş bölge kalınlığı boyunca kompozisyonel değişimin sürekli olduğu yapılardır. Bu tip yapılar en altta saf metal katman, ortada belirli oranlarda seramik ve metal bileşenlerin oluşturduğu kademelendirilmiş katman ve en üstte ise darbe sonrası seramik yoğun katmanın bütünlüğünün korumasını sağlayacak saf metal katmandan oluşur.

Bu bölümde, çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların düşük hızlı çarpma yükleri altındaki davranışlarının deneysel olarak incelenmesinde kullanılacak numunelerin üretimi için karışım teorisi ve üretim metodu açıklandı. Kademelendirilmiş bölgedeki bileşimin hacimsel oranı, plaka kalınlığı boyunca konumun fonksiyonu olan bir güç denklemi ile ifade edildi. Önceden belirlenen hacimsel oranlarda katmanlama yöntemiyle üretilen farklı kompozisyonel değişim oranına sahip çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların düşük hızlı darbe testleri yapıldı.

2.2. Karışım Teorisi

İki farklı yapıdan oluşan (metal–seramik) çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka, alt ve üst yüzeyleri yüzde yüz metal (Al) ve bu yüzeyler arasında metal ve seramik (SiC) bileşenlerin hacimsel oranlarının kalınlık boyunca kademeli olarak değiştiği fonksiyonel kademelendirilmiş tabakadan oluşmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka.

Seramik (s) ve metal (m) fazların hacimsel oranları arasındaki ilişki;

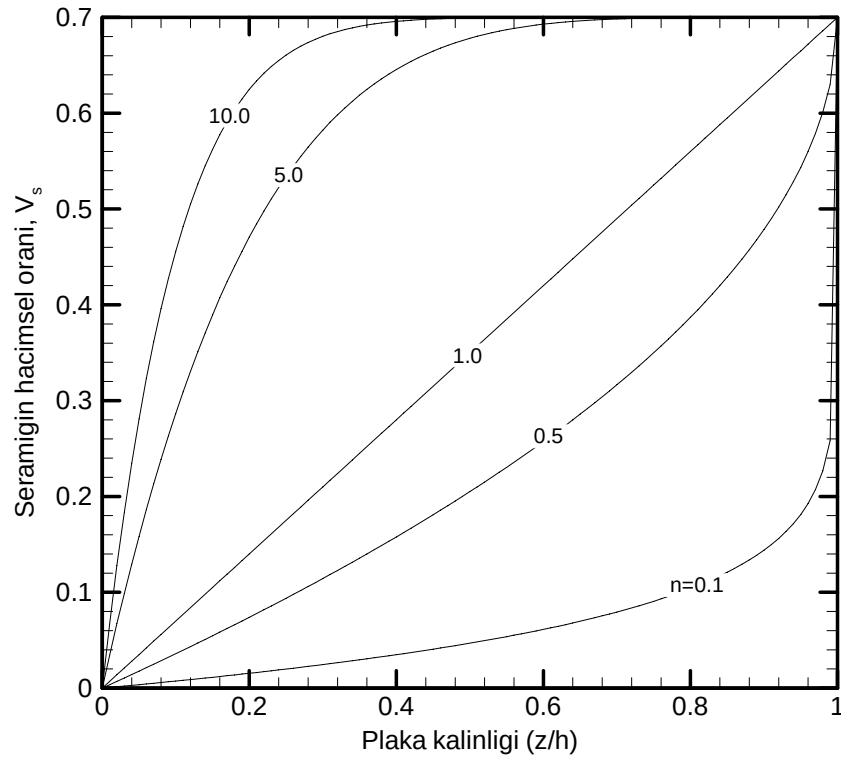
$$V_s(z) = 1 - V_m(z) \quad (2.1)$$

burada metal fazın hacimsel oranı ise;

$$V_m(z) = \left(1 - \frac{z}{h}\right)^n \quad (2.2)$$

eşitliği ile ifade edilir.

Burada; $V_m(z)$ plakanın herhangi bir z mesafesindeki metal bileşenin hacimsel oranı, h plakanın kalınlığı, n bileşimi lineer ve nonlineer olarak kontrol eden keyfi bir üs değeridir. Çeşitli n değerleri için bileşimin hacimsel oranları Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Fonksiyonel kademelendirilmiş bölgede çeşitli n değerleri için seramik fazın hacimsel oranı.

2.3. Deneysel Yöntem

2.3.1. Numune geometrisi ve tasarımı

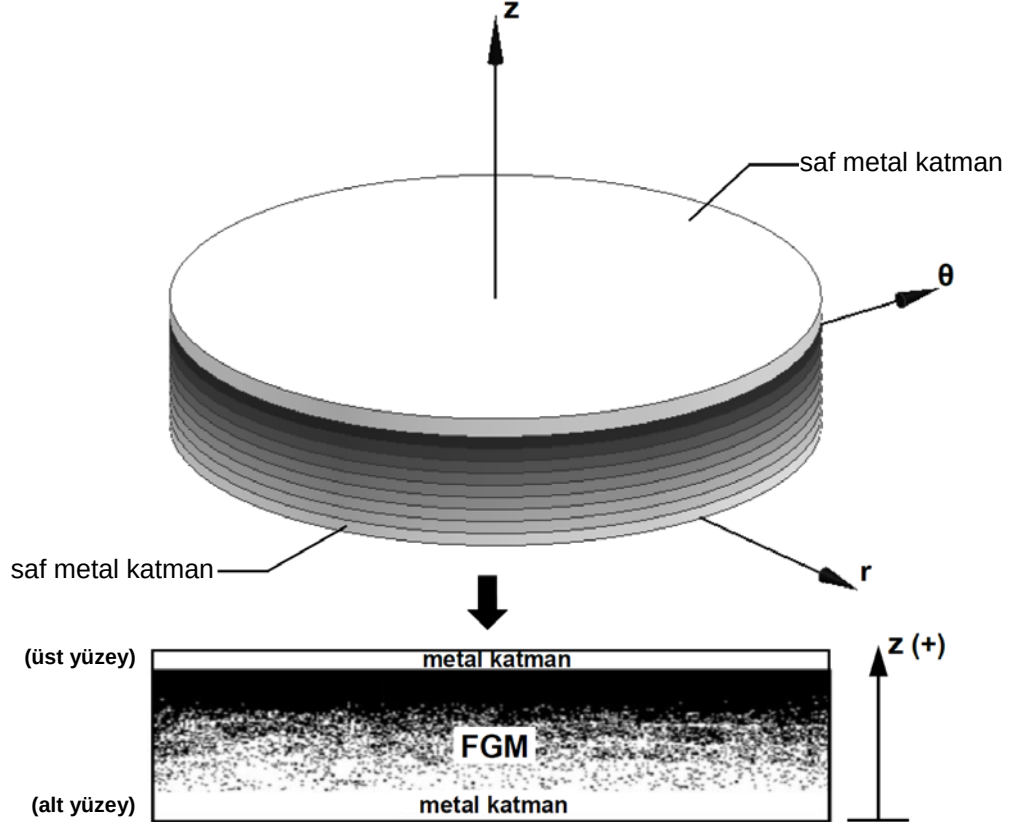
Çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç yapıdaki dairesel plakaların seramik-zengin (üst yüzey) ve metal-zengin (alt yüzey) yüzeylerinden düşük hızlı çarpma testleri

yapmak amacıyla hazırlanan numunelerin tüm katmanları metal (Al) ve seramik (SiC) tozların belirli hacimsel oranlarda homojen olarak karıştırılmasıyla elde edilmiştir.

Tablo 2.1. Çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş plakayı oluşturan bileşenlerin mekanik özellikleri.

Özellikler	Birleşenler	
	Alüminyum (Al6061)	Silisyum Karbür (SiC _p)
Elastiklik Modülü (GPa)	67	302
Poison Oranı (ν)	0.33	0.17
Yoğunluk (ρ , kg/ m ³)	2702	3100

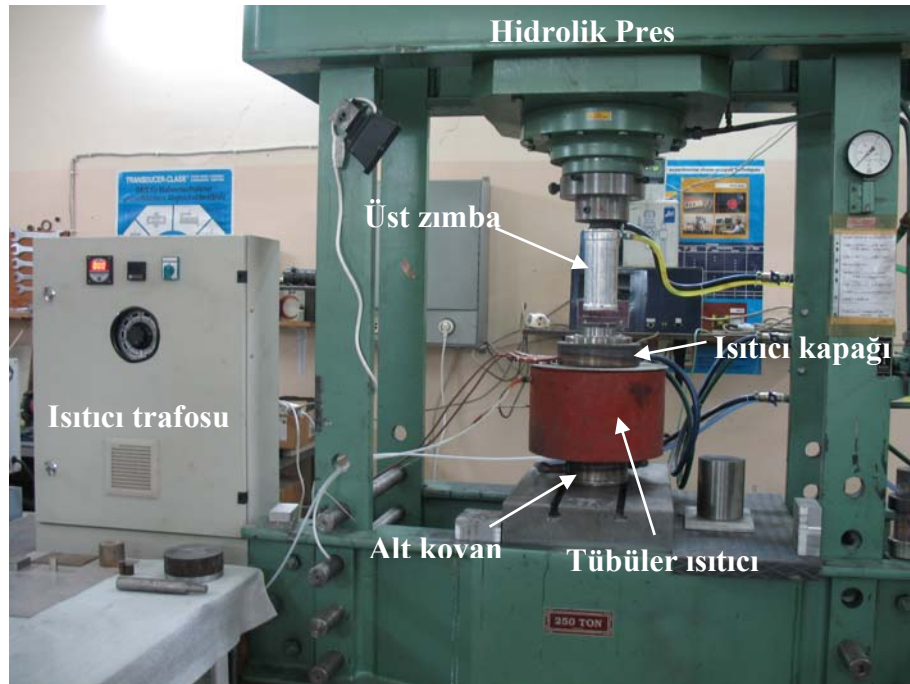
Numuneler için 10 mikron boyutlarındaki alüminyum alaşımı (Al6061) tozları ve 50 mikron boyutlarındaki silisyum karbür (SiC) tozları kullanılmıştır. Alüminyum ve silisyum karbürün mekanik özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir. Testler için toplam 18 adet sandviç dairesel numune hazırlanmıştır. Numunelerin geometrisi şematik olarak Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka geometrisi.

Kalınlıkları boyunca 11 katmanlı olarak üretilen çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç dairesel numunelerin seramik bileşeni, kompozisyonel gradyanın (n) alacağı değere bağlı olarak en üst saf metal katmana kadar kalınlık boyunca % 0'dan %70'e kadar lineer ($n = 1$) ve nonlineer ($n \neq 1$) olarak değişmektedir. Buna göre, en alt katman saf metal iken en üst saf metal katmanın altında kalan katman %30 metal, %70 seramik içermektedir. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar üç farklı malzeme kompozisyonu olan metal-zengin ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 10.0$) olarak hazırlanmış olup, seramik-zengin üst yüzeyin üstüne tekrar saf metal bir katman ilave edilmiştir. Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel numuneler 50 mm çapında ve yaklaşık 10 mm kalınlığında olup her bir katman yaklaşık olarak 0.95 mm kalınlığa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Katmanlama yöntemiyle metal-zengin ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 10.0$) olarak üretilen çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların her bir katmanında kullanılan seramik (SiC) ve metal (Al) bileşenlerin hacim ve ağırlık oranları Tablo 2.2'de gösterilmiştir.

2.3.2. Numunelerin Üretilmesi



Şekil 2.4. Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka üretimi için kullanılan sıcak pres ünitesi.

Tablo 2.2. Çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş plaka katmanlarını oluşturan seramik (SiC) ve metal (Al) bileşenlerin hacim ve ağırlık oranları

<i>n</i>	Katman No	% V_s	V_s (cm ³)	V_m (cm ³)	ω_s (g)	ω_m (g)
0.1	1 (alt saf-metal)	0.00	0.000	1.864	0.00	5.18
	2	0.82	0.015	1.849	0.05	5.14
	3	1.70	0.032	1.833	0.10	5.09
	4	2.80	0.052	1.812	0.17	5.04
	5	4.00	0.075	1.790	0.24	4.98
	6	5.50	0.103	1.762	0.33	4.90
	7	7.30	0.136	1.728	0.44	4.80
	8	9.80	0.183	1.682	0.58	4.68
	9	13.80	0.257	1.607	0.82	4.47
	10	70.00	1.305	0.559	4.18	1.55
	11 (üst saf-metal)	0.00	0.000	1.864	0.00	5.18
1.0	1 (alt saf-metal)	0.00	0.000	1.864	0.00	5.18
	2	7.80	0.145	1.719	0.47	4.78
	3	15.60	0.291	1.574	0.93	4.37
	4	23.30	0.434	1.430	1.39	3.98
	5	31.10	0.580	1.285	1.86	3.57
	6	38.90	0.725	1.139	2.32	3.17
	7	46.70	0.871	0.994	2.79	2.76
	8	54.40	1.014	0.850	3.25	2.36
	9	62.20	1.160	0.705	3.71	1.96
	10	70.00	1.305	0.559	4.18	1.55
	11 (üst saf-metal)	0.00	0.000	1.864	0.00	5.18
10.0	1 (alt saf-metal)	0.00	0.000	1.864	0.00	5.18
	2	48.40	0.902	0.962	2.89	2.67
	3	64.30	1.199	0.666	3.84	1.85
	4	68.80	1.283	0.582	4.10	1.62
	5	69.80	1.301	0.563	4.16	1.57
	6	70.00	1.305	0.559	4.18	1.55
	7	70.00	1.305	0.559	4.18	1.55
	8	70.00	1.305	0.559	4.18	1.55
	9	70.00	1.305	0.559	4.18	1.55
	10	70.00	1.305	0.559	4.18	1.55
	11 (üst saf-metal)	0.00	0.000	1.864	0.00	5.18

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin farklı üretim teknikleri mevcuttur [32]. Bu çalışmada, tüm numuneler toz istifleme-sıcak presleme yöntemiyle üretildi (Şekil 2.4). İyi bir mekanik alaşımlama elde etmek için Alüminyum ve Silisyum Karbür tozları belirlenmiş farklı oranlarda 5 saat süreyle özel olarak tasarlanmış bir karıştırıcıda karıştırıldı. Gerekli miktarda karıştırılmış Al ve SiC tozları tartılarak sıcak iş çeliğinden üretilmiş olan dairesel bir kalıbın içerisine transfer edildi ve kalınlığı doğrultusunda 1 dakika süreyle 70 MPa basınca maruz bırakıldı ve daha sonra basınç kaldırıldı, böylece ilk katman oluşturulmuş oldu. Daha sonra diğer katmanlar içinde bu işlemler tekrarlandı. Herbir katmanın kalınlığının aynı olması sağlandı. Kalıp içinde soğuk olarak sıkıştırılmış numune daha sonra 100 MPa basınç altında 640-650 °C’de 1 saat süreyle sinterlendi. Sinterleme işlemi koruyucu Argon gazı atmosferinde yapıldı. Numunelerin kalıptan kolayca çıkarılabilmesi için kalıp iki parçalı olarak imal edildi (Şekil 2.5). Ayrıca sinterleme sonrasında numunenin kalıba yapışmasını engellemek amacıyla kalıp ile numune arasında karbon yağlayıcı kullanıldı. Sinterleme işleminden sonra numunelerin çarpılmalarını önlemek amacıyla numuneler basınç altında kontrollü olarak soğutulduktan sonra kalıptan çıkarıldılar.



Şekil 2.5. Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka üretimi için sıcak iş çeliğinden (AISI 2344) imal edilmiş kalıp sistemi.

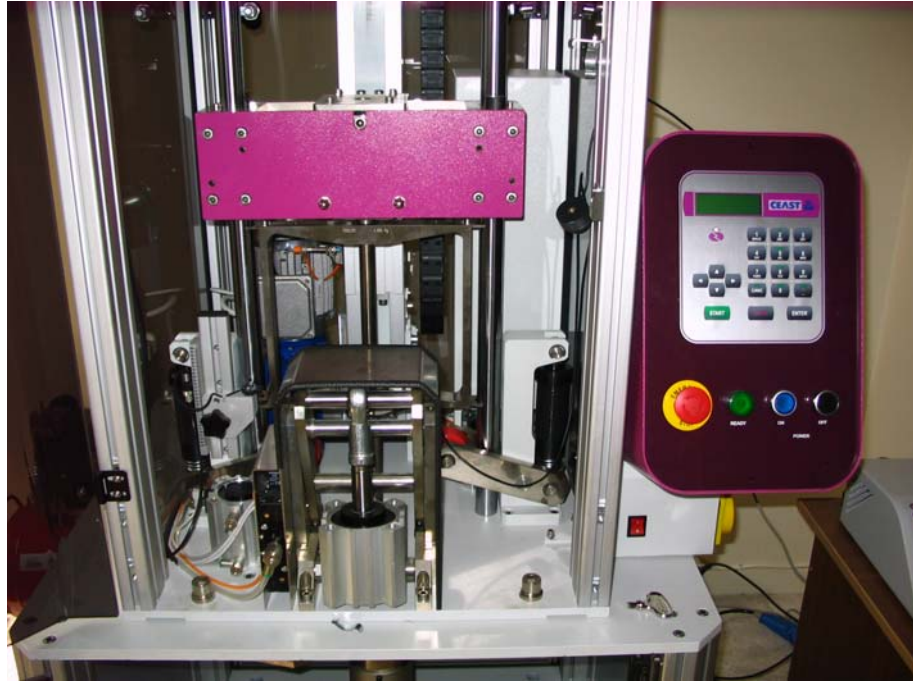
2.3.3. Düşük Hızlı Çarpma Testleri

Kalınlıkları boyunca metal-zengin ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonlarına sahip çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar sırasıyla $v = 2, 3$ ve 4 m/s vurucu hızlarına karşılık gelen 10.09, 22.7 ve 40.36 Joule çarpma enerjilerinde test edildiler. Çarpma enerjileri vurucunun düşürülme yüksekliği değiştirilerek ayarlandı. Deneyler için CEAST Fractovis ağırlık düşürme test cihazı kullanıldı (Şekil 2.6). Numuneler üst yüzeyinden merkezi olarak çarpmaya maruz bırakıldı ve vurucunun tekrarı çarpmasını önlemek için anti-rebound sistem (Şekil 2.7) kullanıldı.

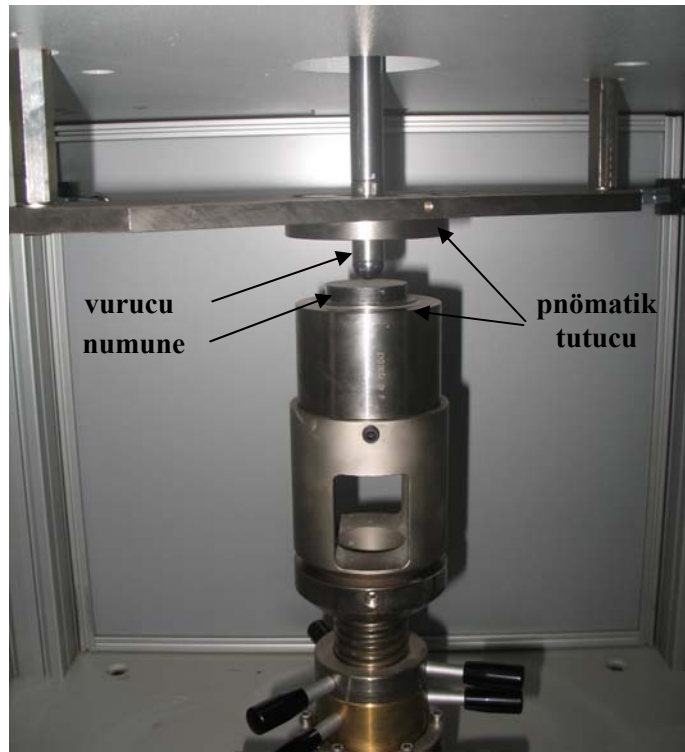


Şekil 2.6. CEAST Fractovis ağırlık düşürme darbe cihazı

Vurucu yarıçapı 20 mm olan yarıküresel bir geometriye sahip olup 40 kN kapasiteli bir kuvvet dönüştürücü sensöre bağlıdır ve toplam kütlesi ise 5.045 kg'dır. 50 mm çapında olan çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç dairesel numuneler, iç çapı 40 mm olan dairesel bir destek tarafından pnömomatik bir sistem ile tutulmaktadır (Şekil 2.8).



Şekil 2.7. Anti-rebound sistem



Şekil 2.8. Çarpma cihazı numune bağlantı aparatı

Çarpma testleriyle elde edilen veriler bir veri toplama sistemi yardımıyla (DAS16000) alınmakta ve VisualIMPACT programı ile kuvvet dönüştürücü sensörden gelen yük historisinden zamana bağlı hız, yer değiştirme ve absorbe edilen enerji değerleri hesaplanmaktadır.

Üç farklı malzeme kompozisyonunda ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) üretilen sandviç plakaların alt ve üst yüzeyleri ile saf metal tozlarından üretilen plakalara üç farklı vurucu hızına ($v = 2, 3$ ve 4 m/s) karşılık gelen 10.09, 22.7 ve 40.36 Joule vurucu enerjilerinde 21 adet çarpma deneyi yapılmıştır. Ayrıca çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların mekanik davranışlarını mukayese etmek amacıyla üç farklı malzeme kompozisyonunda ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) üretimi yapılan fonksiyonel kademelendirilmiş plakalara alt (metal-zengin taraf) ve üst (seramik-zengin taraf) yüzeylerinden $v = 3$ m/s vurucu hızında (vurucu enerjisi 22.7 Joule) ilave olarak 6 adet çarpma deneyi daha yapılmıştır. Böylece toplamda 27 adet çarpma deneyi gerçekleştirilmiştir.

3. BÖLÜM

DENEYSEL BULGULAR

3.1. Giriş

Bu bölümde saf Al6061 tozlarından üretilmiş plaka ile metal-zengin ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonlarında üretimi yapılan çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç dairesel plakaların ayrı ayrı metal-zengin (alt yüzey) ve seramik-zengin (üst yüzey) taraflarından yapılan farklı hızlardaki düşük hızlı darbe testleri sonucunda elde edilen veriler yorumlanmıştır. Özellikle plakaların düşük hızlı darbeye karşı cevaplarını anlayabilmek için deneysel olarak elde edilen temas kuvveti-zaman ve kinetik enerji-zaman grafikleri ile düşük hızlı çarpma testleri sonucunda numunelerde oluşan kalıcı deformasyonlar fotoğraflanarak yorumlanmıştır. Ayrıca, bu bölümde darbe sonrası numunelerde oluşan deformasyonlar mikromekanik ve metalografik açıdan incelenmiş ve yorumlar detaylı olarak sunulmuştur.

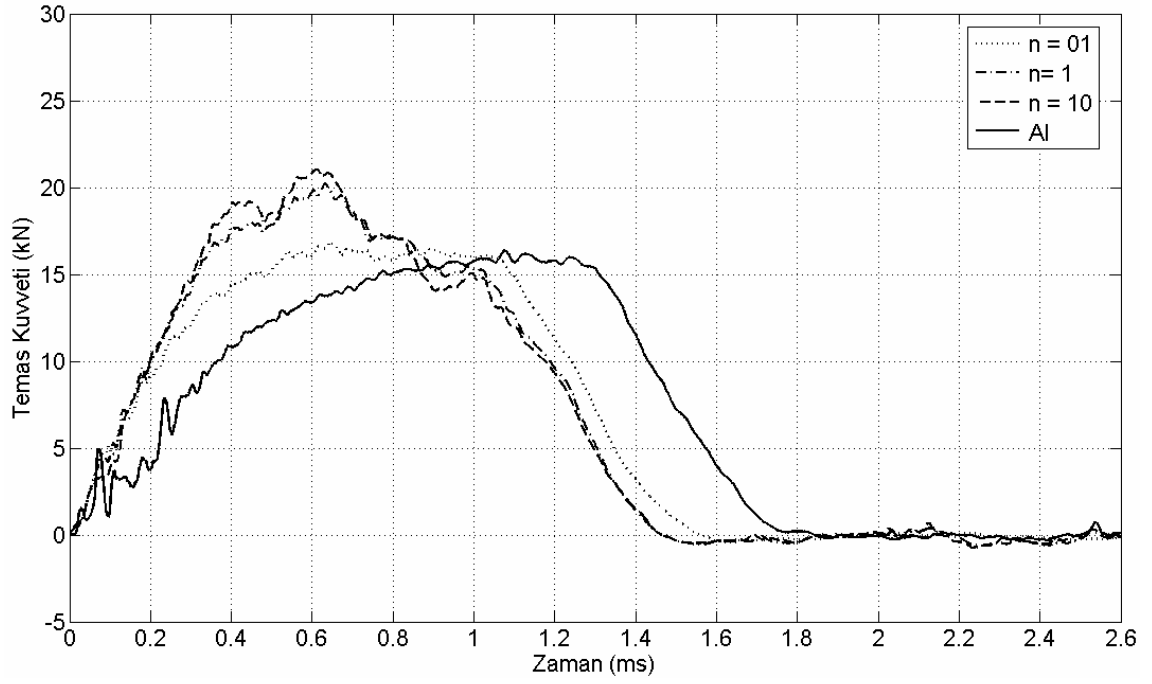
3.2. Düşük Hızlı Darbe Test Bulguları

Üç farklı malzeme kombinasyonunda ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) üretilmiş dairesel sandviç plakalar ile saf metal plakalar, sırasıyla üç farklı vurucu hızına ($v = 2, 3$ ve 4 m/s) karşılık gelen 10.09, 22.7 ve 40.36 Joule vurucu enerjilerinde plakaların metal-zengin (alt yüzey) ve seramik-zengin (üst yüzey) yüzeylerinden düşük hızlı çarpışma testlerine tabi tutuldular. Böylece toplam yirmibir farklı numune için elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, sandviç plakaların düşük hızlı darbe yüklerine karşı mekanik davranışları kıyaslanmıştır. Ayrıca sandviç yapının sandviç olmayan fonksiyonel kademelendirilmiş plakalara göre mekanik avantajını anlayabilmek için üç farklı malzeme kompozisyonunda üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş plakalara metal-zengin (alt yüzey) ve seramik-zengin (üst yüzey) yüzeylerinden $v = 3$ m/s vurucu hızına tekabül eden 22.7 Joule vurucu enerjisinde altı adet çarpma testi yapılarak aynı

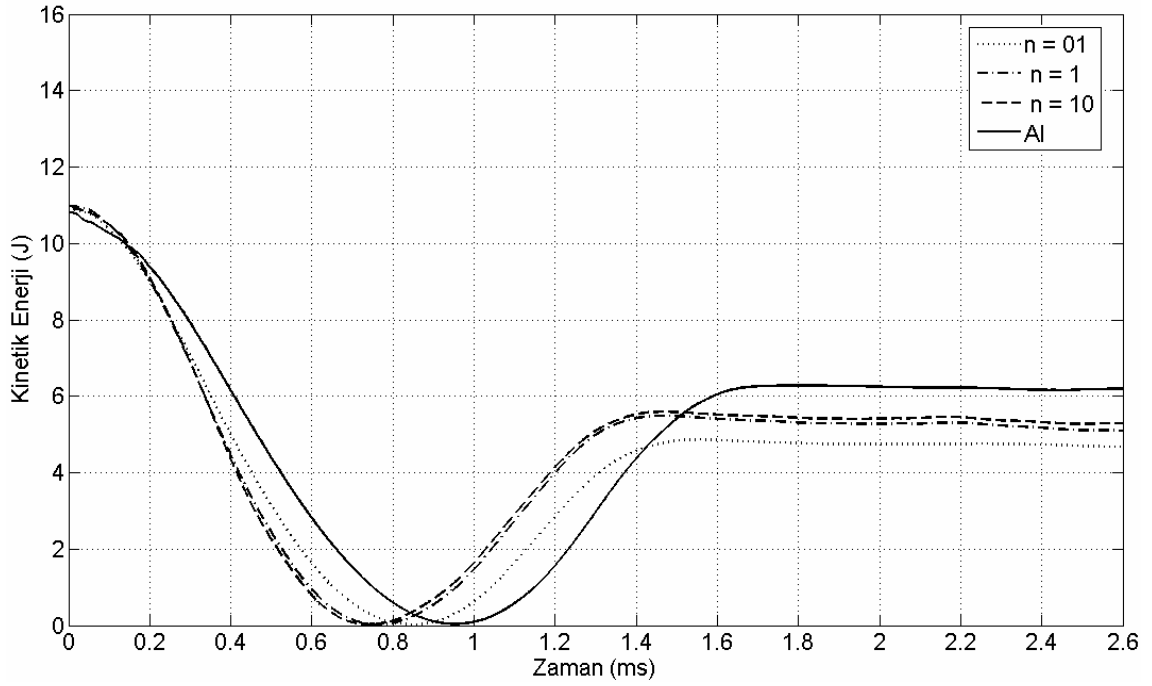
şartlardaki çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka sonuçları ile mukayese edildi.

Vurucu enerjisi 10.09 Joule iken saf metal ve farklı malzeme kompozisyonlarına ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) sahip numunelerin temas kuvvetleri ve kinetik enerjilerin zamana göre değişimleri vurucunun seramik-zengin (üst yüzey) ve metal-zengin (alt yüzey) yüzeylere düşürüldüğü durumlar için sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Vurucu üst yüzeyden çarptırıldığında plaka kalınlığı boyunca artan malzeme kompozisyonu ile (metal yapıdan seramik-zengin yapıya) ölçülen temas kuvvetinin arttığı, temas süresinin ise azaldığı görülmektedir (Şekil 3.1a, 3.2a). Bununla birlikte, metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip plakanın absorbe ettiği enerji diğerlerine ($n = 1.0$ ve 10.0) göre daha fazladır (Şekil 3.1b). Benzer karakteristik, vurucunun metal-zengin taraftan çarptırıldığı durum içinde görülmüştür (Şekil 3.2b). Her iki yüzeyden de yapılan çarpma testleri sonucunda saf metal plakaların absorbe ettiği enerjinin çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş plakalara göre daha az olduğu görülmüştür. Bunun sebebi çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç yapılarda kullanılan alt ve üst saf metal katmanların enerji absorpsiyonuna sağladıkları katkı söylenebilir. Ancak vurucu alt yüzeyden çarptırıldığında ölçülen en yüksek temas kuvveti değerlerinde az da olsa bir azalma olduğu görülmektedir. Vurucu enerjisi 10.09 Joule iken, vurucunun dairesel sandviç plakaların üst ve alt yüzeylerinden çarptırılması sonucunda plaka yüzeylerinde oluşan kalıcı iz bölgeleri Şekil 3.3’de görülmektedir. Üst yüzeye göre alt yüzeyde oluşan iz çapının daha büyük olduğu görülmektedir. Buda metal yoğun olması nedeniyle alt tarafın daha yumuşak olmasının doğal bir sonucudur. Ayrıca her iki yüzeye yapılan çarpma testleri için artan malzeme kompozisyonu ile yapı içerisindeki seramik oranının artması sonucunda daha da sertleşen plakalarda oluşan iz çaplarının küçüldüğü görülmektedir.

Vurucu enerjisi 22.7 Joule olduğunda; vurucunun hem üst yüzeyden hem de alt yüzeyden plakalara çarptığı testler sonucunda, artan malzeme kompozisyonu ile temas kuvvetlerinin arttığı, temas sürelerinin ise azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 3.4a, 5a). Vurucunun kinetik enerji değişimleri incelendiğinde ise yine artan malzeme kompozisyonu ile plakaların absorbe ettiği enerjilerin azaldığı görülmektedir. Yine burada da her iki yüzeyden yapılan çarpma testleri neticesinde saf metal plakalar tarafından absorbe edilen enerji çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar ($n =$

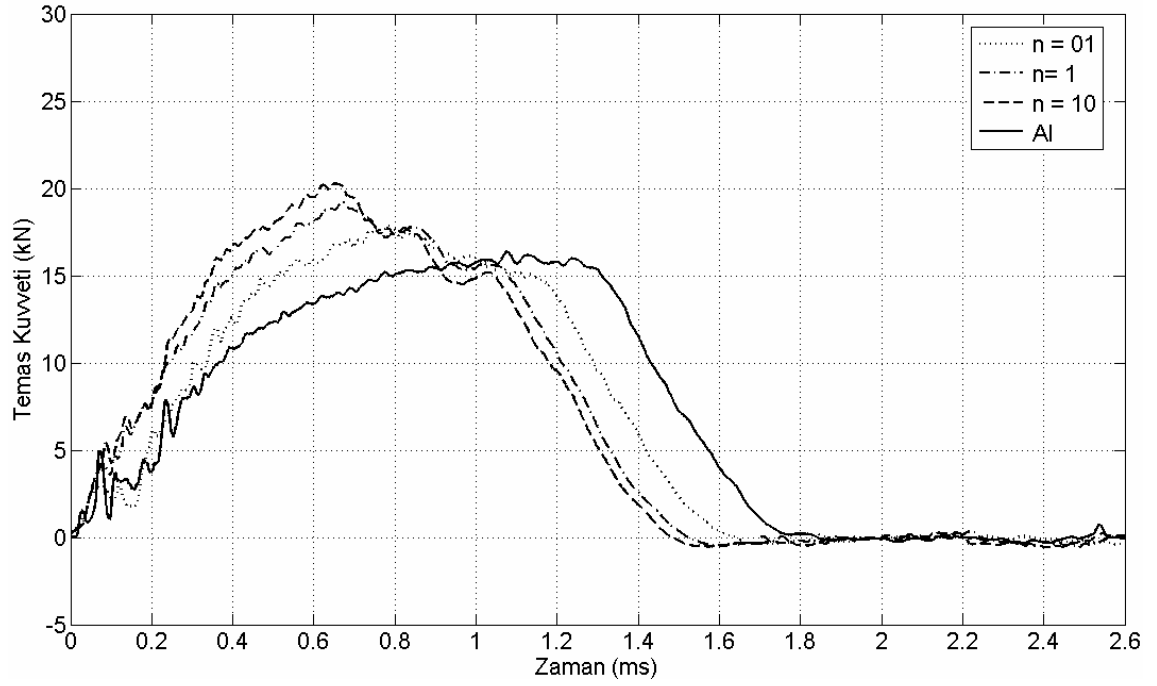


(a)

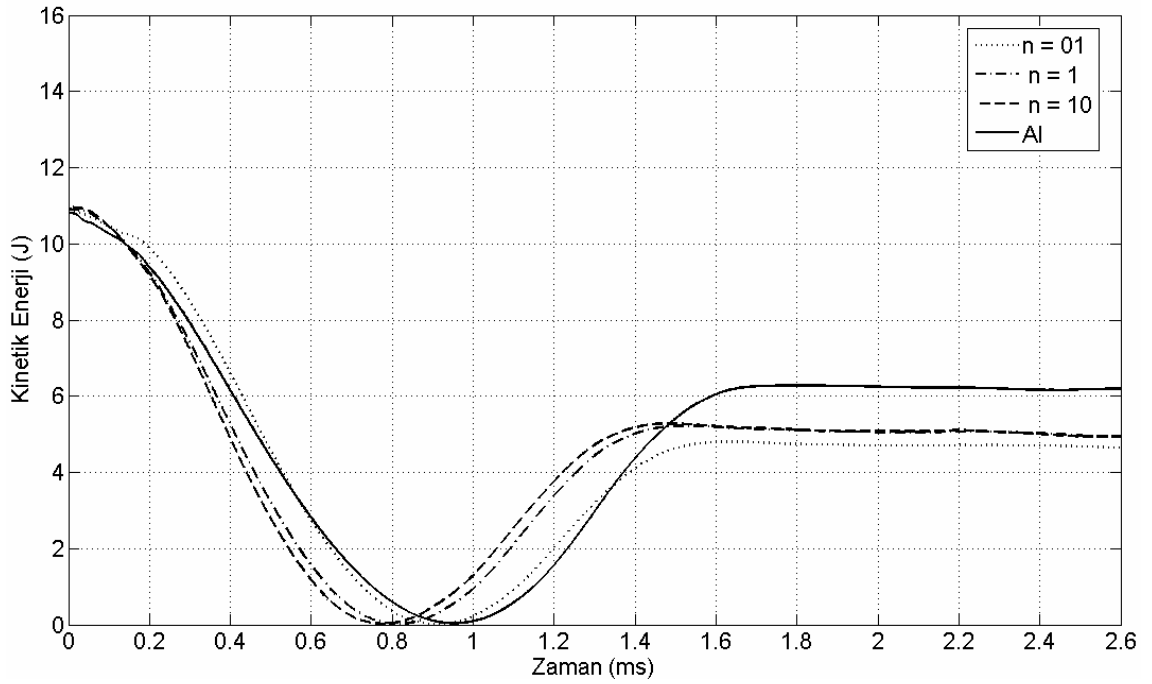


(b)

Şekil 3.1. Seramik-zengin üst yüzeylerinden çarpmaya maruz çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) dairesel sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 10.09 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

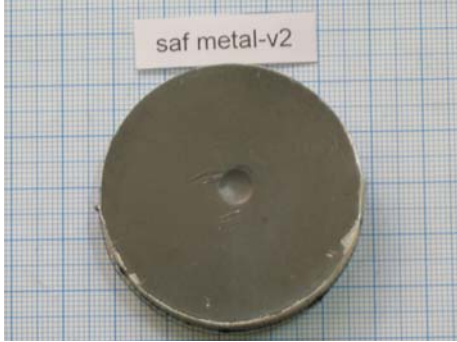
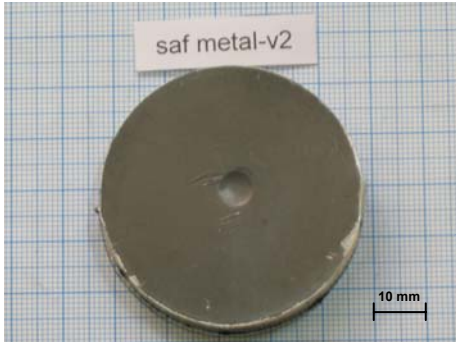


(a)

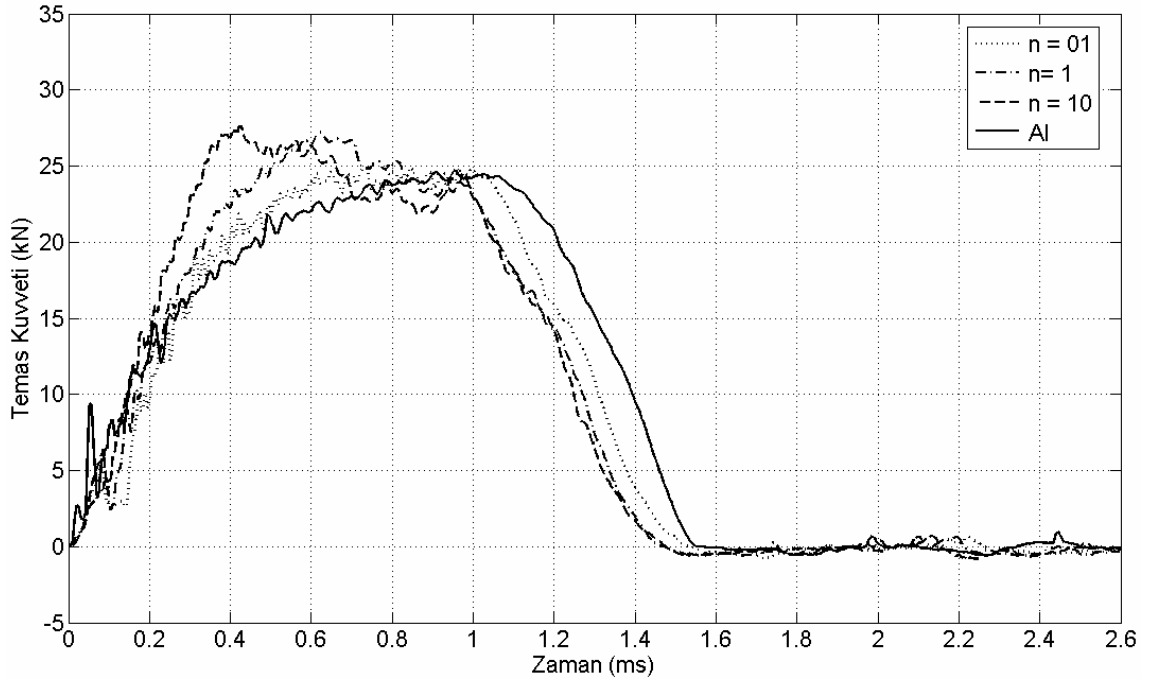


(b)

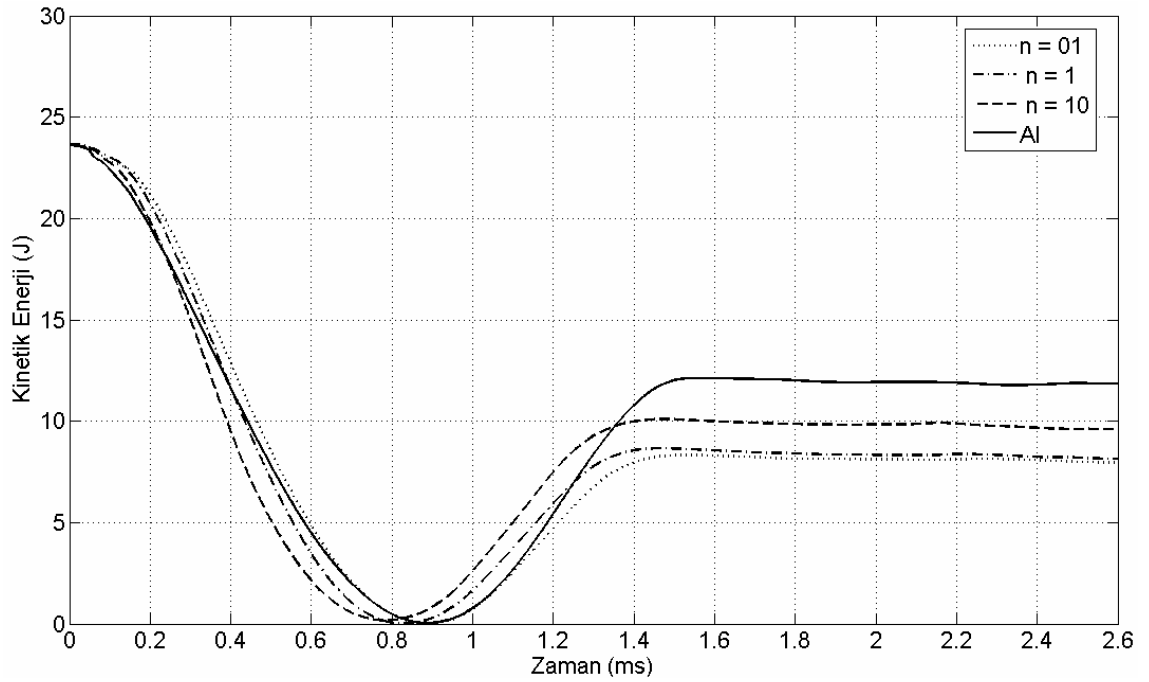
Şekil 3.2. Metal-zengin alt yüzeylerinden çarpmaya maruz çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) dairesel sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 10.09 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

	<i>seramik-zengin üst yüzey</i>	<i>metal-zengin alt yüzey</i>
<i>Al</i>	 A circular metal disk with a central hole, labeled 'saf metal-v2'.	 A circular metal disk with a central hole, labeled 'saf metal-v2'. A 10 mm scale bar is visible in the bottom right corner.
<i>n=0.1</i>	 A circular ceramic disk with a central hole, labeled 'seramik-n01-v2'.	 A circular metal disk with a central hole, labeled 'metal-n01-v2'.
<i>n=1.0</i>	 A circular ceramic disk with a central hole, labeled 'seramik-n1-v2'.	 A circular metal disk with a central hole, labeled 'metal-n1-v2'.
<i>n=10.0</i>	 A circular ceramic disk with a central hole, labeled 'seramik-n10-v2'.	 A circular metal disk with a central hole, labeled 'metal-n10-v2'.

Şekil 3.3. Saf metal plakalar ile çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel sandviç plakalarda düşük hızlı çarpma sonrası oluşan kalıcı izler (vurucu enerjisi = 10.09 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

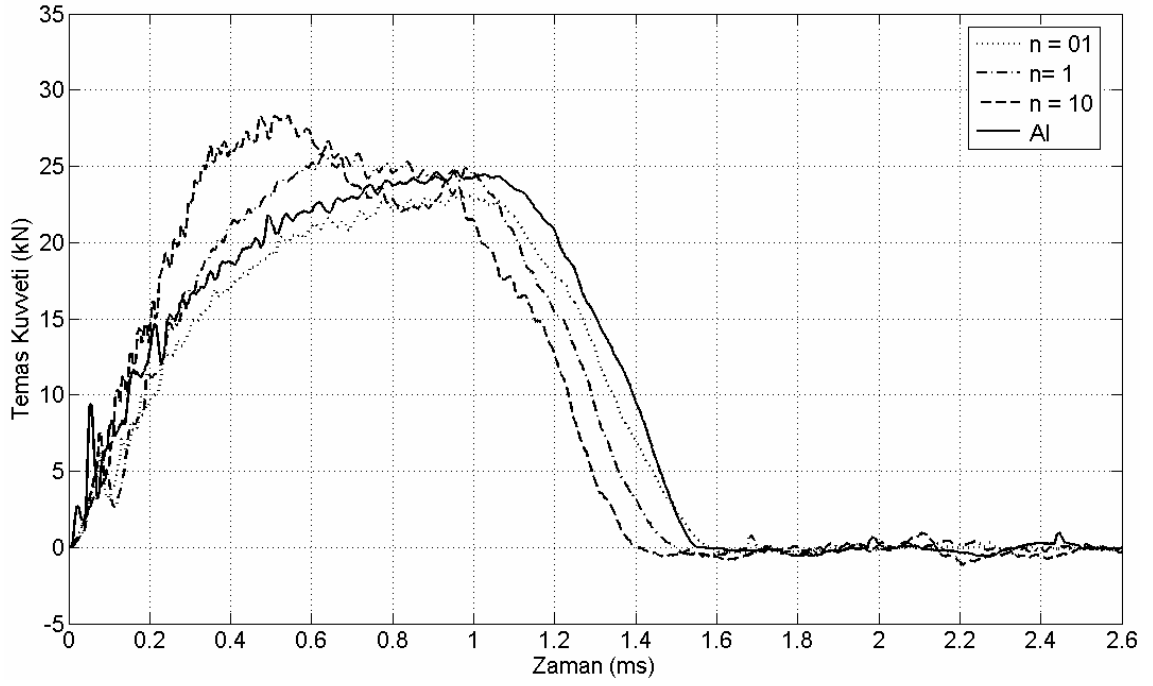


(a)

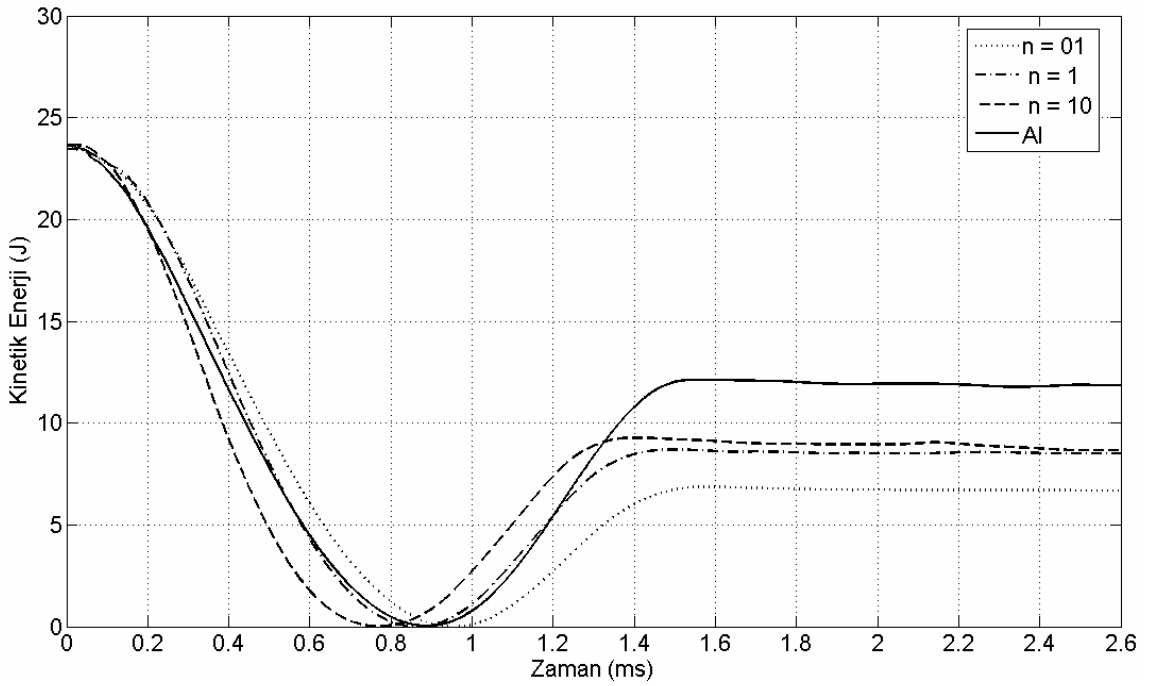


(b)

Şekil 3.4. Seramik-zengin üst yüzeylerinden çarpmaya maruz çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) dairesel sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

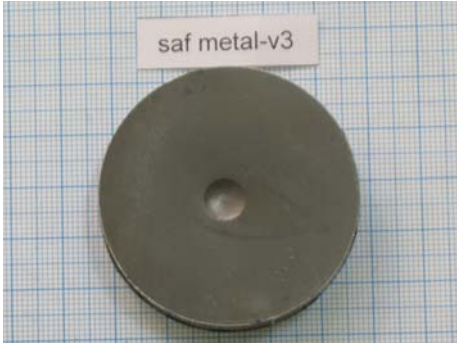
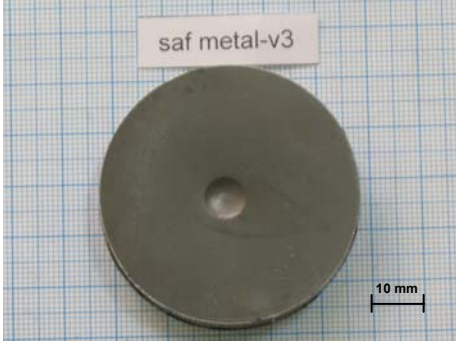


(a)



(b)

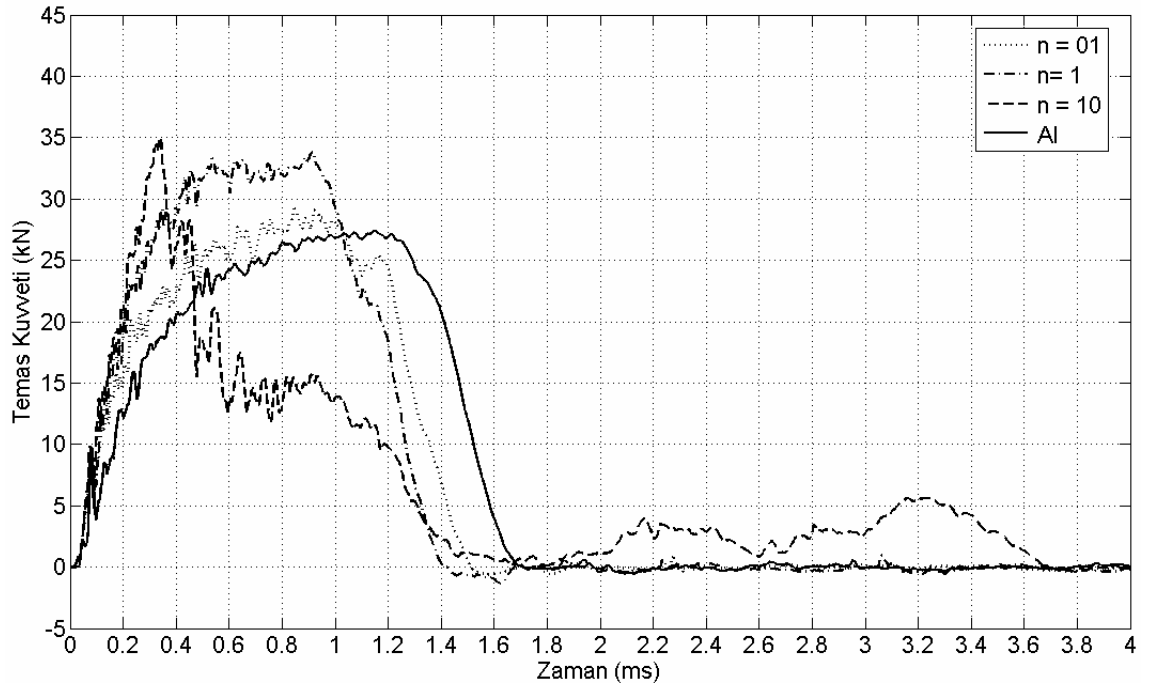
Şekil 3.5. Metal-zengin alt yüzeylerinden çarpmaya maruz çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş ($n = 0.1$, 1.0 ve 10.0) dairesel sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

	<i>seramik-zengin üst yüzey</i>	<i>metal-zengin alt yüzey</i>
<i>Al</i>		
<i>n=0.1</i>		
<i>n=1.0</i>		
<i>n=10.0</i>		

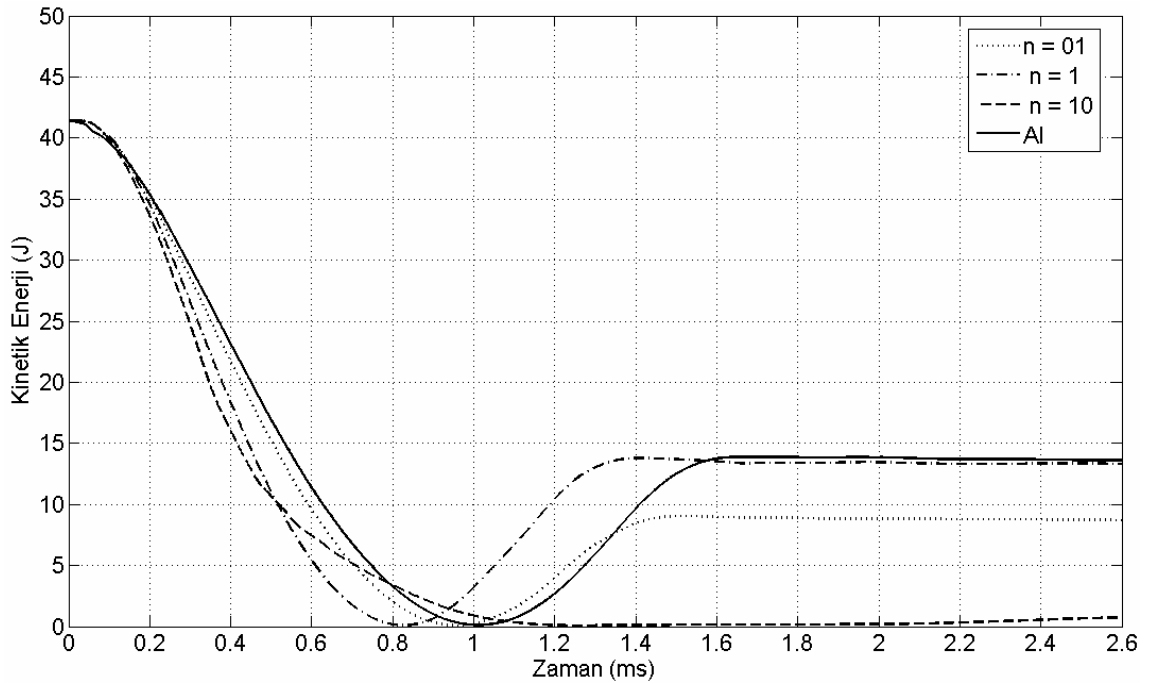
Şekil 3.6. Saf metal plakalar ile çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel sandviç plakalarda düşük hızlı çarpma sonrası oluşan kalıcı izler (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

0.1, 1.0 ve 10.0) tarafından absorbe edilen enerjilere göre daha azdır. Bunun sebebi olarak, çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların alt ve üst yüzeylerinde kullanılan saf metal katmanların plakaların enerji absorbe etme kapasitelerini artırması söylenebilir (Şekil 3.4b, 3.5b). Artan vurucu hızı ile temas kuvvetleri artarken temas süreleride azalmaktadır (Şekil 3.1a, 3.4a). Benzer şekilde dairesel sandviç plakaların üst ve alt yüzeylerinden yapılan çarpma testleri sonucunda yüzeylerde oluşan kalıcı iz çapları artan malzeme kompozisyonu ile azalmaktadır (Şekil 3.6). Bu da artan malzeme kompozisyonu ile plakalar içerisindeki seramik oranının artması ve dolayısıyla plakaların daha sert bir yapıya kavuşmalarının doğal bir sonucudur.

Vurucu enerjisi 40.36 Joule iken; vurucu plakaya üst yüzeyden çarptırıldığında artan malzeme kompozisyonu ile temas kuvvetinin arttığı, temas süresinin ise azaldığı görülmektedir (Şekil 3.7a). Ancak seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip sandviç plakada oluşan hasar nedeniyle burada karakteristik davranışın bozulduğu görülmektedir. Plakada hasar oluşumu kinetik enerji değişiminden de anlaşılmaktadır. Seramik-zengin malzeme kompozisyonuna sahip plakaya vurucu temas ettikten sonra vurucunun kinetik enerji değişimi yatay kalmaktadır (Şekil 3.7b). Vurucunun plakalara alt yüzeyden çarptırıldığı testlerde, liner ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonlarına sahip plakalarda hasarların oluştuğu görülmektedir. Özellikle kalınlık boyunca seramik oranı arttıkça daha da gevrekleşen plakalarda oluşan hasarın mertebesinin daha fazla olduğu, temas kuvvetlerindeki azalmadan ve vurucu kinetik enerji değişimlerinden anlaşılmaktadır (Şekil 3.8a, 3.8b). Seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip plakada vurucu kinetik enerjisindeki değişiminin çarpma sonrası yatay kalması ve metal-zengin ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip plakada ise çarpma sonrası vurucu kinetik enerjisindeki azalma da bunu göstermektedir (Şekil 3.8b). Burada da her iki yüzeyden yapılan çarpma testleri neticesinde saf metal plakalar tarafından absorbe edilen enerji çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) tarafından absorbe edilen enerjilere göre daha azdır (Şekil 3.7b, 3.8b). 4 m/sn vurucu hızına karşılık gelen 40.36 Joule vurucu enerjisiyle yapılan çarpma testleri sonucunda çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel sandviç plakalarda oluşan kalıcı izler ve hasarlar Şekil 3.9'da görülmektedir. Çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalara üst yüzeyden yapılan çarpma testleri sonucunda $n = 10.0$ malzeme kompozisyonuna sahip plakanın çatladığı görülmektedir. Alt yüzeyden yapılan testler sonucunda ise $n = 1.0$ ve

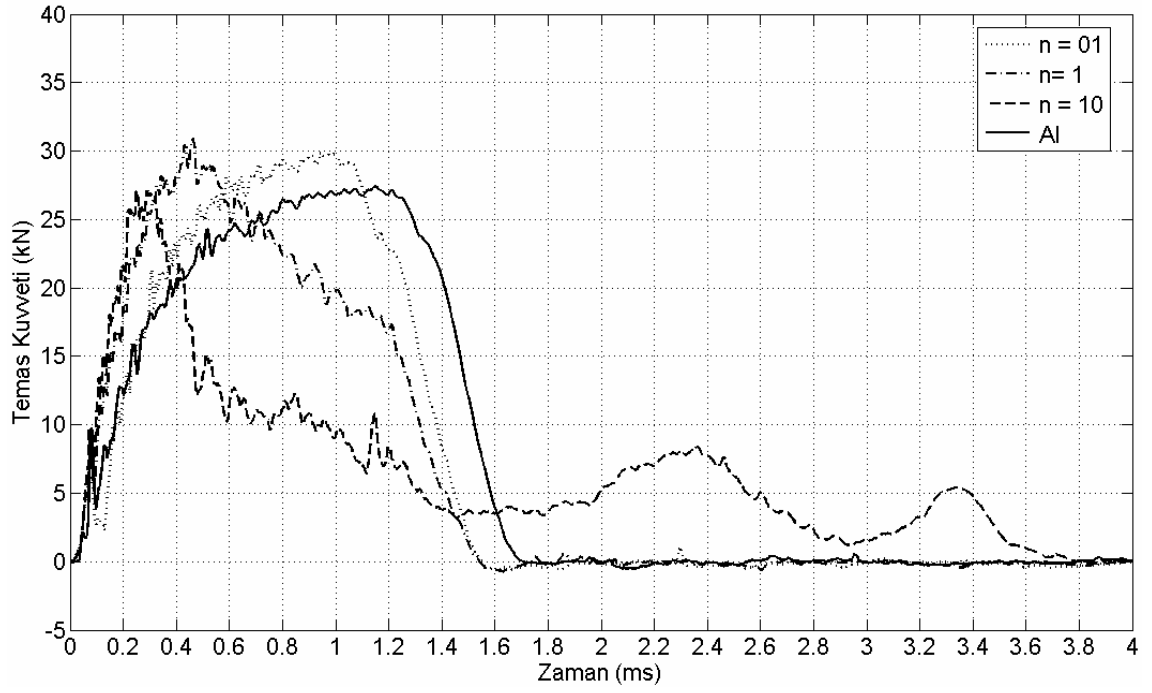


(a)

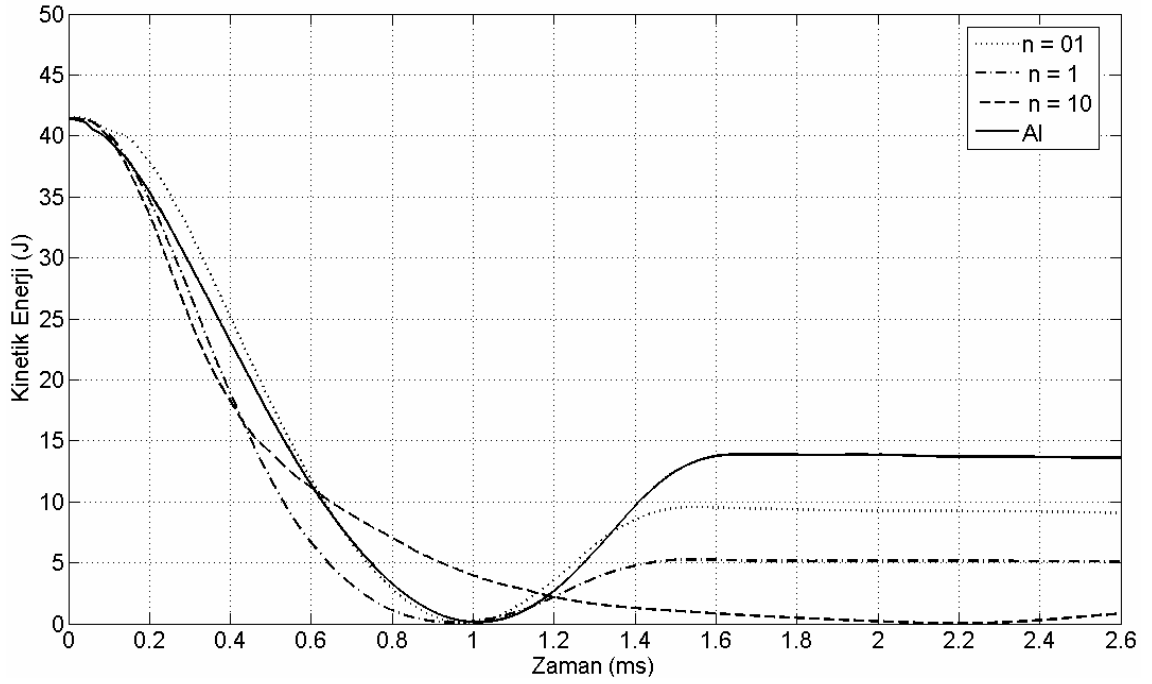


(b)

Şekil 3.7. Seramik-zengin üst yüzeylerinden çarpmaya maruz çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) dairesel sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 40.36 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

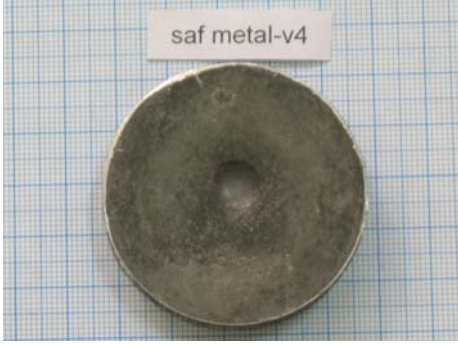
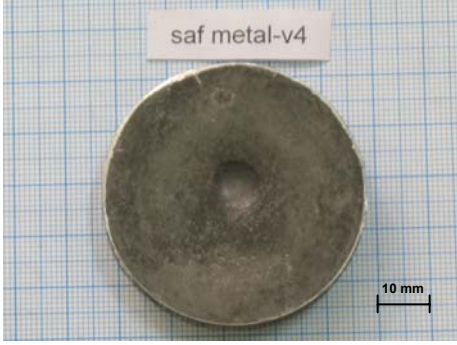
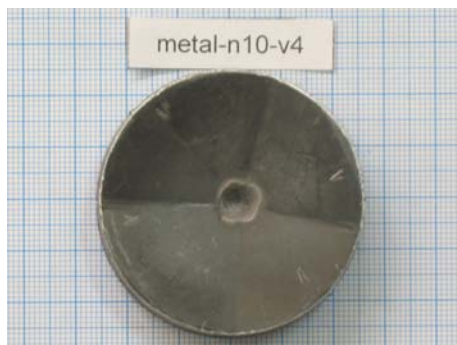


(a)



(b)

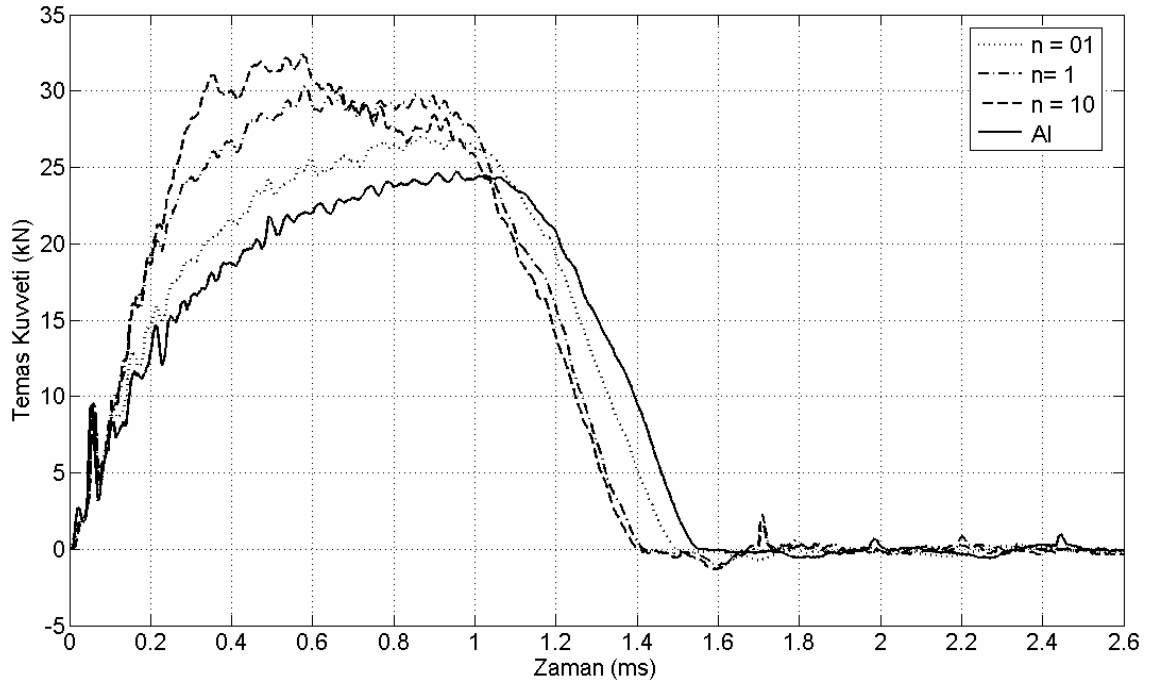
Şekil 3.8. Metal-zengin alt yüzeylerinden çarpmaya maruz çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) dairesel sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 40.36 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

	<i>seramik-zengin üst yüzey</i>	<i>metal-zengin alt yüzey</i>
<i>Al</i>		
<i>n=0.1</i>		
<i>n=1.0</i>		
<i>n=10.0</i>		

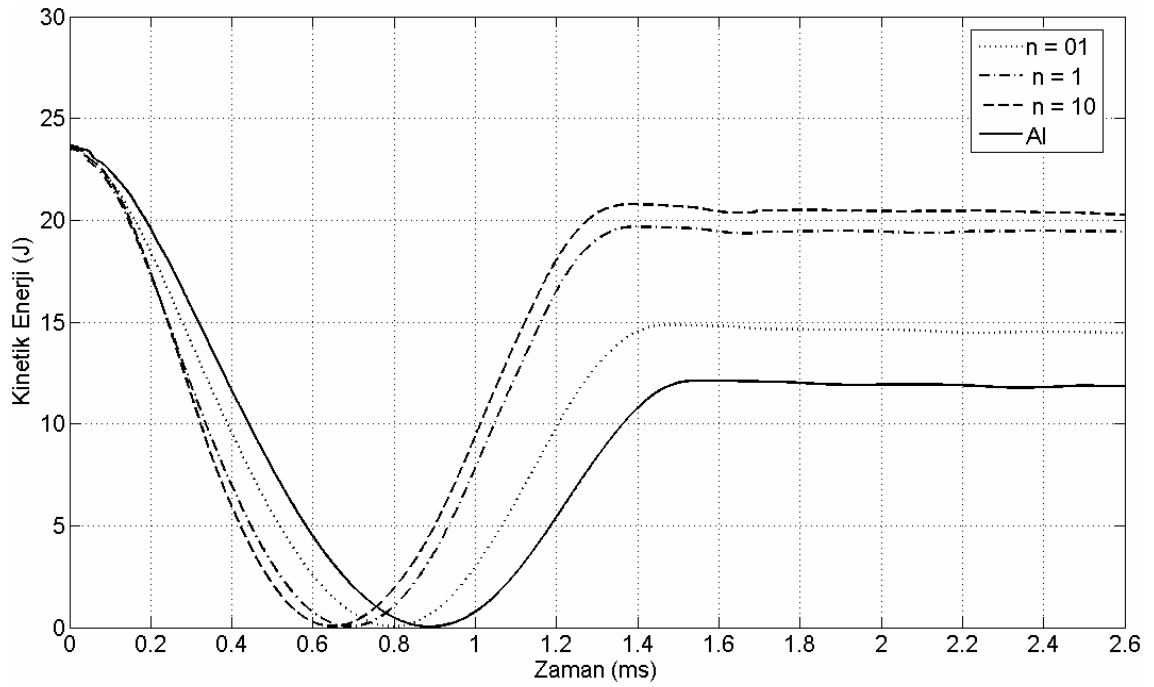
Şekil 3.9. Saf metal plakalar ile çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel sandviç plakalarda düşük hızlı çarpma sonrası oluşan kalıcı izler (vurucu enerjisi = 40.36 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

$n = 10.0$ malzeme kompozisyonlarına sahip plakalarda çatlak hasarlarının oluştuğu anlaşılmaktadır. Aynı şartlar altında üretilen, aynı çarpma testlerine tabi tutulan ve farklı yüzeylerden çarpmaya maruz bırakılan plakaların darbe etkisini seramik yoğunluğunun fazla olduğu üst yüzeyleri ile karşılamalarının yapısal olarak daha uygun olduğu sonucuna varılabilir. Şöyle ki; darbe yükünün üst yüzey tarafından karşılanması ile plaka kalınlığı boyunca iletilen yük dalgasının plakanın arka tarafında oluşturacağı etkinin (back-effect) burada daha tok yapıdaki metalce yoğun alt yüzeyce karşılanmasının, plakada oluşacak hasarın engellenmesinde önemli bir avantaj sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların darbe davranışlarını fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarinki ile mukayese edebilmek için; aynı şartlarda ve geometrilerde metal-zengin ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonlarıyla üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar üst ve alt yüzeylerinden 22.7 Joule vurucu enerjisiyle darbeye maruz bırakılmışlardır. Şekil 3.10'da üst yüzeylerinden darbeye maruz fonksiyonel kademelendirilmiş ve saf metal plakaların temas kuvveti-zaman ve kinetik enerji-zaman grafikleri görülmektedir. Artan malzeme kompozisyonu ile (metalden seramik-zengin yapıya) temas kuvvetinin arttığı ve temas süresinin ise azaldığı görülmektedir (Şekil 3.10a). Kinetik enerji-zaman grafikleri incelendiğinde, metal yapıdan seramik-zengin yapıya gittikçe plakalar tarafından absorbe edilen enerji miktarlarında azalma olduğu görülmektedir (Şekil 3.10b). Bu durum, malzeme kompozisyonundaki artış ile yapı içerisindeki seramiğin hacimsel oranının artması nedeniyle plakaların sertliklerindeki artışın doğal bir sonucudur. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) üst yüzeylerinden yapılan düşük hızlı çarpma testleri sonrası plakalarda oluşan kalıcı izler Şekil 3.11'de görülmektedir. Artan malzeme kompozisyonu ile daha sert bir yapıya kavuşan plakalar üzerindeki vurucu iz çapı küçülmektedir. Alt yüzeylerinden darbelenmiş (vurucu enerjisi = 22.7 Joule) fonksiyonel kademelendirilmiş ve saf metal plakaların temas kuvveti-zaman ve kinetik enerji-zaman grafikleri Şekil 3.12'de görülmektedir. Artan kompozisyonel gradyant değeri ile sertlikleri artan plakalara alt yüzeylerinden yapılan darbe deneyleri sonucunda metal-zengin ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda oluşan çatlak hasarlar nedeniyle temas kuvveti-zaman eğrilerinin saf metal plakaya ait temas kuvveti-zaman eğrisinin altına inerek

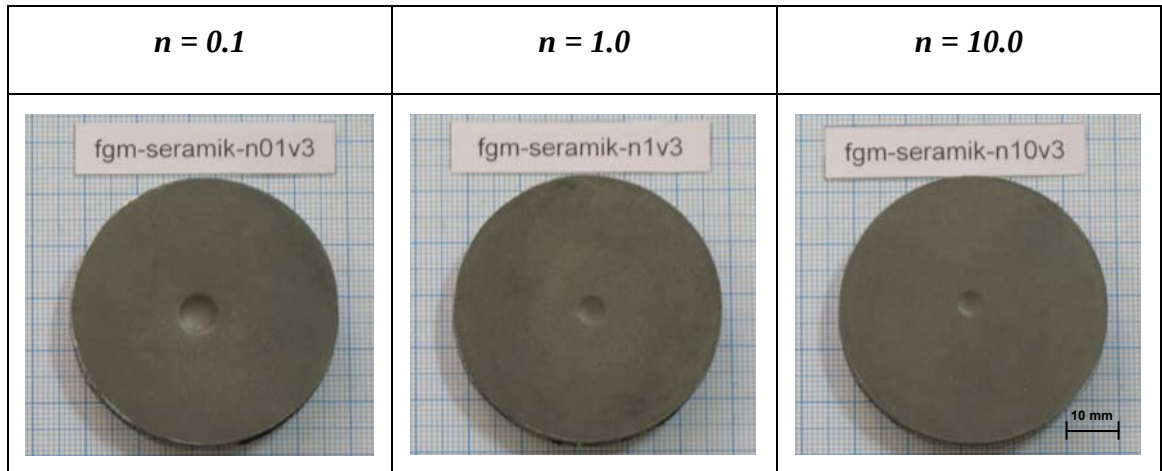


(a)



(b)

Şekil 3.10. Seramik-zengin üst yüzeylerinden çarpmaya maruz fonksiyonel kademelendirilmiş ($n = 0.1$, 1.0 ve 10.0) dairesel plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

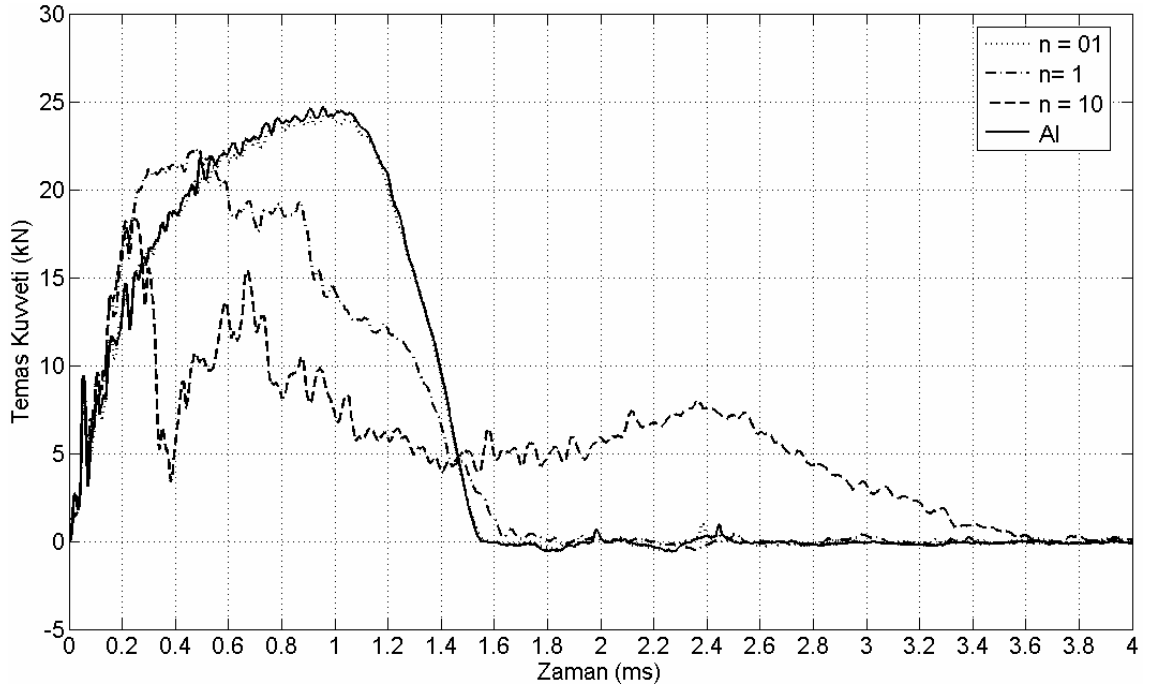


Şekil 3.11. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların üst yüzeylerinden yapılan düşük hızlı çarpma testleri sonrası plakalarda oluşan kalıcı izler (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

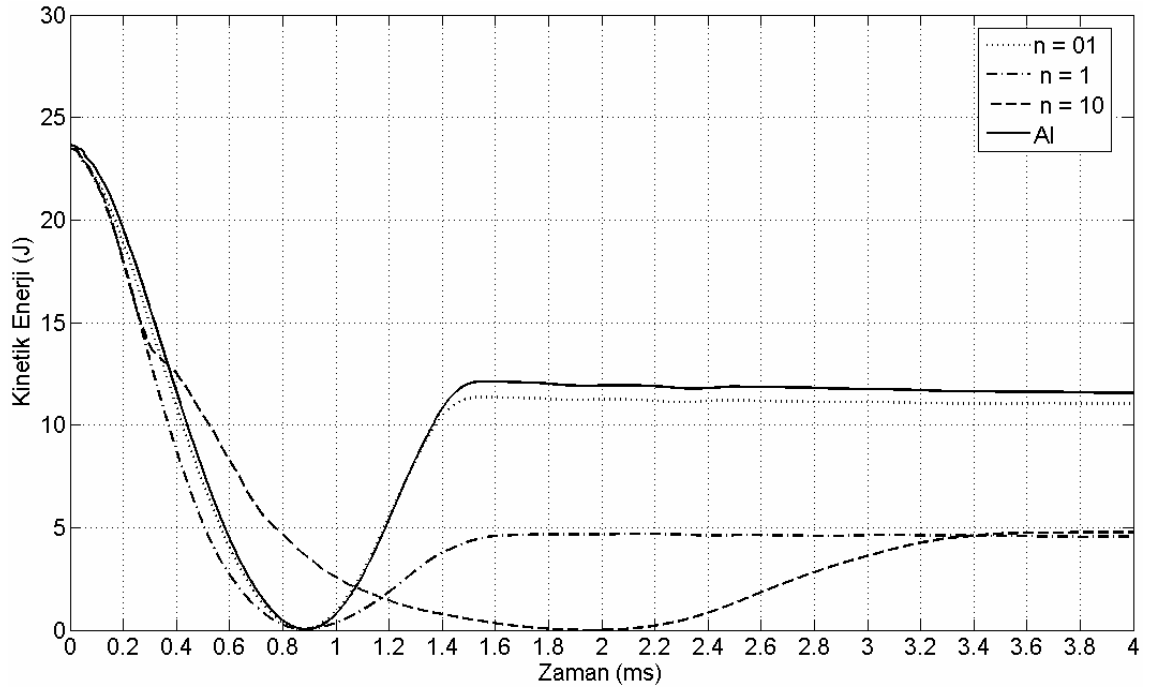
karakteristik değişimden uzaklaştıkları görülmektedir (Şekil 3.12a). Bu durum kinetik enerji-zaman eğrilerindeki değişimler ile de desteklenmektedir (Şekil 3.12b). Alt yüzeylerinden 22.7 Joule vurucu enerjisi ile darbeye maruz bırakılmış metal-zengin ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonlarına sahip plakaların ön ve arka yüzeylerinde darbe sonrası oluşan hasarlar Şekil 3.13’de görülmektedir. Artan malzeme kompozisyonu ile daha da sertleşen plakalarda oluşan hasarın mertebesinde artmıştır.

Plakalara üst yüzeylerinden yapılan darbe testleri sonucunda hiçbir çatlak hasarı oluşmazken (Şekil 3.11), darbe yükü plakalara alt yüzeylerinden tesir ettiğinde tüm plakalarda malzeme kompozisyonu ile orantılı olacak şekilde çatlak hasarlarının oluştuğu açıkça görülmektedir (Şekil 3.13). Böylece fonksiyonel kademelendirilmiş plakalara gelen darbe yükünün seramik-zengin yüzeylerce karşılanması back-effect nedeniyle plakaların arka yüzeylerinde oluşacak hasarın engellenmesi ve plakaların darbeye karşı yapısal bütünlüklerinin korunması açısından oldukça avantajlı bir durum olarak ortaya çıkmaktadır.

Fonksiyonel kademelendirilmiş, çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç ve saf metal plakaların darbeye karşı performanslarını karşılaştırmak için metal-zengin ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonlarına sahip

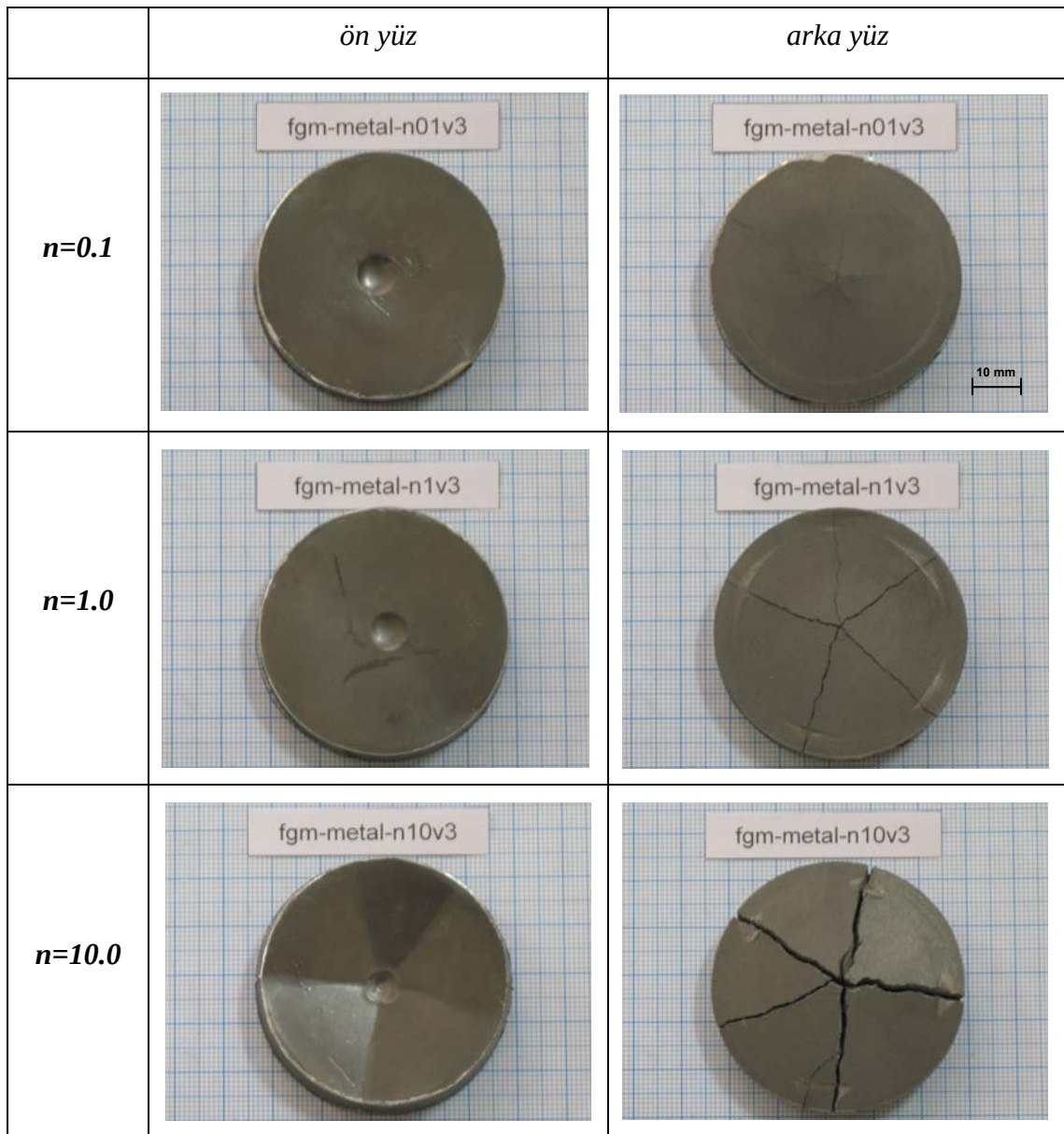


(a)



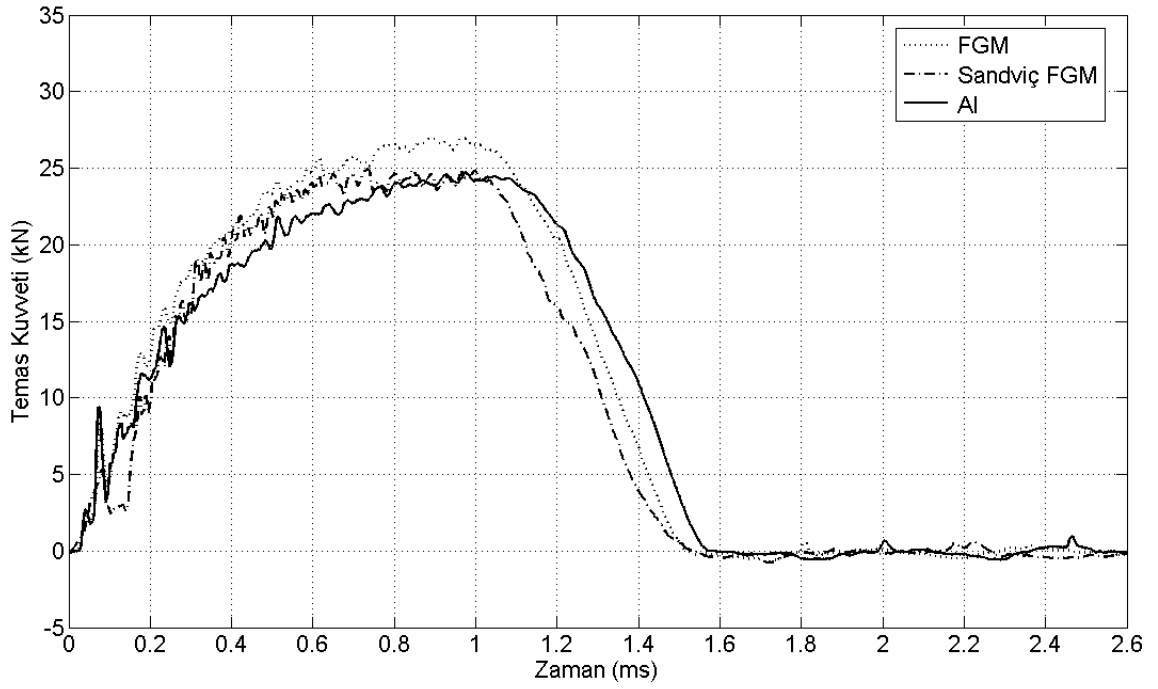
(b)

Şekil 3.12. Metal-zengin alt yüzeylerinden çarpmaya maruz fonksiyonel kademelendirilmiş ($n = 0.1$, 1.0 ve 10.0) dairesel plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

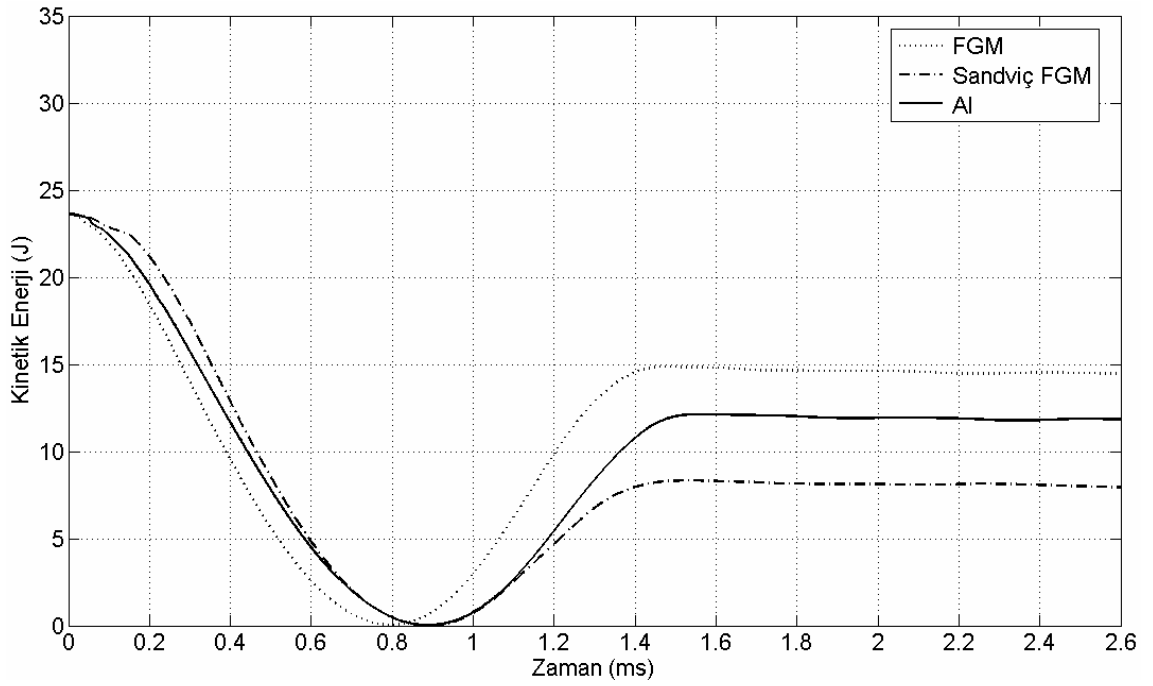


Şekil 3.13. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların alt yüzeylerinden yapılan düşük hızlı çarpma testleri sonrası plakalarda oluşan kalıcı izler ve hasarlar (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

plakaların alt ve üst yüzeylerinden 22.7 Joule vurucu enerjisiyle yapılan darbe testleri sonucunda temas kuvveti-zaman ve kinetik enerji-zaman değişimleri mukayese edildi. Şekil 3.14’de üst yüzeylerinden çarpmaya maruz metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın temas kuvveti-zaman ve kinetik enerji-zaman değişimleri görülmektedir. Her üç yapının temas kuvveti



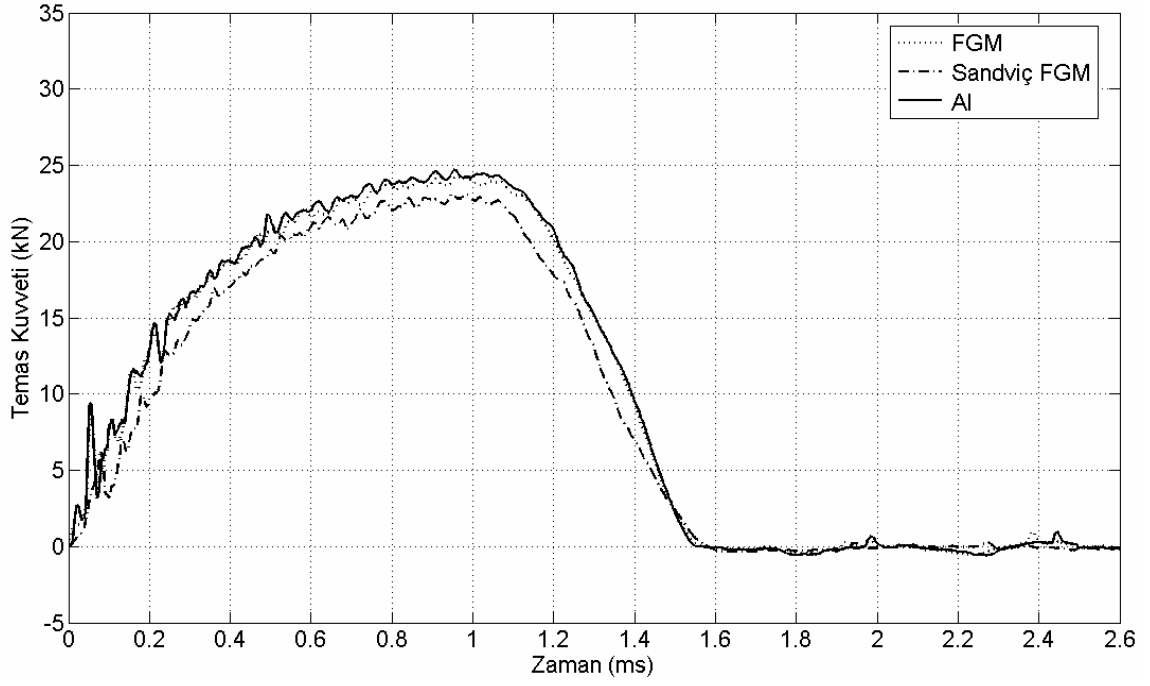
(a)



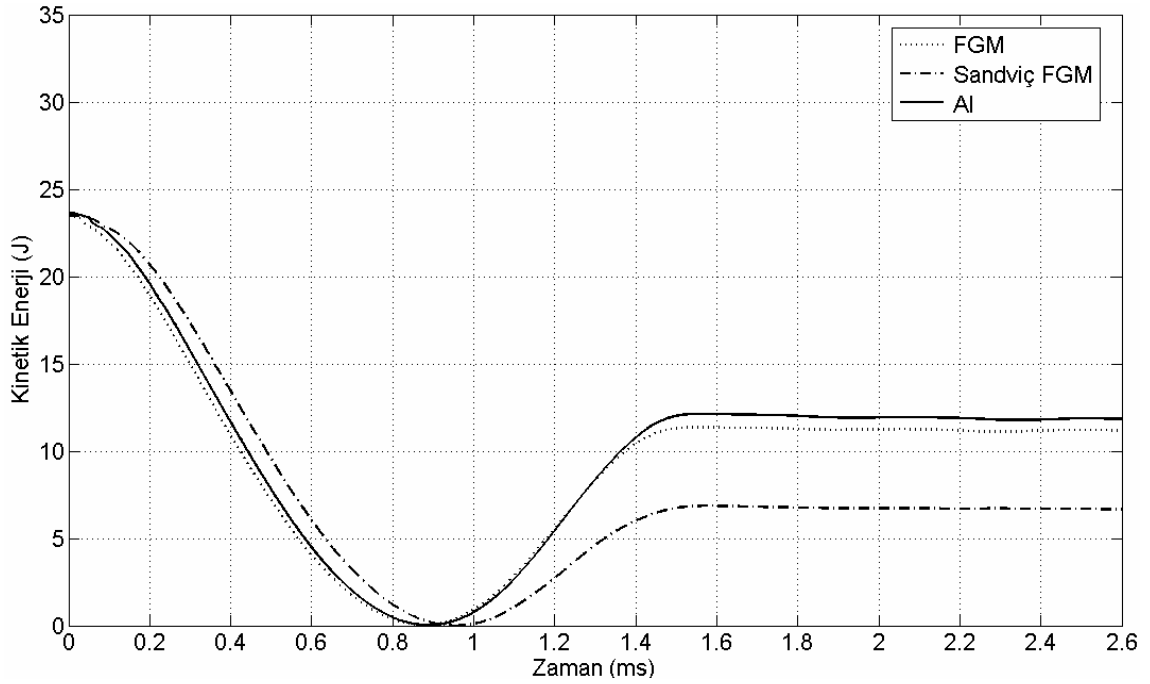
(b)

Şekil 3.14. Üst yüzeylerinden çarpmaya maruz metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

değişimleri benzer karakteristik gösterebilir, en yüksek temas kuvveti FGM plakada, en düşük temas kuvveti ise saf metal plakada görülmektedir (Şekil 3.14a). Kinetik enerji değişimleri incelendiğinde ise, enerjiyi en fazla absorbe eden yapı olarak çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakanın ön plana çıktığı görülmektedir. Şekil 3.15’de alt yüzeylerinden çarpmaya maruz metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın temas kuvveti-zaman ve kinetik enerji-zaman değişimleri görülmektedir. FGM plakada makro hasar oluşması (Şekil 3.13) nedeniyle temas kuvvetinde değerlerinde düşme olduğu görülmektedir (Şekil 3.15a). Her üç yapının kinetik enerji değişimleri incelendiğinde, makro hasarlar nedeniyle FGM plakada vurucunun ayrılma enerjisinin azalarak saf metale ait enerji seviyesinin altına düştüğü görülmektedir. Bununla beraber, sandviç FGM yapı yine enerji absorpsiyonu bakımından en avantajlı yapı olarak değerlendirilebilir (Şekil 3.15b). Üst yüzeylerinden çarpmaya maruz lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın temas kuvveti-zaman ve kinetik enerji-zaman değişimleri Şekil 3.16’da görülmektedir. Burada yine en yüksek temas kuvveti değeri vurucuyu karşılayan en sert yüzeye sahip FGM plakada görülürken, en düşük temas kuvveti ve en uzun temas süresi saf metal plakada görülmektedir (Şekil 3.16a). Enerji absorbe etme bakımından en avantajlı yapının burada da sandviç FGM yapı olduğu aşıkardır (Şekil 3.16b). Şekil 3.17’de alt yüzeylerinden çarpmaya maruz lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın temas kuvveti ve kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri görülmektedir. Burada FGM plakada oluşan makro çatlak hasarları nedeniyle (Şekil 3.13) temas kuvveti ve enerji değerlerinin azaldığı görülmektedir. Hem temas kuvveti hem de enerji depolama bakımından yine sandviç FGM yapı avantajlı görülmektedir. Şekil 3.18, üst yüzeylerinden çarpmaya maruz seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın temas kuvveti-zaman ve kinetik enerji-zaman değişimlerini göstermektedir. En yüksek temas kuvveti değeri FGM plakada, sandviç FGM plakaya göre yaklaşık 5kN daha yüksek iken temas süreleri hemen hemen aynıdır. En düşük temas kuvveti ve en yüksek temas süresi yine saf metal plakada hasıl olmuştur

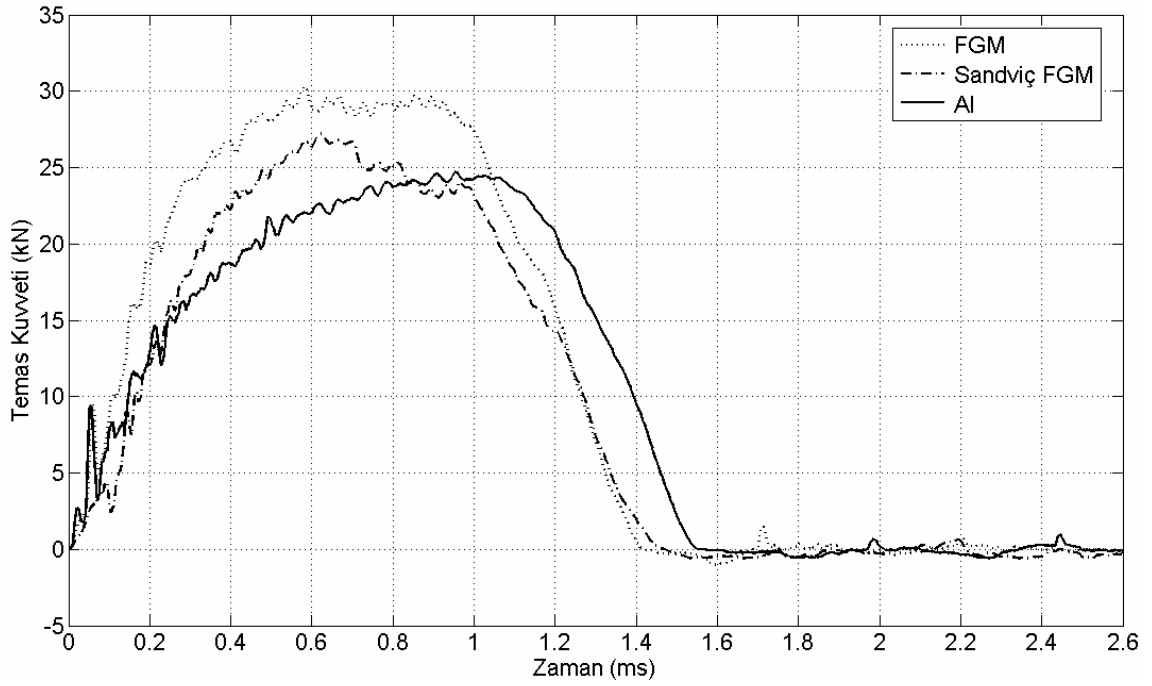


(a)

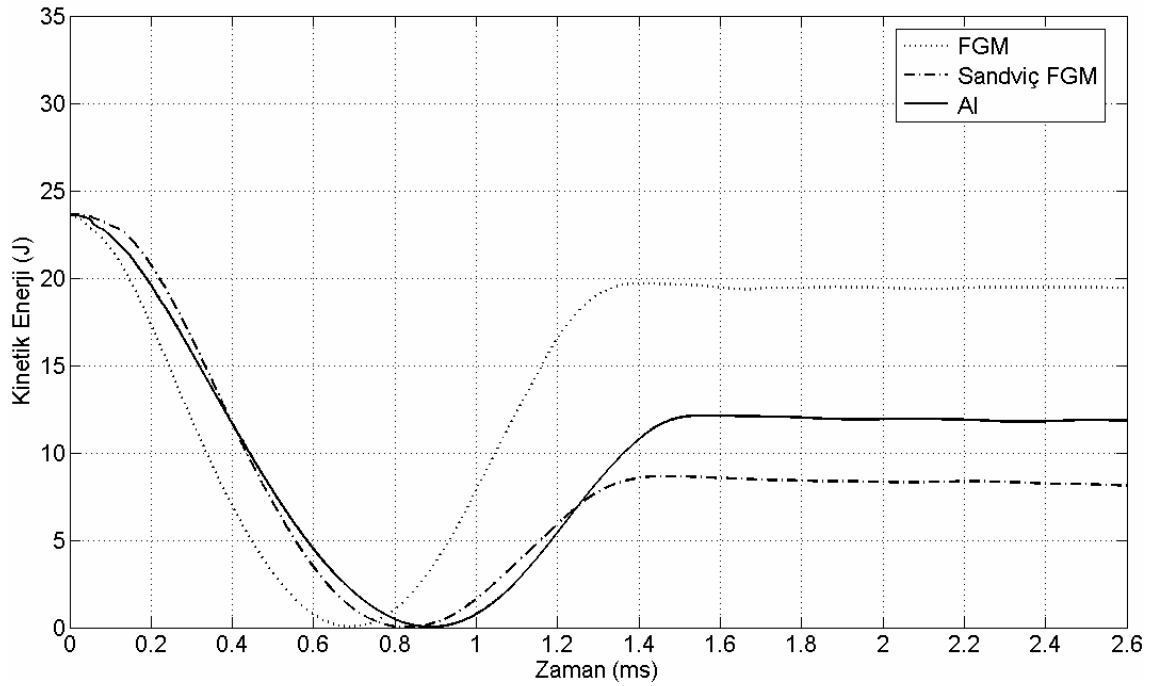


(b)

Şekil 3.15. Alt yüzeylerinden çarpmaya maruz metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

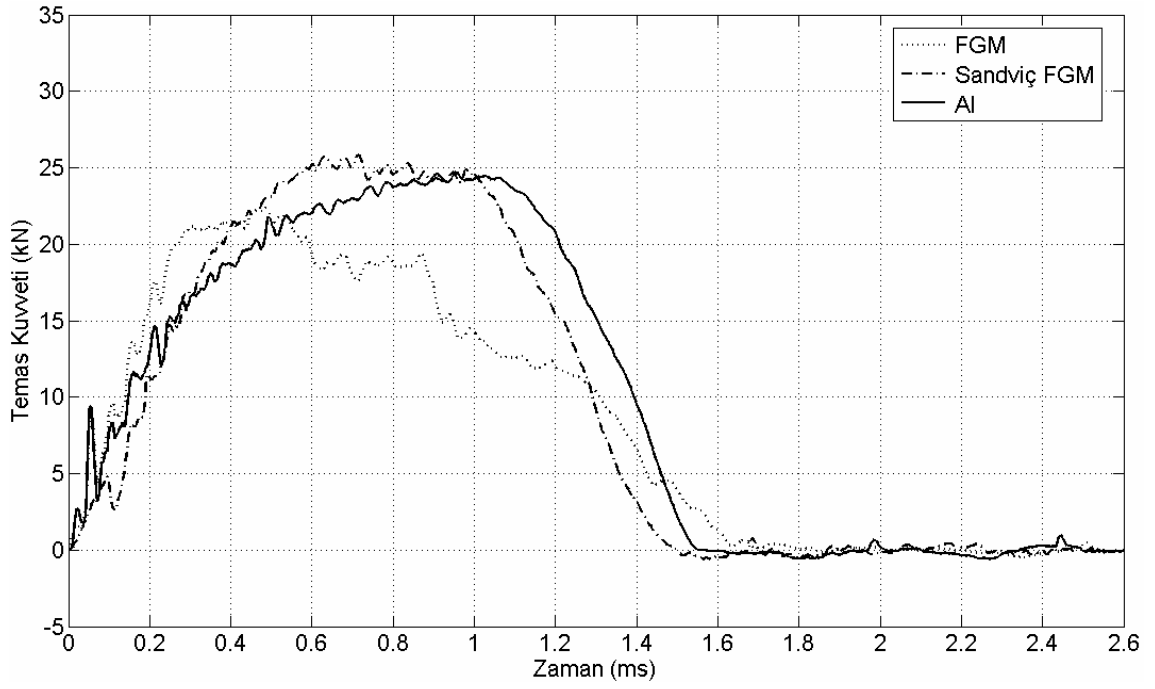


(a)

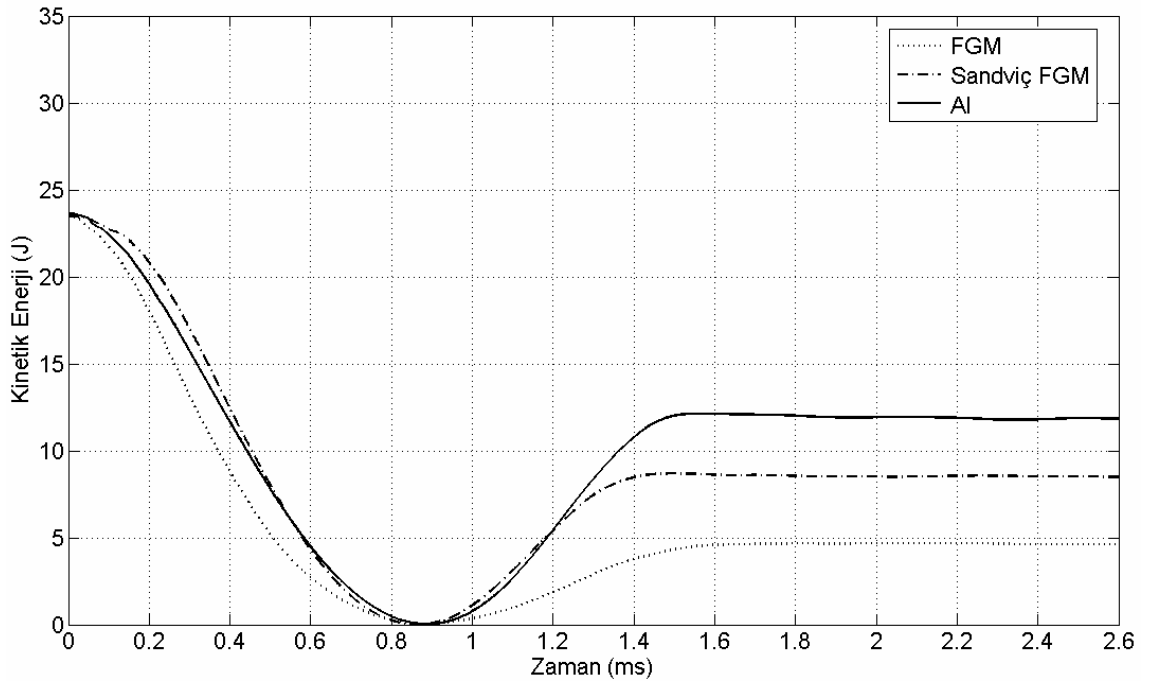


(b)

Şekil 3.16. Üst yüzeylerinden çarpmaya maruz lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

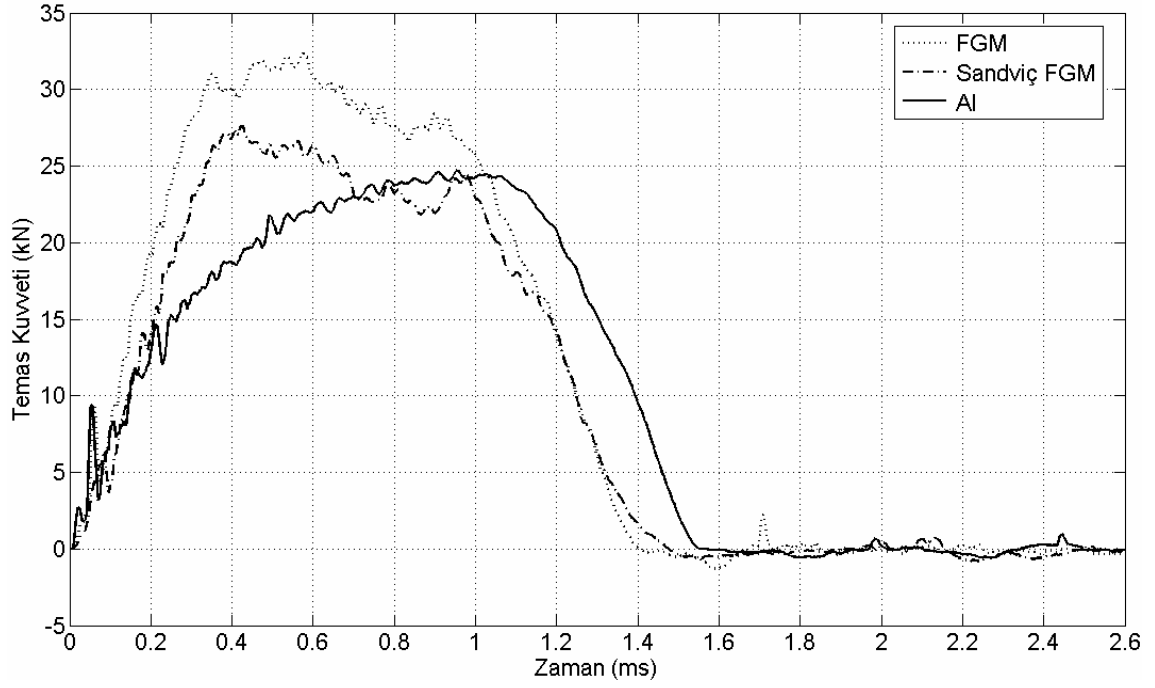


(a)

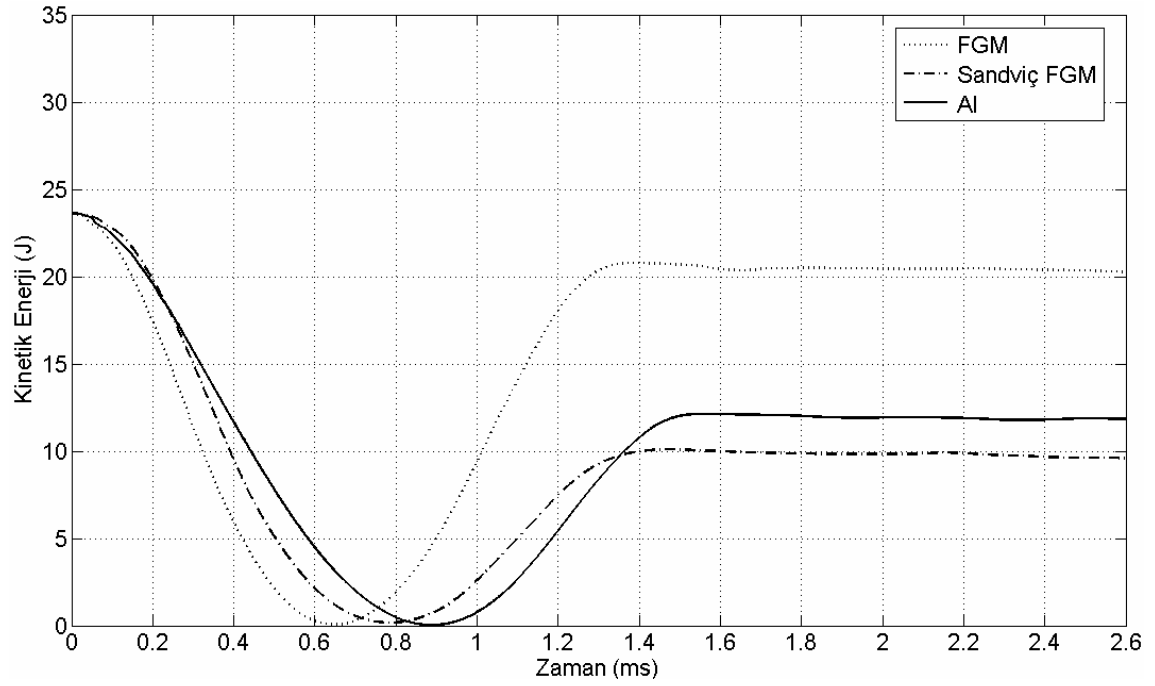


(b)

Şekil 3.17. Alt yüzeylerinden çarpmaya maruz lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

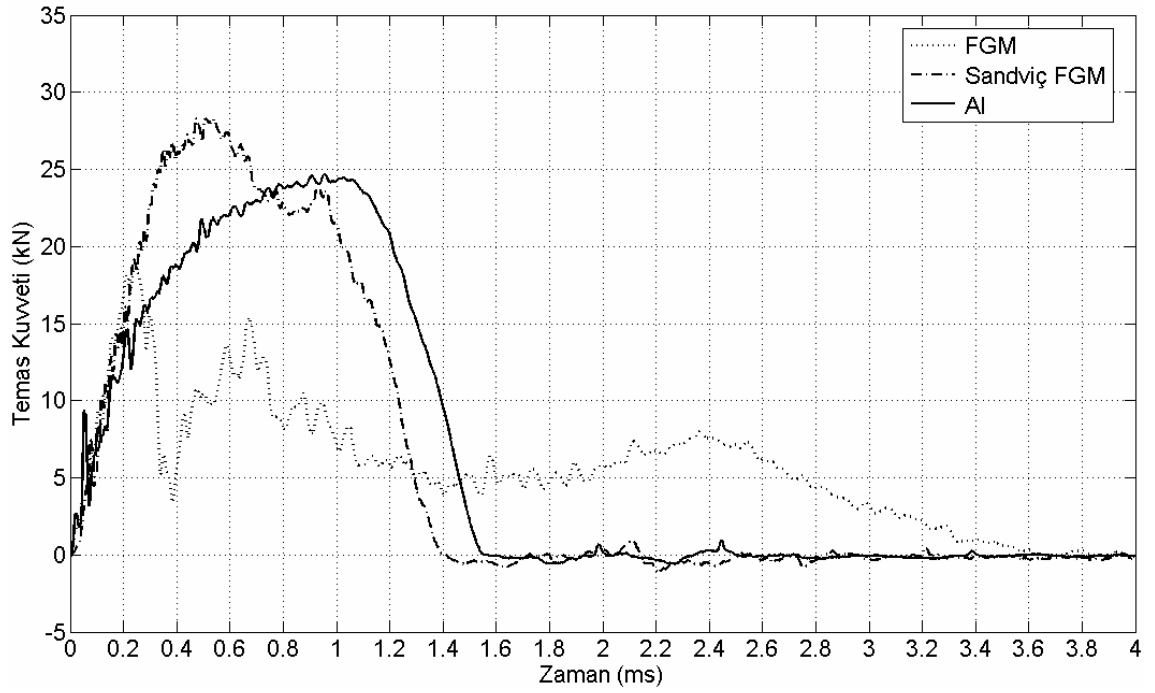


(a)

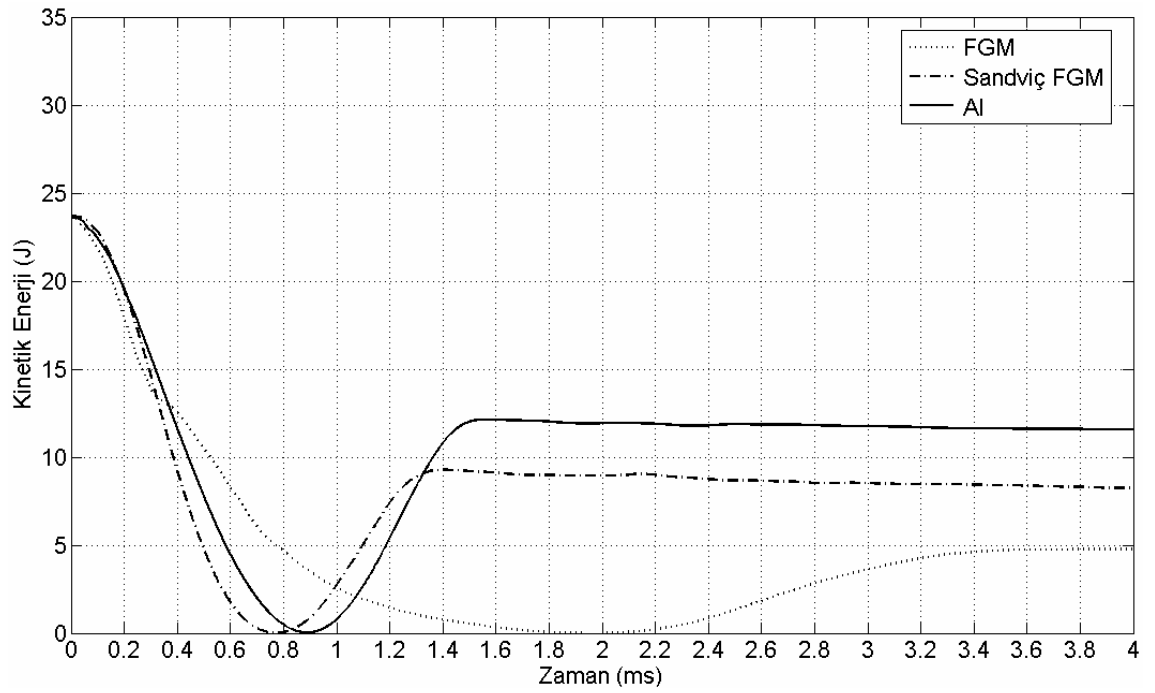


(b)

Şekil 3.18. Üst yüzeylerinden çarpmaya maruz seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).



(a)



(b)

Şekil 3.19. Alt yüzeylerinden çarpmaya maruz seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın (a) temas kuvveti ve (b) kinetik enerjilerinin zamana göre değişimleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

(Şekil 3.18a). Enerjiyi en fazla absorbe eden yapı yine sandviç FGM plakadır (Şekil 3.18b). Son olarak, alt yüzeylerinden çarpmaya maruz seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile saf metal plakanın temas kuvveti-zaman ve kinetik enerji-zaman değişimleri ise Şekil 3.19’da görülmektedir. Kompozisyonel gradyanttaki artışa bağlı olarak iyice gevrekleşen FGM plakada oluşan ileri derecedeki çatlak hasarları nedeniyle (Şekil 3.13) temas kuvveti ve kinetik enerji değişimleri karakteristik değişimlerini tamamen kaybetmişlerdir. Burada da gerek temas kuvveti gerekse enerji absorpsiyonu açısından en avantajlı yapı olarak sandviç FGM yapı ön plana çıkmaktadır (Şekil 3.19).

Aynı üretim şartlarında ve aynı geometrilerde üretilen FGM, sandviç FGM ve saf metal plakalar aynı enerji seviyesinde üst ve alt yüzeylerinden darbeye maruz bırakılarak, darbeye karşı olan cevapları mukayese edildi. Darbe yükü plakalara üst yüzeyden geldiğinde, temas kuvveti FGM plakalarda en yüksek iken absorbe edilen darbe enerjisi sandviç FGM plakalarda en yüksektir. Darbe alt yüzeyden uygulandığında ise hem temas kuvveti hemde enerji absorpsiyonu sandviç FGM plakalarda yüksektir. Sonuç olarak, gerek hasar oluşumuna karşı yapının bütünlüğünün korunması, gerek temas kuvveti ve gerekse enerji absorbe etme bakımından en avantajlı yapının sandviç FGM yapı olduğu söylenmelidir.

3.3. Metalografik ve Mikromekanik Bulgular

Çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç numuneler darbe testlerinden sonra, darbeye uğramış bölge ve bu bölge altındaki yapının metalografik ve mikromekanik analizleri için Şekil 3.20’de görüldüğü gibi kesilerek kesit yüzeyleri incelemeye tabi tutulmuştur. Kesme işlemleri tel erezyon tezgahında gerçekleştirilerek metalografik inceleme yapılacak numunelerin mekanik kesme sırasında hasar görmeleri engellenmiş ve darbe etkisi altında şekil değiştirmiş bölgeden hassas kesit alınması sağlanmıştır.

Darbe etkisi altındaki bölgeden kesit alınarak çıkarılan numune kesit yüzeyleri sırasıyla 320P, 400P, 600P, 800P, 1000P, 1200P ve 2000P su zımparasıyla zımparalanıp parlatıldıktan sonra çuha üzerinde sırasıyla 9 μm , 3 μm ve 1 μm elmas parçaçık içeren solüsyonlarla nihai parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Zımparalama sırasında düşük yük ve düşük devir sayıları seçilerek kesit yüzeyinde takviye elemanı SiC parçaçıklarının hasara uğratılmamasına özen gösterilmiştir. Alüminyum matriks fazının

tane boyut dağılımı ve darbe etkisi altında şekil değiştirme davranışının metalografik analizini yapabilmek için parlatılan numune yüzeyleri Keller dağlayıcı (5ml HF-10ml H_2SO_4 -85 ml H_2O) ile 10-20 s süreyle dağlanmıştır.



Şekil 3.20. Darbe deneyinden sonra metallografik analiz için numuneden kesit alınması.

Kesit yüzeyleri parlatılan numuneler düşük büyütme makroskop ve yüksek büyütme optik mikroskopta incelenerek, yapı içerisindeki SiC takviye elemanının kesit içerisindeki dağılımı, darbe etkisi altında plastik şekil değiştirmiş bölgenin geometrisi ve bu bölgenin hemen altındaki matriks (Al) ve SiC takviye elemanı davranışı, matriks fazının tane yapısı ve hasar oluşumları bakımından FGM yapısı üretim parametrelerine ve yükleme tarzına bağlı olarak karakterize edilmiştir.

Numunelerin mikromekanik analizi, parlatılmış numune kesit yüzeyinde metal taraftan seramik tarafa doğru kesit boyunca sertlik taraması yapılarak gerçekleştirilmiştir. Geleneksel metal malzemelerde yüzeyden olan uzaklığa bağlı olarak sertlik değişiminin belirlenmesinde mikrosertlik taraması uygun bir yöntem olarak görülürken bu çalışmadaki gibi seramik takviyeli kompozit malzemelerde özellikle yüksek hacim oranlarında seramik takviye elemanının bulunduğu durumlarda mikrosertlik taraması iyi sonuç vermemektedir. Bunun temel sebeplerinden birisi seramik takviye elemanının iz

oluşumunu ve izin boyutlarının doğru bir şekilde okunmasını engellemesidir. Bu çalışmada sertlik taramaları Rockwell sertlik ölçüm cihazı tablası üzerine yerleştirilen ve numunenin batıcı uç altında belirli mesafelerle hareket ettirilmesini sağlayıcı özel bir düzenek kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri HR_T ölçüm skalasında 1/16 inç çelik bilye 15 kg yük altında numune yüzeyine 10 s bastırılması ile yüzeyden başlayarak 1 mm ilerlemelerle ve herbir seviyede üçer ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiştir.

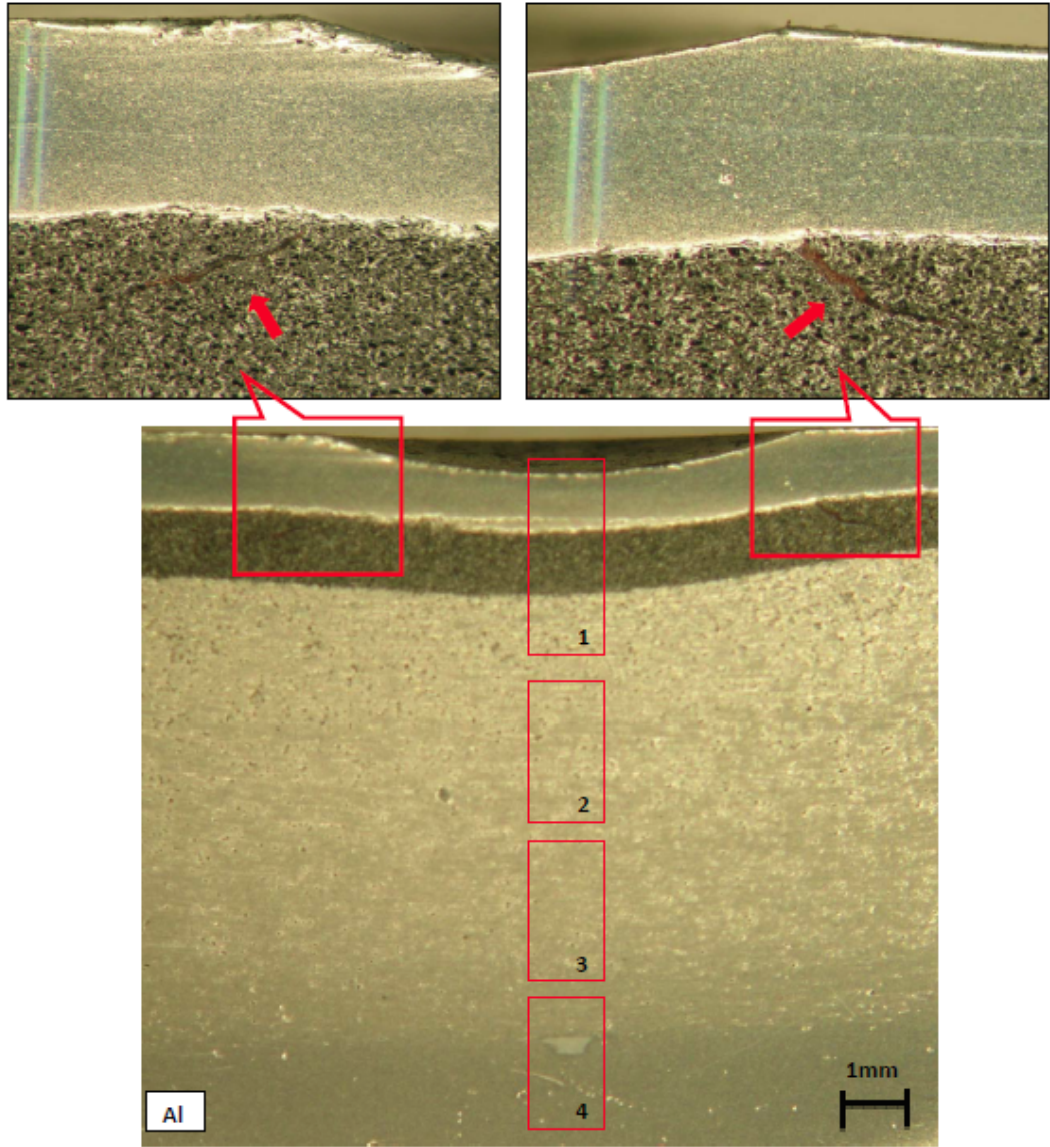
Vurucu enerjisi 22.7 Joule ($v = 3\text{m/s}$) için farklı malzeme kompozisyonlarına ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) sahip çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç numunelerin alt ve üst taraftan yapılan çarpma testleri sonrasında metalografik ve mikromekanik incelemeleri yukarıda bahsedildiği şekilde yapılarak aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

3.3.1. Malzeme kompozisyonunun etkisi:

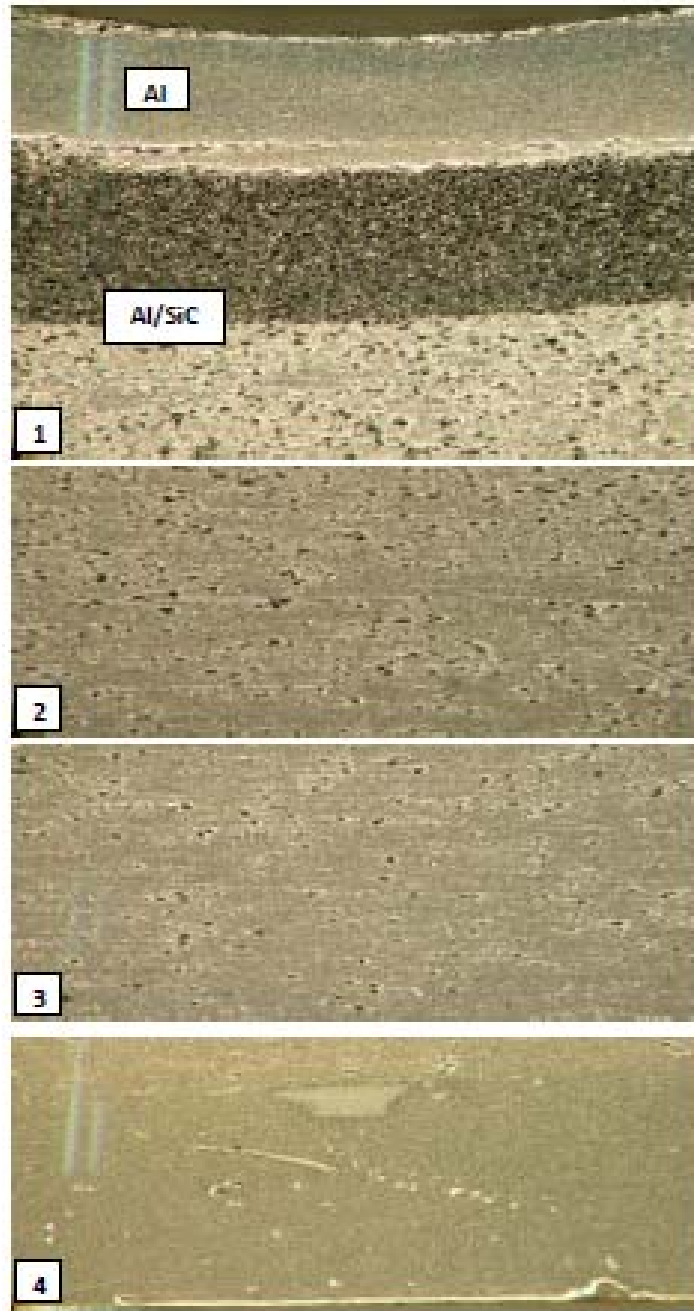
Metal-zengin ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 10.0$) olarak üretilen çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç numuneler 22.7 Joule vurucu enerjisi ile üst yüzeylerinden çarpmaya maruz bırakılmıştır.

Şekil 3.21’de 22.7 Joule vurucu enerjisinde üst yüzeyden darbeye maruz bırakılan metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyona sahip numunenin çarpma sonrası kesiti görülmektedir. Bu kesite ait ayrıntılar ise Şekil 3.22’de verilmiştir. Numune kesiti boyunca malzeme kompozisyonundaki değişimin teorik karışım kuralına uygun olarak sağlandığı görülmektedir. Matriks yapı içerisinde seramik takviye elemanın arzu edilen fonksiyonel dağılımı sağladığı ve herhangi bir topaklanma veya çökkelmenin oluşmadığı gözlenmiştir (Şekil 3.21 ve 3.22). Numunede darbeye maruz bölge yakından incelendiğinde saf metal yüzey tabakada küresel vurucu uç formuna uygun olarak çökme şeklinde bir plastik deformasyonun oluştuğu görülmektedir. Aynı formda bir plastik deformasyonun bu tabakanın hemen altındaki %70 seramik ihtiva eden katmanda da oluştuğu görülebilmektedir. Bu %70 seramik-zengin tabaka yakından incelendiğinde iz kenarlarına rastlayan bölgelerin hizasında çatlakların oluştuğu görülmektedir. Bu çatlak oluşumu iki temel sebebe bağlanabilir. İlki, iz kenarları şekil değiştiren tabakada ankastre mesnet gibi davranarak buralarda yüksek kesme gerilmeleri oluşmaktadır. İkincisi ise, metal-zengin malzeme kompozisyonu nedeniyle %70 seramik içeren gevrek katmandan hemen altındaki %13.80 seramik içeren sünek katmana ani geçiş nedeniyle katmanlar arasında mekanik uyumsuzluktur (Şekil 3.21).

Bununla birlikte, oluşan çatlaklar yakından incelendiğinde, çatlakların sadece %70 seramik içeren katman içerisinde kaldığı, sünek olan alt ve üst katmanlara geçmediği görülmüştür. Buradan, metal-zengin ($n = 0.1$) kompozisyona sahip çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların darbe yükü altında özellikle saf metal katman altındaki seramik yoğun tabakanın hasar oluşumu açısından kritik bölge olduğu sonucuna varılmıştır.



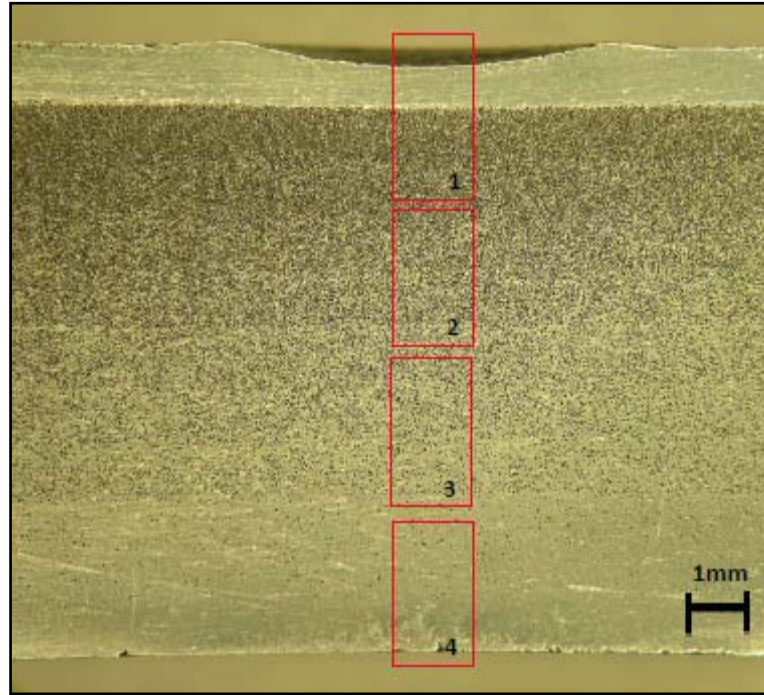
Şekil 3.21. Vurucu enerjisi 22.7 Joule ile üst yüzeyden darbeye maruz bırakılmış metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyona sahip numunenin çarpma sonrası kesit görüntüsü.



Şekil 3.22. Üst yüzeyden 22.7 Joule vurucu enerjisi ile darbeye maruz bırakılmış ve Şekil 3.21’de gösterilen metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip numunenin çarpma sonrası kesit görüntüsünün ayrıntıları.

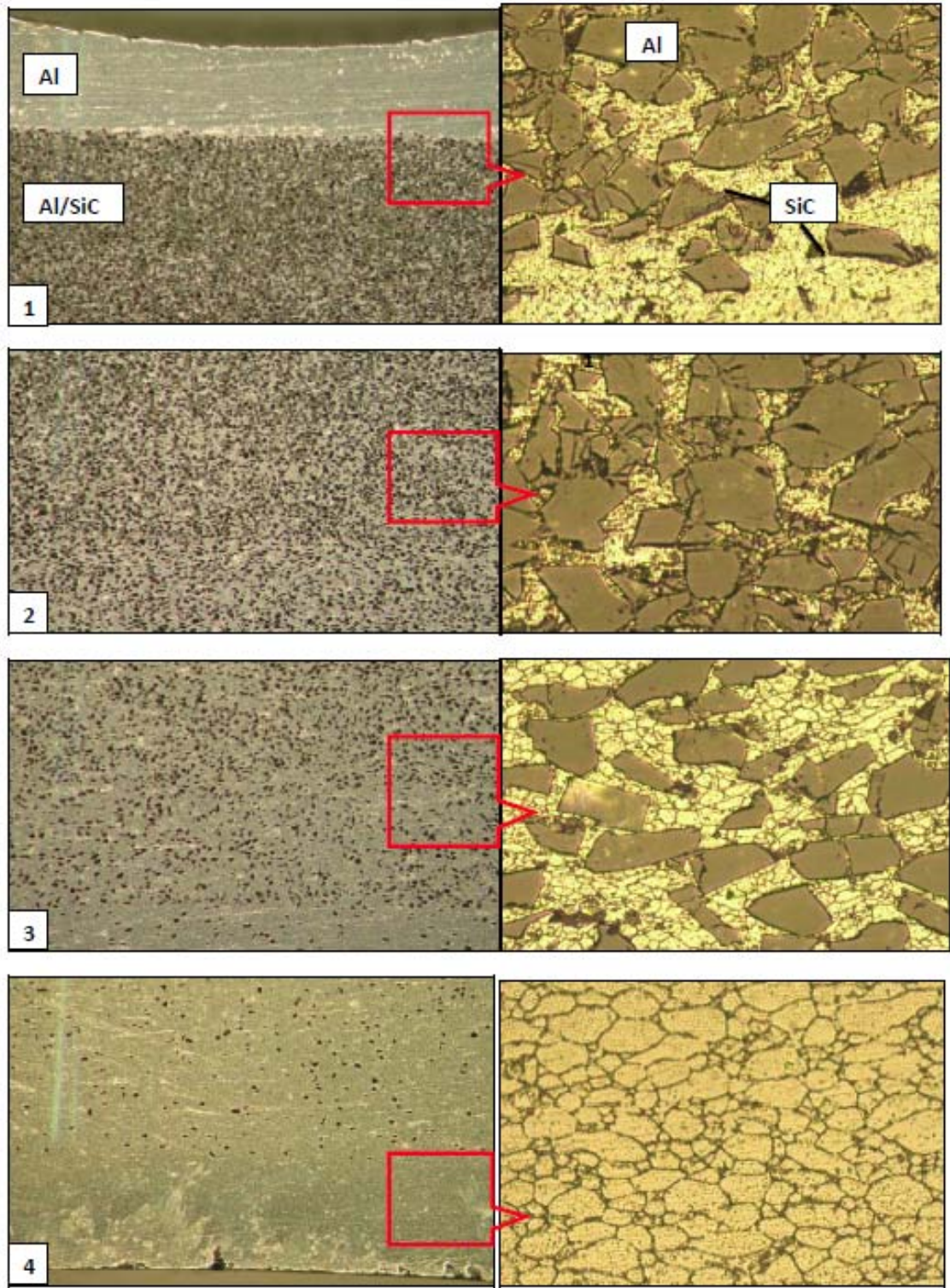
Şekil 3.23’de vurucu enerjisi 22.7 Joule iken üst yüzeyden darbeye maruz bırakılmış lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunenin çarpma sonrası kesiti görülmektedir. Bu kesite ait ayrıntılar ise Şekil 3.24’te verilmiştir. Numune kesiti

boyunca malzeme kompozisyonundaki değişimin teorik karışım kuralına uygun olarak sağlandığı görülmektedir. Bu malzeme kompozisyonunda da plaka kalınlığı boyunca istenen fonksiyonel değişime uygun olarak katmanlar içerisinde SiC partiküllerinin homojen olarak dağıldığı ve herhangi bir topaklanmanın oluşmadığı görülmektedir (Şekil 3.24). Darbeye maruz bölge yakından incelendiğinde plastik deformasyonun tamamen en üst saf metal katmanda olduğu, alt katmanlarda herhangi bir plastik deformasyonun oluşmadığı katmanlararası sınırın doğrusallığından anlaşılmaktadır. Üst saf metal katman ile hemen altındaki %70 seramik içeren katman arasında herhangi bir hasarın oluşmadığı da anlaşılmaktadır (Şekil 3.24-1). Dağlanmış numune kesit yüzeyi incelendiğinde Al matriks malzemenin toz tane sınırları net olarak görülmektedir (Şekil 3.24-3 ve 4).



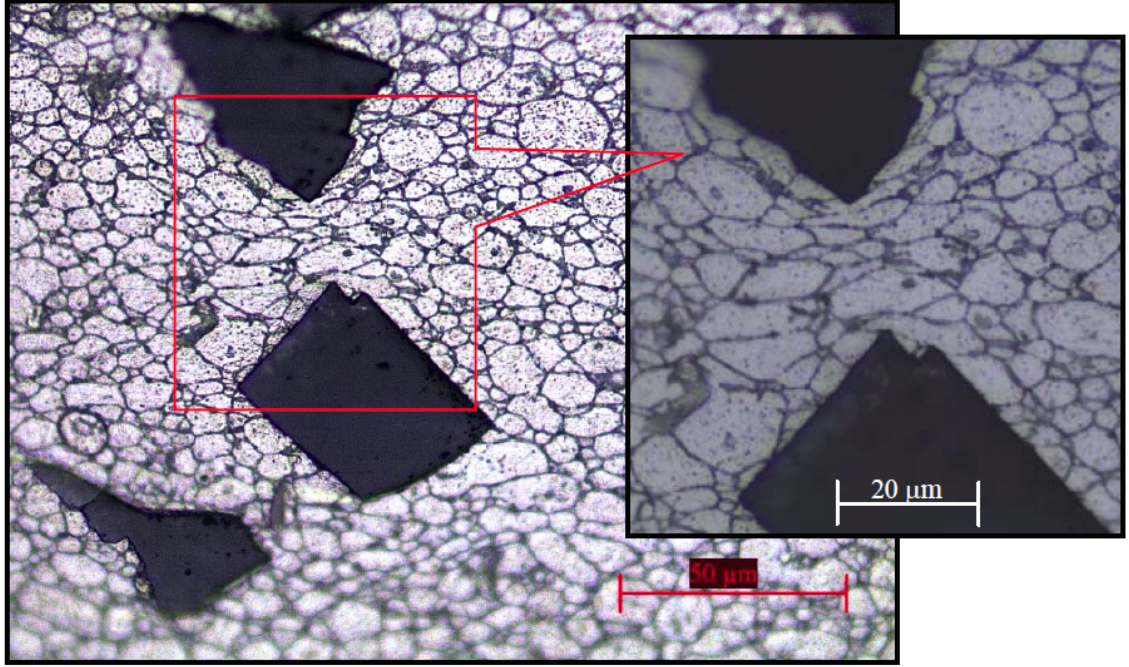
Şekil 3.23. Vurucu enerjisi 22.7 Joule iken üst yüzeyden darbeye maruz bırakılmış lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyona sahip numunenin çarpma sonrası kesit görüntüsü.

Seramik parçacığın Al matriks yapı içerisindeki durumu yakından incelendiğinde üretim sırasında oluşan basınç etkisiyle Al toz partiküllerin seramik partiküller etrafında farklı



Şekil 3.24. Üst yüzeyden 22.7 Joule vurucu enerjisi ile darbeye maruz bırakılmış ve Şekil 3.23’ de gösterilen lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunenin çarpma sonrası kesit görüntüsünün ayrıntıları.

şekil değiştirme davranışından dolayı plastik olarak akarak eş eksenli tanelerin bu bölgelerde uzadığı görülmektedir (Şekil 3.25).

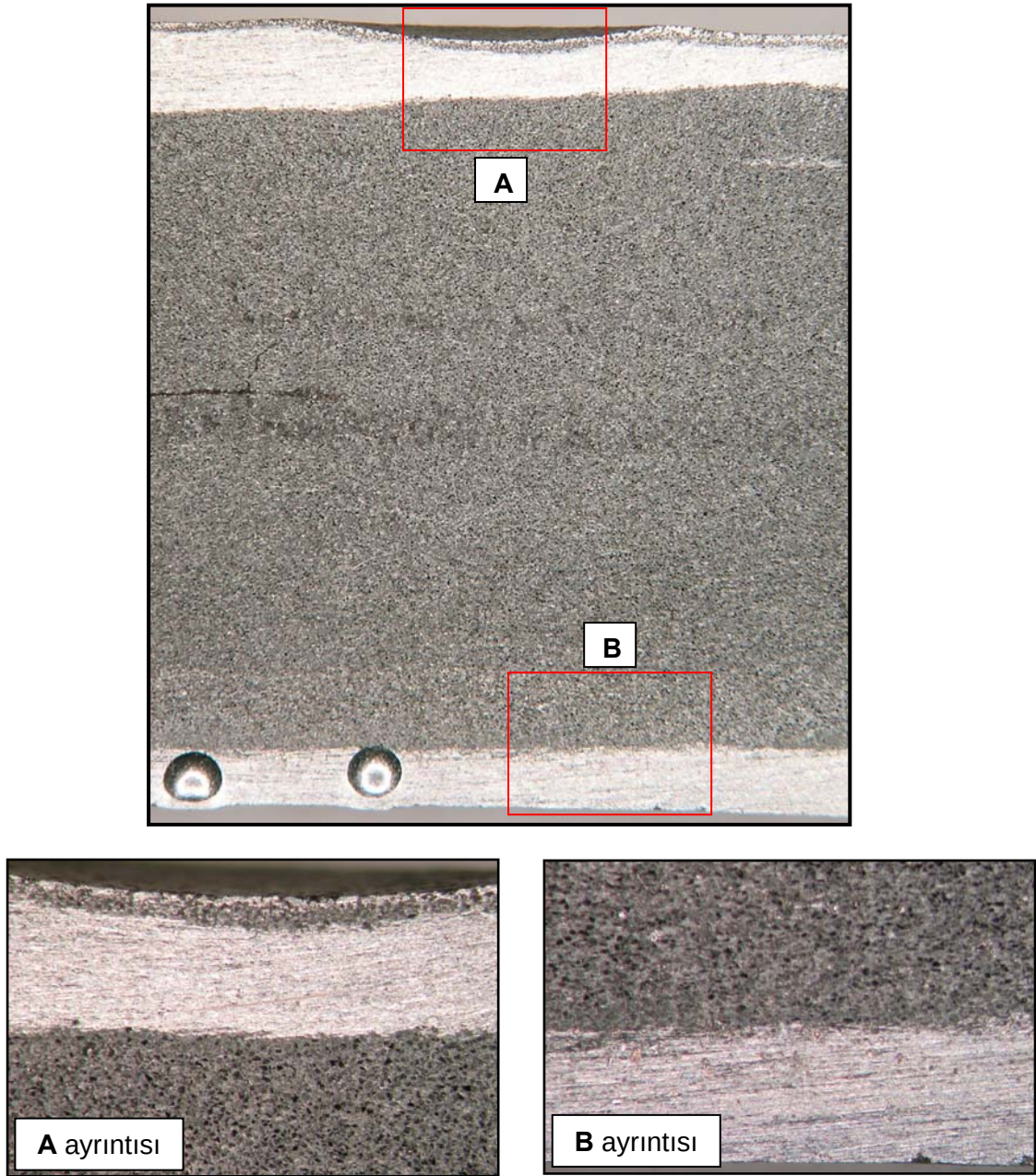


Şekil 3.25. Seramik partikül çevresinde Al partiküllerin tane görüntüsü.

Şekil 3.26’da 22.7 Joule vurucu enerjisi ile üst yüzeyden darbeye maruz bırakılmış seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunenin çarpma sonrası kesiti ve bu kesite ait ayrıntılar görülmektedir. Numune kesiti boyunca malzeme kompozisyonundaki değişimin teorik karışım kuralına uygun olarak sağlandığı görülmektedir. Bu malzeme kompozisyonunda da plaka kalınlığı boyunca istenen fonksiyonel değişime uygun olarak katmanlar içerisinde SiC partiküllerinin homojen olarak dağıldığı ve herhangi bir topaklanmanın oluşmadığı görülmektedir (Şekil 3.26). Darbeye maruz bölge yakından incelendiğinde plastik deformasyonun tamamen en üst saf metal katmanda oluştuğu, alt katmanlarda herhangi bir plastik deformasyonun ve katmanlararası herhangi bir hasarın oluşmadığı anlaşılmaktadır.

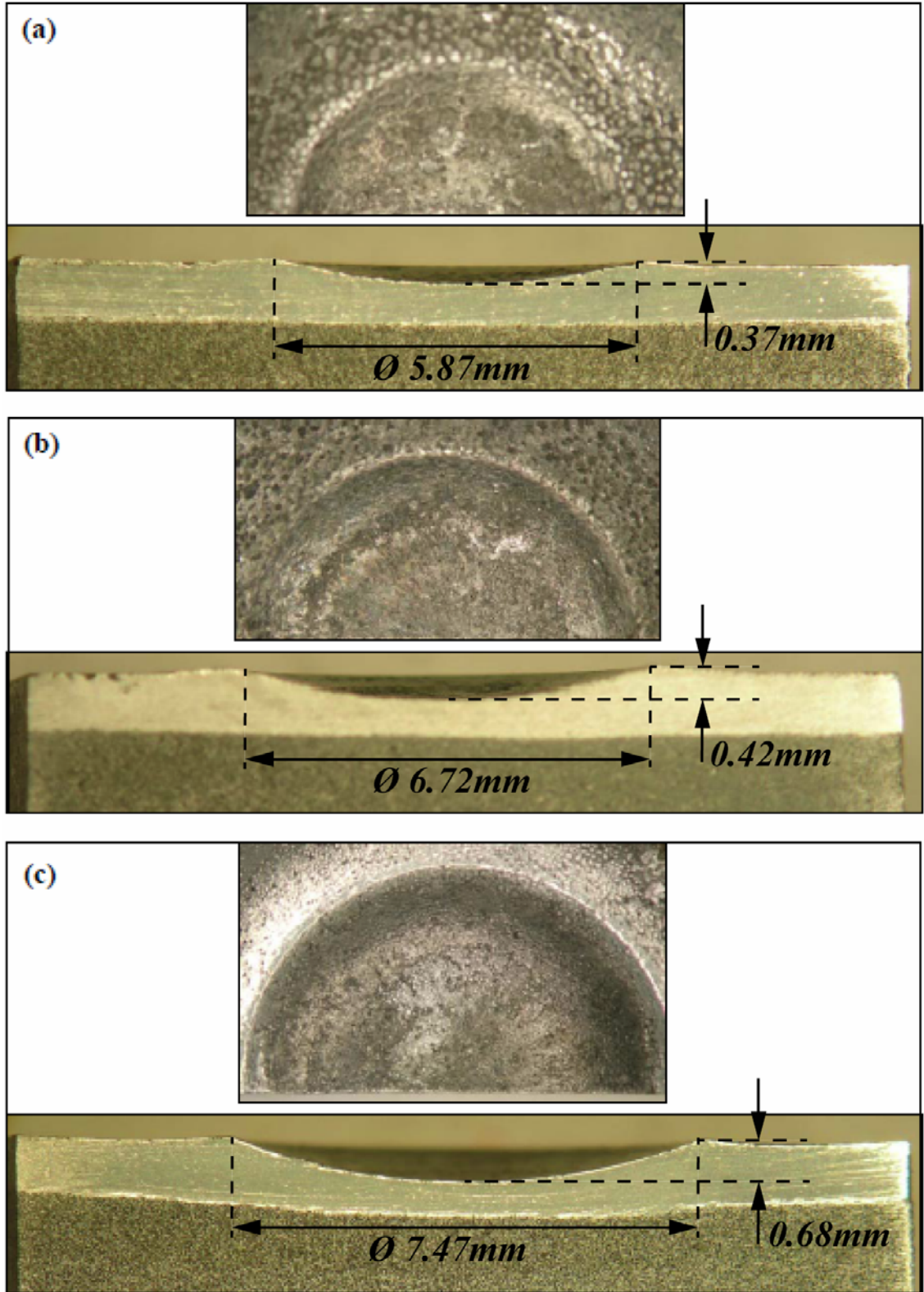
3.3.2. Vurucu enerjisinin etkisi:

Lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç numuneler üst yüzeylerinden üç farklı vurucu hızına ($v = 2, 3$ ve 4 m/s) karşılık gelen vurucu enerjilerinde (10.09, 22.7 ve 40.36 Joule) darbeye maruz bırakılmışlardır. Darbe sonrası yüzeylerde oluşan kalıcı deformasyonların kesit ve üst görüntüleri Şekil 3.27’de görülmektedir. Artan vurucu enerjisi ile numune



Şekil 3.26. Vurucu enerjisi 22.7 Joule iken üst yüzeyden darbeye maruz bırakılmış seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyona sahip numunenin çarpma sonrası kesit görüntüsü ve ayrıntıları.

yüzeyinde oluşan izin çapı ve derinliği artmaktadır. Ayrıca vurucu enerjisi arttıkça üst yüzeydeki saf metal katmanda oluşan deformasyonun alt katmana iletildiği görülmektedir. Bununla beraber iz kenarlarında kabarmaların olduğu da izlenmiştir. Çarpma sonrası numunelerin iz yüzeyleri incelendiğinde küresel vurucu uç ile numune yüzeyinin etkileşimi sonucunda temas yüzeyinde şekil değiştirmeye bağlı olarak radyal



Şekil 3.27. Lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunelerde darbe sonrası yüzeylerde oluşan kalıcı deformasyonların kesit ve üst görüntüleri. Vurucu enerjisi a) 10.09 J, b) 22.7 J ve c) 40.36 J.

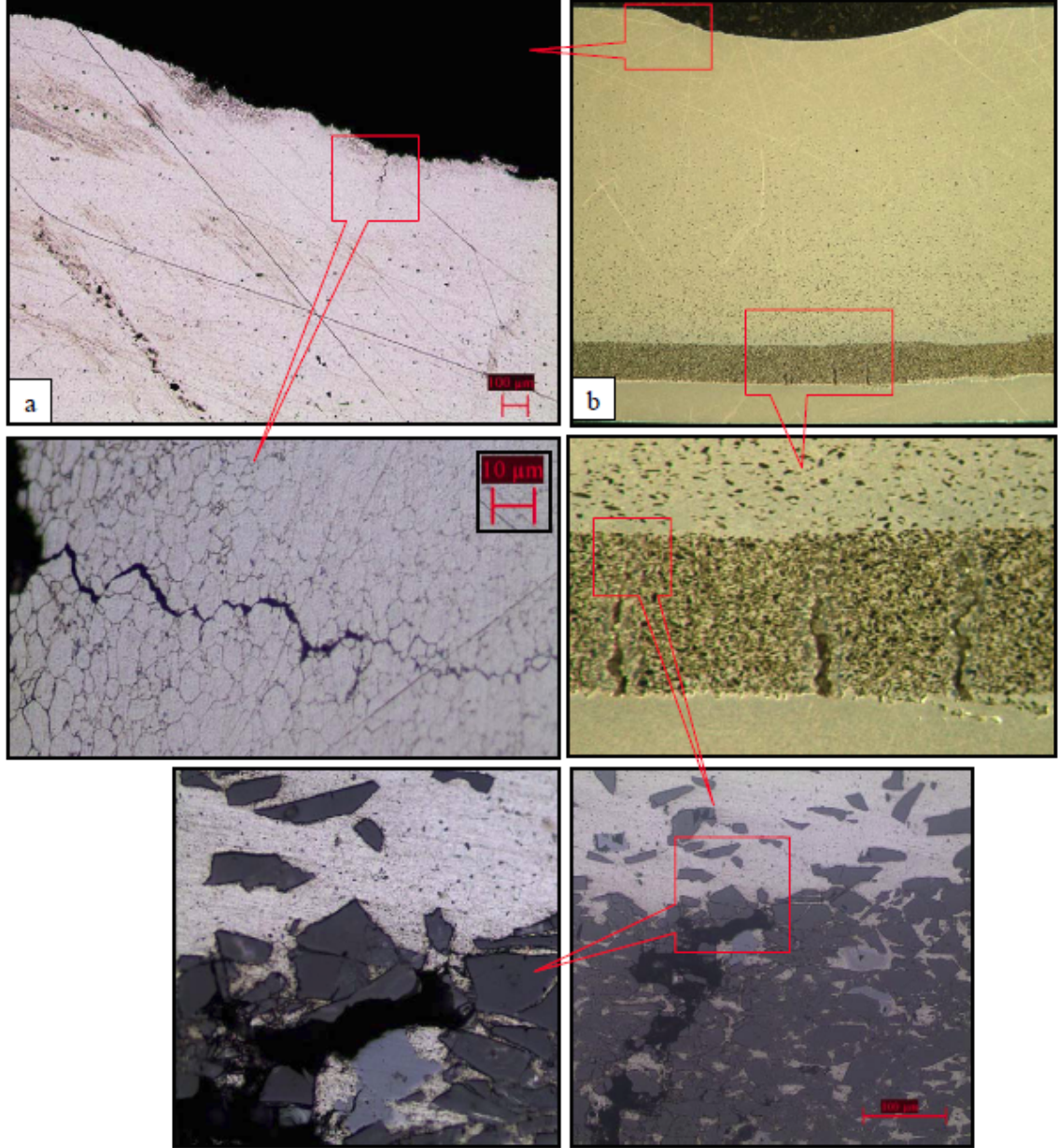
doğrultuda oluşan sürtünme izleri göze çarpmaktadır. Bu durum darbe enerjisinin bir kısmının vurucu ve numune yüzeyi arasında oluşan sürtünme kuvvetine harcandığını göstermektedir.

Alt yüzeylerinden çarpma yüküne maruz çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç numunelere çarpma testleri sonrasında yapılan metalografik incelemeler sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

Şekil 3.28, metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip numunede 22.7 Joule vurucu enerjisi ile alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası oluşan hasarları göstermektedir. Darbeye maruz yüzeyde tabana doğru ilerleyen kılcal bir çatlakla rastlanmıştır. Bu çatlak ayrıntılı incelendiğinde Al toz partikül tane sınırlarını takip ederek ilerleyen tanelerarası türden bir çatlak olduğu görülmektedir. Çatlağın yüzeyden tabana doğru yaklaşık 150 μm ilerleyerek sonlandığı görülmektedir (Şekil 3.28a). Böyle bir hasara üretim sırasında toz taneleri arasında yeterli arayüzey bağının oluşmaması sebep olarak düşünülebilir. Öte yandan Şekil 3.28b’de tabandaki saf metal katmanının hemen üzerindeki %70 seramik yoğun katmanda darbe izi hizasında çatlaklar oluştuğu görülmektedir. Bu çatlaklar detaylı incelendiğinde çatlak ağzının seramik yoğun tabakanın alt kısmında olduğu ve çatlak ilerlemesinin üstteki tabakaya doğru olduğu anlaşılmaktadır. Ancak bu çatlak ilerlemesinin yapının malzeme kompozisyonu nedeniyle %13.80 seramik içeren daha sünek üst komşu katman sınırında durduğu görülmektedir. Çatlak karakteristiği dikkate alındığında, seramik yoğun tabakanın alt kısmında darbe etkisi sebebiyle oluşan eğilmeden kaynaklanan çekme gerilmesinin etkin olduğunu ve bununda gevrek olan bu tabakada çatlak başlangıcına sebep olduğu söylenebilir. Esasen darbe esnasında maksimum çekme gerilmesine maruz olan saf metal en alt katmanda çatlak hasarının oluşmamasının nedeni ise bu katmanın sünek karakter sergilemesidir. Burada sandviç yapıyı oluşturan en alt saf metal katmanının, seramik yoğun katmandaki çatlak ağzının açılarak ilerlemesini engelleyici bir etkisinin olduğu ve dolayısıyla yapının bütünlüğünün korunmasında önemli bir rol oynadığı sonucuna varılabilir.

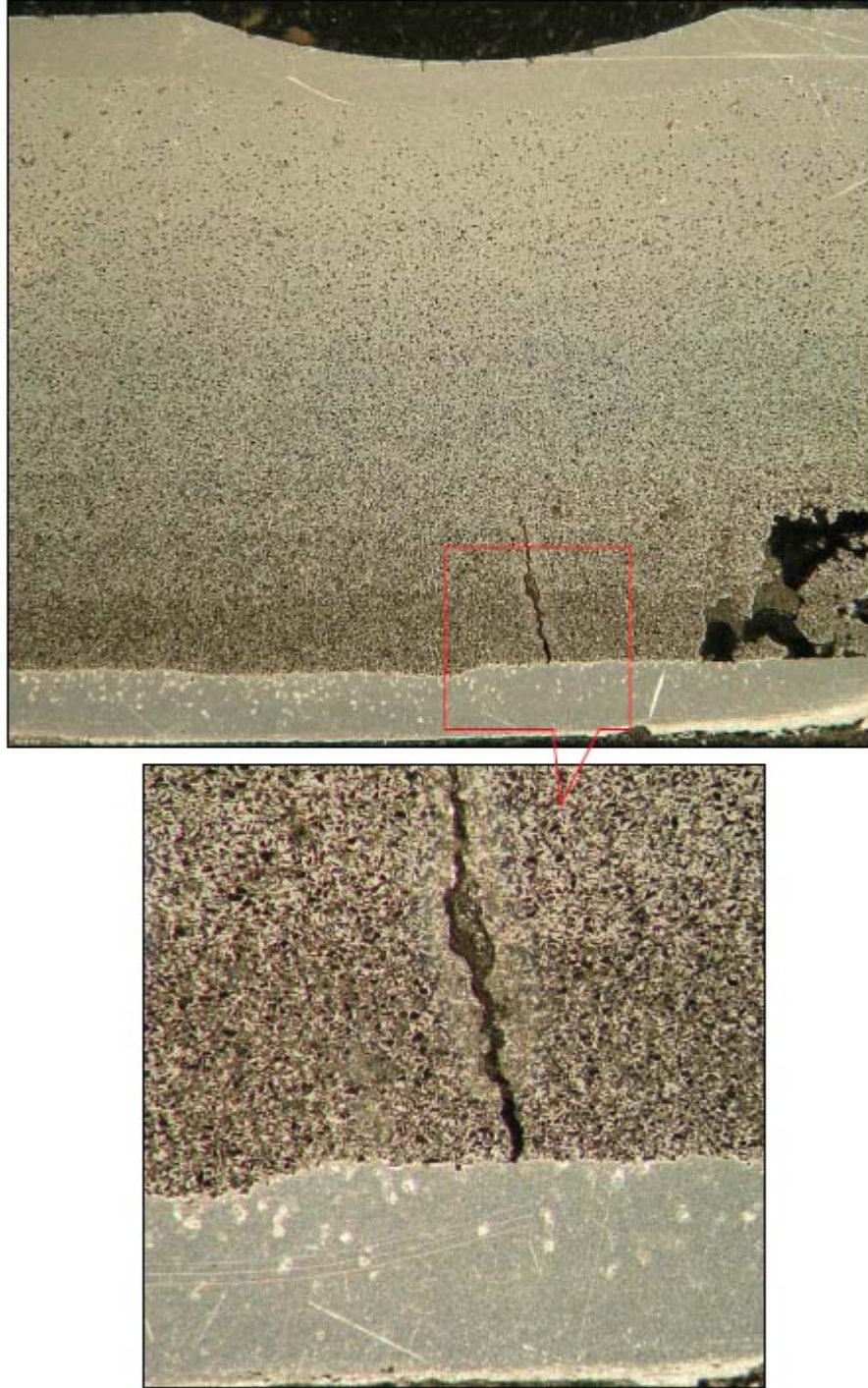
Şekil 3.29 lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunede 22.7 Joule vurucu enerjisi ile alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası numune kesitinde oluşan hasarı göstermektedir. Metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip sandviç

plakada olduğu gibi burada da darbe sonrası çatlak hasarı en alt saf metal katman üzerindeki %70 seramik yoğun katmanda başlamış ve üst katmanlara ilerlemiştir.



Şekil 3.28. Metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip numuneye alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası oluşan hasarlar (vurucu enerjisi= 22.7 Joule).

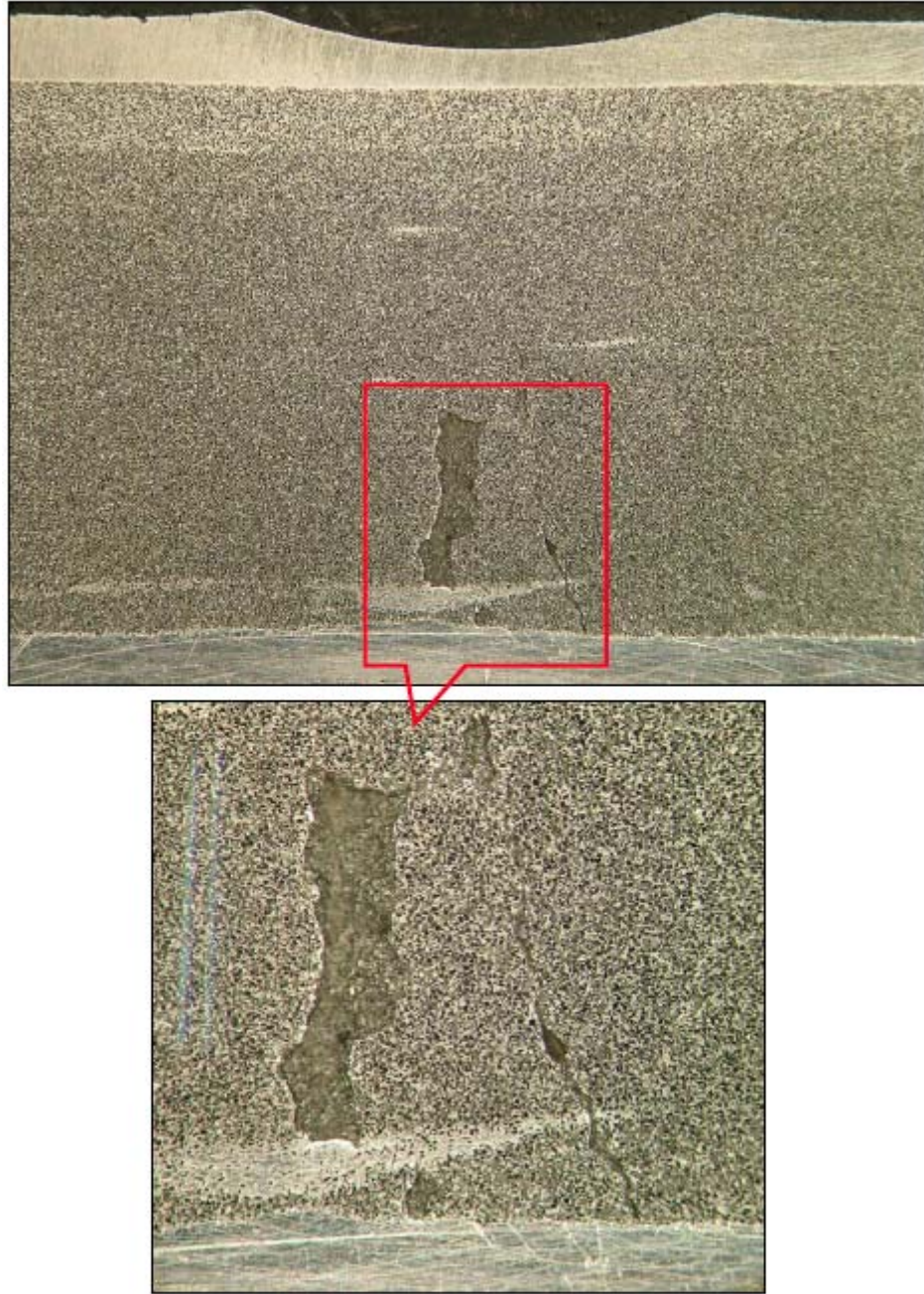
Metal-zengin ($n = 0.1$) kompozisyona sahip yapıyla karşılaştırıldığında, burada yapının kalınlık boyunca daha gevrek olması nedeniyle çatlak ucu üst katmanlara kadar ilerleyebilmiştir (Şekil 3.29).



Şekil 3.29. Lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunede alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası oluşan hasar (vurucu enerjisi = 22.7 Joule).

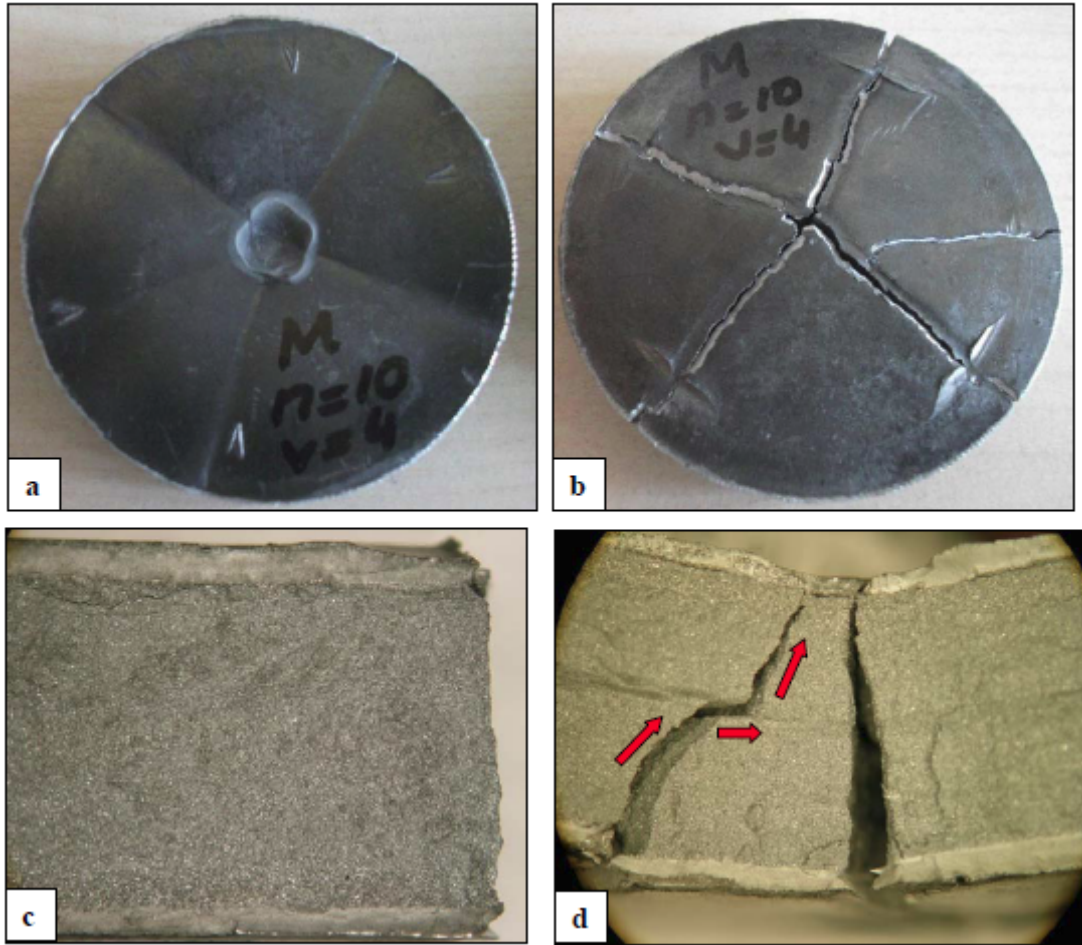
Şekil 3.30'da seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunede 22.7 Joule vurucu enerjisi ile alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası numune kesitinde oluşan hasarlar görülmektedir. Malzeme kompozisyonu gereği kalınlık

boyunca daha da gevrekleşen yapıda çatlak yine en alt saf metal katman üzerindeki %70 seramik yoğun katmanda başlamış ve yukarı doğru daha fazla katman boyunca ilerlemiştir. Yine en alt saf metal katman yapının bütünlüğünün korunmasında etkili olmuştur (Şekil 3.30). Seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numuneye 40.36 Joule vurucu enerjisiyle yapılan çarpma testi sonucunda çatlağın tüm



Şekil 3.30. Seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunede alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası oluşan hasar (vurucu enerjisi = 22.7 Joule).

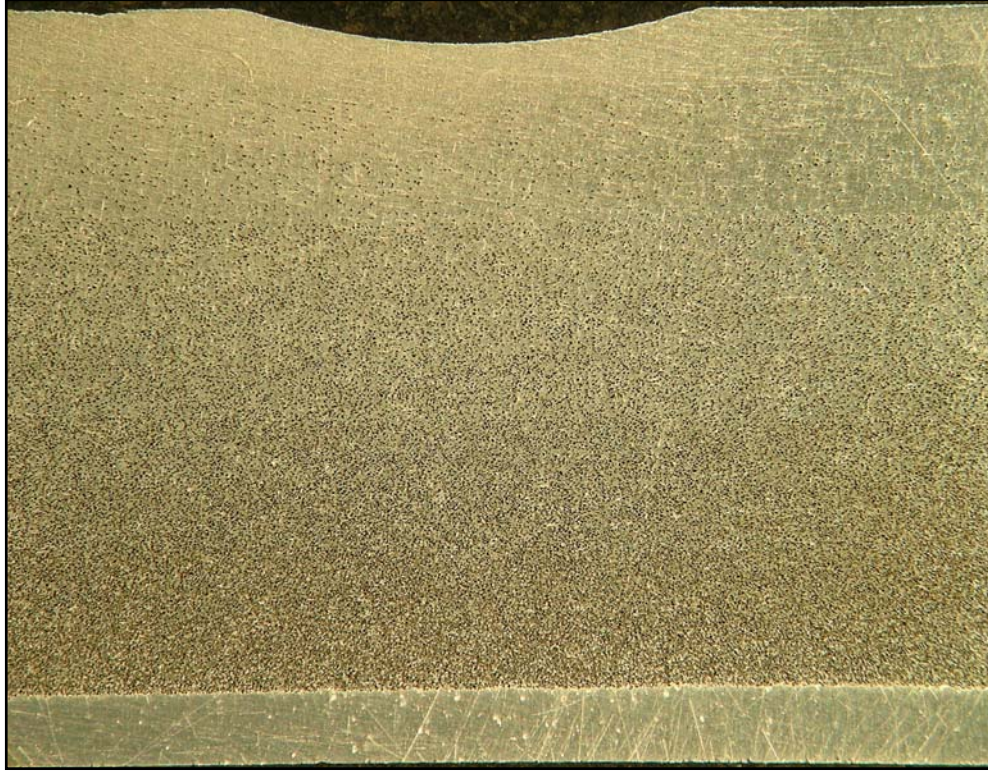
kesit boyunca ilerlediği ve yapının fonksiyonel bütünlüğünün kaybettiği görülmüştür (Şekil 3.31). Kırık yüzeyler yakından incelendiğinde malzemenin kompozisyonu gereği kırılmanın gevrek kırılma tarzında olduğu (Şekil 3.31c) ve tabandan yüzeye doğru ilerleyen çatlağın bazı bölgelerde ilerleme yönüne dik olarak yön değiştirdiği göze çarpmaktadır (Şekil 3.31d). Çatlağın yön değiştirdiği bu bölgelerin tabakalar arasında bağın zayıf olduğu delaminasyon bölgeleri olduğu düşünülebilir.



Şekil 3.31. Seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunede alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası kırılma hasarları (vurucu enerjisi = 40.36 Joule).

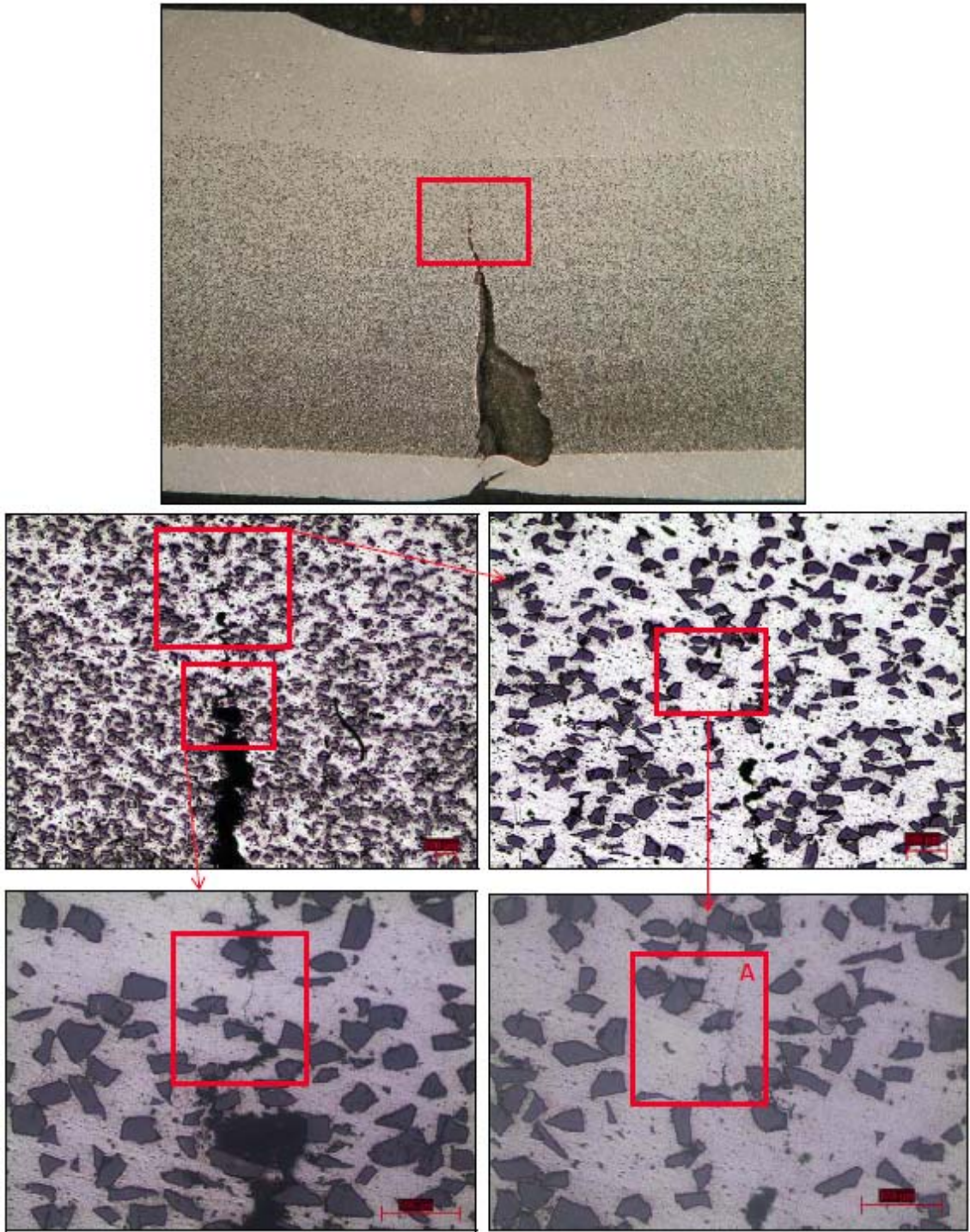
Şekil 3.32 lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numuneye 10.09 Joule vurucu enerjisiyle alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç numunenin kesitini göstermektedir. 22.7 Joule vurucu enerjisiyle çarpmaya maruz lineer malzeme kompozisyonuna sahip numune (Şekil 3.29)

ile karşılaştırıldığında, vurucu hızının azalmasıyla plaka kesitinde herhangi bir çatlak veya hasarın oluşmadığı, yapının bütünlüğünü koruduğu görülmektedir.

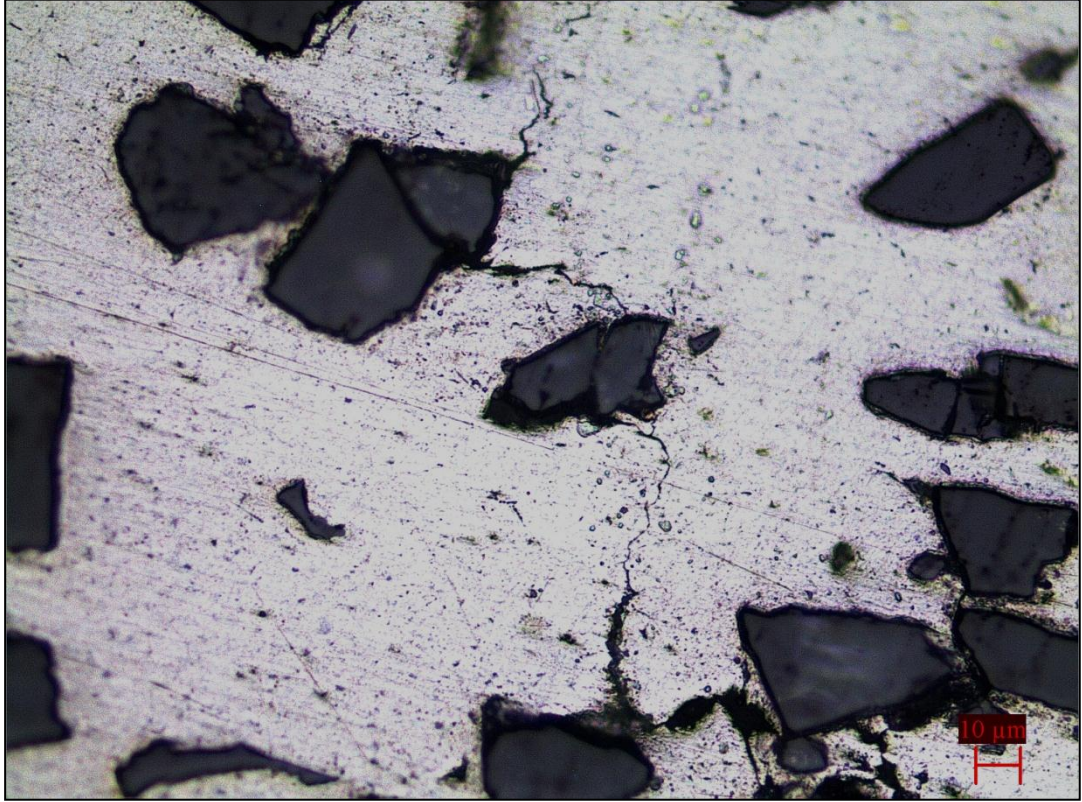


Şekil 3.32. Lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numuneye alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası kesit görüntüsü (vurucu enerjisi = 10.09 Joule).

Şekil 3.33 lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numuneye 40.36 Joule vurucu enerjisi ile alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası numune kesitinde oluşan hasarları göstermektedir. Artan vurucu enerjisi ile plaka kesitinde oluşan çatlak ağzı genişli ve çatlak boyunun arttığı görülmüştür. Ayrıca vurucu enerjisine bağlı olarak plakanın altında artan çekme gerilmelerinin etkisiyle en alt tabakadaki saf metal katmanında çatladığı görülmektedir. Fonksiyonel kademelendirilmiş yapı içerisindeki çatlak ucu yakından incelendiğinde, çatlağın Al matris yapı içerisinde mikro boyutta kılcal çatlaklar olarak ilerlediği görülebilir. Makro çatlaklar seramik-metal arayüzeyini takip ederek ilerlerken, mikro çatlaklar toz tane sınırlarında ilerlemektedir (Şekil 3.34).



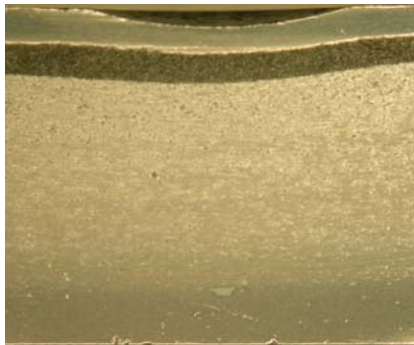
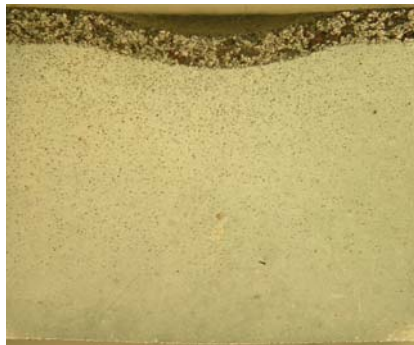
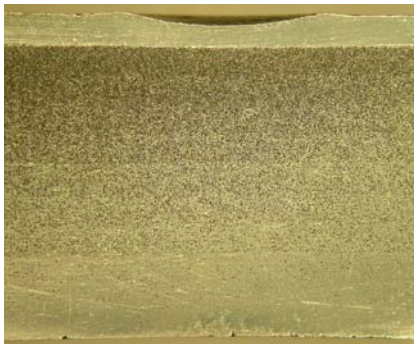
Şekil 3.33. Lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numuneye alt yüzeyden yapılan çarpma testi sonrası numune kesitinde oluşan hasar (vurucu enerjisi = 40.36 Joule).



Şekil 3.34. Matriks yapı içerisindeki kılcal çatlaklar (Şekil 3.33-A bölgesinin ayrıntısı).

Aynı şartlarda ve geometrilerde metal-zengin ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonlarıyla üretilen çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar ile fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar üst ve alt yüzeylerinden 22.7 Joule vurucu enerjisiyle darbeye maruz bırakılarak çarpma sonrası kesit görüntüleri mukayese edildi. Şekil 3.35'te üst yüzeylerinden 22.7 Joule vurucu enerjisi ile darbeye maruz bırakılmış fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların darbe sonrası kesitleri görülmektedir. Üst yüzeylerinden darbeye maruz FGM ve sandviç FGM plakalarda bu enerji seviyesinde hasarların oluşmadığı görülmektedir. Her üç malzeme kompozisyonunda da temas kuvvetleri FGM plakalarda sandviç FGM plakalara nispeten daha yüksek iken (Şekil 3.14a, 3.16a ve 3.18a) darbe enerjisinin absorbe edilmesi bakımından sandviç FGM plakaların daha avantajlı olduğu söylenmelidir (Şekil 3.14b, 3.16b ve 3.18b).

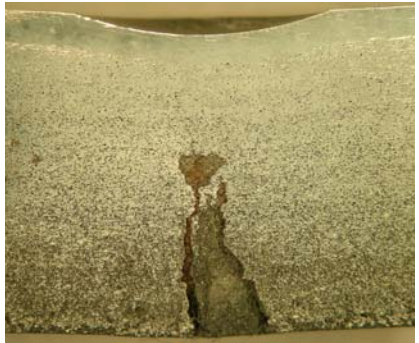
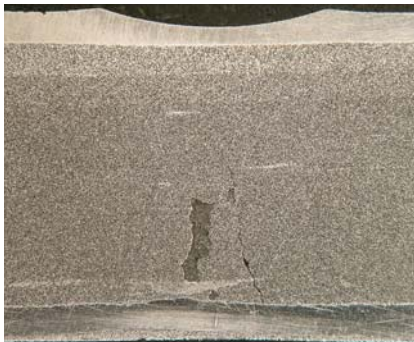
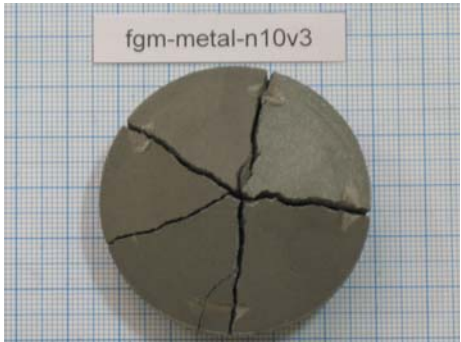
Alt yüzeylerinden 22.7 Joule vurucu enerjisi ile darbeye maruz fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların darbe sonrası kesitleri Şekil 3.36'da görülmektedir. Darbe yükü alt yüzeyden tesir

	<i>Sandviç FGM</i>	<i>FGM</i>
<i>n=0.1</i>		
<i>n=1.0</i>		
<i>n=10.0</i>		

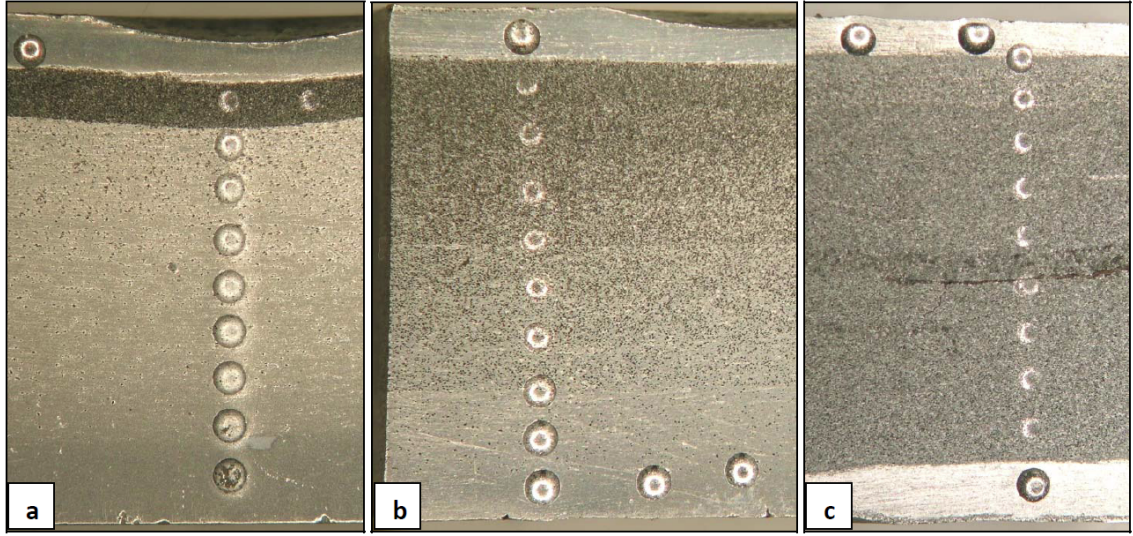
Şekil 3.35. Üst yüzeylerinden çarpmaya maruz fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların çarpma testi sonrası kesit görüntüleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).

ettirildiğinde seramik-zengin katmanlar diğer yüzeyde bulunduklarından back-effect nedeniyle bu katmanlarda çatlak hasarlarının oluştuğu görülmektedir. FGM ve sandviç FGM plakalarda oluşan çatlak hasarları mukayese edildiğinde, sandviç FGM plakalarda çatlak hasarı oluşumunun en alttaki saf metal katman sayesinde azaltıldığı ve yapının fonksiyonel bütünlüğünün korunduğu görülmektedir. Buna karşın FGM plakalarda artan

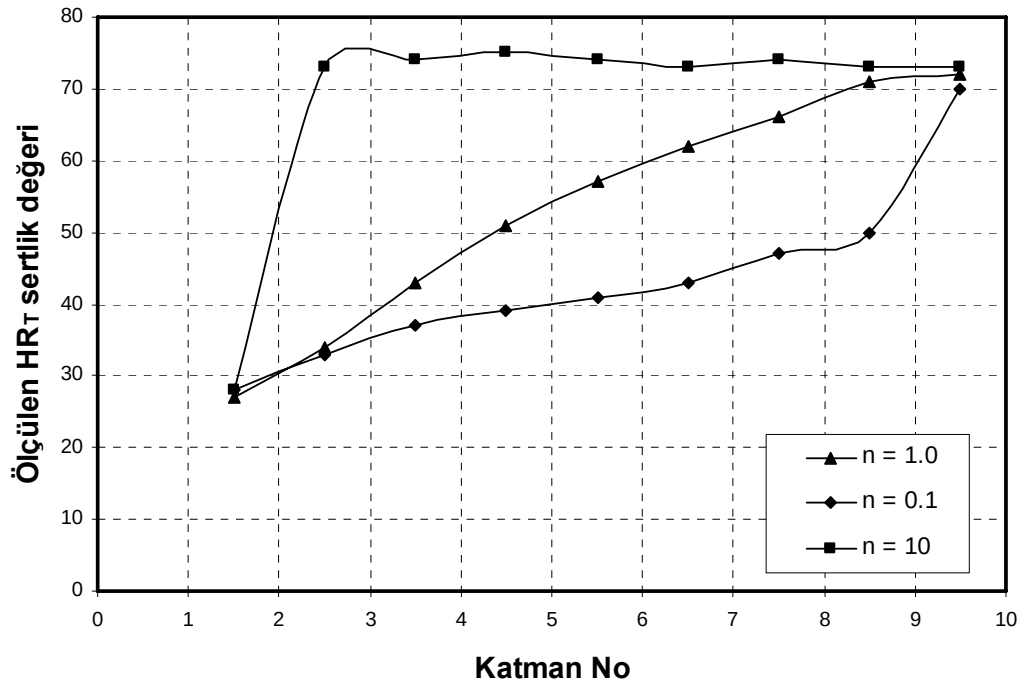
malzeme kompozisyonu ile daha da gevrekleşen yapı nedeniyle en alt %70 seramik içeren katmandan başlayan çatlak hasarlarının artarak üst katmanlara doğru ilerlediği ve özellikle seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip plakada yapısal bütünlüğün tamamen bozulduğu görülmektedir.

	<i>Sandviç FGM</i>	<i>FGM</i>
$n=0.1$		
$n=1.0$		
$n=10.0$		

Şekil 3.36. Alt yüzeylerinden çarpmaya maruz fonksiyonel kademelendirilmiş ve çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların çarpma testi sonrası kesit görüntüleri (vurucu enerjisi = 22.7 Joule, vurucu kütlesi = 5.045 kg).



Şekil 3.37. a) metal-zengin ($n = 0.1$), b) lineer ($n = 1.0$) ve c) seramik-zengin ($n = 10.0$) numunelere kalınlık boyunca yapılan HR_T sertlik ölçüm izleri.



Şekil 3.38. a) metal-zengin ($n = 0.1$), b) lineer ($n = 1.0$) ve c) seramik-zengin ($n = 10.0$) numunelere kalınlık boyunca yapılan HR_T sertlik ölçüm değerleri.

Metal-zengin ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonlarına sahip çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların kesiti boyunca her bir katmandan yapılan HR_T sertlik ölçümleri Şekil 3.37’ de görülmektedir. Ölçülen sertlik değerleri Şekil 3.38’da grafik olarak verilmiştir. Elde

edilen sertlik değerleri incelendiğinde plaka kalınlıkları boyunca sertliklerdeki değişimlerin kompozisyonel gradyant değişimi (Şekil 2.2) ile aynı karakteristiğe sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu ise üretimi yapılan numunelerin istenilen fonksiyonel değişime sahip olduğunu göstermektedir.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1 Tartışma

Bu tez çalışmasında çekirdeği Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç dairesel plakalara üst ve alt yüzeylerinden yapılan düşük hızlı darbe testleri sonucunda plakalarda oluşan plastik deformasyonlar ve hasarlar deneysel olarak araştırıldı. Deneyler için numuneler metal (Al) ve seramik (SiC) tozlarının önceden belirlenen oranlarda karıştırılması suretiyle sıcak iş çeliğinden üretilen kalıp içerisine alınarak toz istifleme-sıcak presleme yöntemiyle üretildiler. Saf metal ve üç farklı malzeme kompozisyonunda ($n = 0.1, 1.0$ ve 10.0) üretilen numunelere sırasıyla üç farklı vurucu hızı $v = 2, 3$ ve 4 m/s'ye karşılık gelen 10.09, 22.7 ve 40.36 Joule vurucu enerjilerinde darbe testleri yapılarak, numunelerin darbeye karşı mekanik cevapları incelendi. Ayrıca çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların düşük hızlı darbe performanslarını fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarındaki ile mukayese edebilmek için farklı malzeme kompozisyonlarında bu iki yapının 22.7 Joule vurucu enerjisiyle her iki yüzeyinden yapılan düşük hızlı darbe test sonuçları da mukayese edildi. Son olarak, darbe sonrası numunelerde oluşan plastik deformasyonlar ve hasarlar detaylı bir metalografik ve mikromekanik incelemeden geçirilerek sonuçları tartışıldı.

4.2 Sonuçlar ve Öneriler

Saf metal (Al) ile metal-zengin ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonlarında üretimi yapılan çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç numunelere üst ve alt yüzeylerinden 10.09, 22.7 ve 40.36 Joule vurucu enerjilerinde darbe testleri yapıldı. Hem üst hem de alt yüzeylerinden yapılan çarpma testleri sonucunda, artan malzeme kompozisyonu ile temas kuvvetlerinin arttığı, temas sürelerinin ise azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum artan malzeme kompozisyonu ile plaka kesiti boyunca seramik oranının artması ve dolayısıyla daha sert bir yapıya

kavuşan plakaların darbeye karşı cevaplarının doğal bir sonucudur. Ayrıca plakalarda hasar oluşmadığı sürece, vurucu enerjisindeki artış ise temas kuvvetlerinde artışa sebep olurken, temas sürelerinde de azalmaya neden olmaktadır. Saf metal plaka ile mukayese edildiğinde, sandviç FGM plakaların darbe enerjisini absorbe etme bakımından avantajlı oldukları görülmüştür. Çarpma testleri sonucu elde edilen temas kuvveti-zaman ve kinetik enerji-zaman grafikleri ile plaka yüzeylerinde oluşan kalıcı iz fotoğrafları incelendiğinde, üst yüzeylerden yapılan çarpma testleri sonucunda $n = 10.0$ malzeme kompozisyonuna sahip plakanın hasara uğradığı görüldü. Buna karşın, alt yüzeylerden yapılan testler sonucunda ise $n = 1.0$ ve $n = 10.0$ malzeme kompozisyonlarına sahip sandviç plakalarda hasarlar oluştu. Aynı şartlarda üretilip, aynı deney şartlarında farklı yüzeylerinden çarpma testlerine tabi tutulan plakaların darbe etkisini üst yüzeyleri (seramik-zengin yüzey) ile karşılaşmalarının plaka kalınlığı boyunca iletilen yük dalgasının plakanın arka tarafında oluşturacağı etkinin (back-effect) burada daha tok yapıda olan metal-zengin yüzeyce karşılanmasının, plakada oluşacak hasarın engellenmesinde ve yapısal bütünlüğün korunmasında önemli bir avantaj sağladığı aşıkardır.

Aynı üretim şartlarında ve aynı geometrilerde üretilen FGM, sandviç FGM ve saf metal plakaların darbeye karşı olan cevaplarının mukayese edilebilmesi için aynı enerji seviyesinde üst ve alt yüzeylerinden darbeye maruz bırakıldılar. Darbe yükü plakalara üst yüzeyden geldiğinde, temas kuvveti FGM plakalarda en yüksek iken absorbe edilen darbe enerjisi sandviç FGM plakalarda en yüksektir. Darbe alt yüzeyden uygulandığında ise hem temas kuvveti hemde enerji absorbsiyonu sandviç FGM plakalarda yüksektir. Buna göre, gerek hasar oluşumuna karşı yapının bütünlüğünün korunması, gerek temas kuvveti ve gerekse enerji absorbe etme bakımından en avantajlı yapının sandviç FGM yapı olduğu aşıkardır.

Darbe deneyleriyle yukarıda elde edilen sonuçların desteklenmesi amacıyla, darbelenmiş numuneler üzerinde detaylı mikromekanik ve metalografik incelemeler yapıldı. İncelenen tüm numunelerde teorik karışım kuralına uygun olarak numune kesitleri boyunca malzeme kompozisyonu dağılımlarının deneysel olarakta sağlandığı görüldü.

İlk olarak malzeme kompozisyonunun etkisini araştırmak için vurucu enerjisi sabit tutularak (22.7 Joule) üst yüzeyden çarpmaya maruz bırakılan metal-zengin ($n = 0.1$),

lineer ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 10.0$) numuneler metalografik incelemeye tabi tutuldular. Metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyona sahip numunenin çarpma sonrası kesiti yakından incelendiğinde saf metal katman altında kalan %70 seramik-zengin katmanda iz kenarlarına rastlayan bölgelerin hizasında çatlakların oluştuğu ve bunun nedeni olarak ise; şekil değiştiren tabakada ankastre mesnet gibi davranan iz kenarlarında ortaya çıkan yüksek kesme gerilmeleri ile metal-zengin malzeme kompozisyonu nedeniyle %70 seramik içeren gevrek katmandan hemen altındaki %13.80 seramik içeren sünek katmana ani geçişten dolayı katmanlar arasında ortaya çıkan mekanik uyumsuzluklar söylenebilir. Oluşan çatlaklar yakından incelendiğinde, çatlakların sadece %70 seramik içeren katman içerisinde kaldığı, sünek olan alt ve üst katmanlara geçmediği görülmüştür. Buradan, metal-zengin ($n = 0.1$) kompozisyona sahip çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların darbe yükü altında özellikle saf metal katman altındaki seramik-zengin katmanın hasar oluşumu açısından kritik bölge olduğu sonucuna varılmıştır. Lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunenin çarpma sonrası kesiti incelendiğinde, plastik deformasyonun tamamen en üst saf metal katmanda oluştuğu, alt katmanlarda herhangi bir plastik deformasyonun oluşmadığı katmanlararası sınırın doğrusallığından anlaşılmaktadır. Üst saf metal katman ile hemen altındaki %70 seramik içeren katman arasında herhangi bir hasarın oluşmadığı da anlaşılmaktadır. Seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunenin çarpma sonrası kesiti incelendiğinde ise, plastik deformasyonun tamamen en üst saf metal katmanda oluştuğu, alt katmanlarda herhangi bir plastik deformasyonun ve katmanlararası herhangi bir hasarın oluşmadığı anlaşılmaktadır.

Vurucu enerjisinin etkisini araştırmak için, lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonunda sırasıyla $v = 2, 3$ ve 4 m/s çarpma hızlarına karşılık gelen 10.09, 22.7 ve 40.36 Joule vurucu enerjileri ile üst taraftan darbeye maruz bırakılan çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç numunelerin metalografik incelemeleri sonucunda, artan vurucu hızıyla numune yüzeyinde oluşan iz çapı ve derinliğinin arttığı görülmüştür.

Çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç numunelerin 22.7 Joule vurucu enerjisi ile alt yüzeyinden yapılan çarpma testleri sonrasında metal-zengin ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 10.0$) numunelerin metalografik incelemeleri sonucunda; metal-zengin ($n = 0.1$) malzeme kompozisyonuna sahip numunenin kesiti incelendiğinde darbe sonrasında %70 seramik içeren katmanda darbe izi hizasında,

çatlak ağzı katmanın alt kısmında başlayıp üstteki tabakaya doğru ilerler tarzda çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların %13.80 seramik içeren daha sünek üst katman sınırında durduğu görülmüştür. Çatlak karakteristiği dikkate alındığında, seramik yoğun katmanın alt kısmında darbe etkisi sebebiyle oluşan eğilmeden kaynaklanan çekme gerilmesinin etkin olduğunu ve bununla birlikte gevrek olan bu tabakada çatlak başlangıcına sebep olduğu söylenebilir. Aslında darbe esnasında maksimum çekme girilmesine maruz olan saf metal en alt katmanda çatlak hasarının oluşmamasının nedeni ise bu katmanın sünek olmasıdır. Burada sandviç yapıyı oluşturan en alt saf metal katmanın, seramik yoğun katmandaki çatlak ağzının açılarak ilerlemesini engelleyici bir etkisinin olduğu ve dolayısıyla yapının bütünlüğünün korunmasında önemli bir rol oynadığı sonucuna da varılabilir. Lineer ($n = 1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunenin çarpma testi sonrası kesiti incelendiğinde, burada da darbe sonrası çatlak hasarı en alt saf metal katman üzerindeki %70 seramik yoğun katmanda başlamış ve burada yapının kalınlık boyunca daha gevrek olması nedeniyle çatlak ucu üst katmalara kadar ilerleyebilmiştir. Seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonuna sahip numunenin kesiti incelendiğinde, malzeme kompozisyonu gereği kalınlık boyunca daha da gevrekleşen yapıda çatlak yine en alt saf metal katman üzerindeki %70 seramik yoğun katmanda başlamış ve yukarı doğru daha fazla katman boyunca ilerlemiştir. Burada da en alt saf metal katman yapının bütünlüğünün korunmasında etkili olmuştur.

Seramik-zengin ($n = 10.0$) malzeme kompozisyonunda artan vurucu enerjisi (40.36 Joule) ile yapılan çarpma testi sonucunda çatlak tüm kesit boyunca ilerlemiş ve yapı fonksiyonel bütünlüğünü kaybetmiştir. Kırık yüzeyler yakından incelendiğinde malzemenin kompozisyonu gereği kırılmanın gevrek tarzda oluştuğu ve tabandan yüzeye doğru ilerleyen çatlağın bazı bölgelerde ilerleme yönüne dik olarak yön değiştirerek katmanlar arası bağın zayıf olduğu bu bölgelerde tabakalar arasına girerek buralarda delaminasyonlara sebep olduğu düşünülebilir.

Sonuç olarak, teorik karışım kuralına uygun olarak üretimi yapılan numunelerde çarpma testleriyle elde edilen sonuçların mikromekanik ve metalografik incelemeler sonucu elde edilen veriler ile uyumlu olduğu görülmüştür. Çarpma yükünün seramik-zengin yüzey tarafından karşılanması yapıyı hasara karşı daha dirençli kılmaktadır. Bununla birlikte özellikle fonksiyonel kademelendirilmiş yapının alt ve üst yüzeylerden sünek

saf metal katmanlar ile desteklenmesi çarpma hasarına karşı yapının fonksiyonel bütünlüğünün korunmasında önemli bir katkı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

1. <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1592>
2. Chavara,D.T., Wang, C.X., Ruys, A.J., 2009. Biomimetic Functionally Graded Materials: Synthesis by Impeller-Dry-Blending, **Journal of Biomimetics, Biomaterials and Tissue Engineering**, **13**: 37-49.
3. http://en.wikipedia.org/wiki/Sandwich_theoryiliniilmektedir
4. Karlsson, K.F., Aström, B.T., 1997. Manufacturing and applications of structural sandwich components **Composites: Part A**, **28**: 97-111.
5. Belingardi, G., Vadori, R., 2002. Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates, **International Journal of Impact Engineering**, **27**: 213–229.
6. Belingardi, G., Vadori, R., 2003. Influence of the laminate thickness in low velocity impact behavior of composite material plate, **Composite Structures**, **61**: 27–38
7. Kim, J.S., Chung, S.K., 2007. A study on the low-velocity impact response of laminates for composite railway bodyshells, **Composite Structures**, **77**: 484-492.
8. Buena, S., Micele, L., Baudin, C., Portu, G., 2008. Reduced strength degradation of alumina–aluminium titanate composite subjected to low-velocity impact loading, **Journal of the European Ceramic Society**, **28**: 2923-2931.
9. Tita, V., Carvalho, J., Vandepitte, D., 2008. Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: Experimental and numerical approaches, **Composite Structures**, **83**: 413-428.
10. Aryaei, A., Hashemnia, K., Jafarpur, K., 2010. Experimental and numerical study of ball size effect on restitution coefficient in low velocity impacts, **International Journal of Impact Engineering**, **37**: 1037-1044.
11. Wang, S.X., Wu, L.Z., Ma, L., 2010. Low-velocity impact and residual tensile strength analysis to carbon fiber composite laminates, **Materials and Design**, **31**: 118-125.

12. Lin, J.C., Chang, L.C., Nien, M.H., Ho, H.L., 2006. Mechanical behavior of various nanoparticle filled composites at low-velocity impact, **Composite Structures**, **74**: 30-36.
13. Vaidya, U.K., Nelson, S., Sinn, B., Mahew, B., 2001. Processing and high strain rate impact response of multi-functional sandwich composites, **Composite Structures**, **52**: 429-440.
14. Gustin, J., Joneson, A., Mahinfalah, M., Stone, J., 2005. Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites, **Composite Structures**, **69**: 396-406.
15. Palazotto, A.N., Gummadi, L.N.B., Vaidya, U.K., Herup, E.J., 1999. Low velocity impact damage characteristics of Z-fiber reinforced sandwich panels - an experimental study, **Composite Structures**, **43**: 275-288.
16. Mahmoudabadi, M.Z., Sadighi, M., 2011. A theoretical and experimental study on metal hexagonal honeycomb crushing under quasi-static and low velocity impact loading, **Materials Science and Engineering A**, **528**: 4958-4966.
17. Herup, E.J., Palazotto, A.N., 1997. Low-velocity impact damage initiation in graphite/epoxy/nomex honeycomb-sandwich plates, **Composites Science and Technology**, **57**: 1581-1598.
18. Dear, J.P., Lee, H., Brown, S.A., 2005. Impact damage processes in composite sheet and sandwich honeycomb materials, **International Journal of Impact Engineering**, **32**: 130-154.
19. Park, J.H., Ha, S.K., Kang, K.W., Kim, C.W., Kim, H.S., 2008. Impact damage resistance of sandwich structure subjected to low velocity impact, **Journal of Materials Processing Technology**, **201**: 425-430.
20. Castanie, B., Bouvet, C., Aminanda, Y., Barrau, J.J., Thevenet, P., 2008. Modelling of low-energy/low-velocity impact on Nomex honeycomb sandwich structures with metallic skins, **International Journal of Impact Engineering**, **35**: 620-634.
21. Aminanda, Y., Castanie, B., C., Barrau, J.J., Thevenet, P., 2005. Experimental and numerical study of compression after impact of sandwich structure with metallic skins, Proceedings of JNC 14, Compiègne, 22-24 March 2005.

22. Schubel, P.M., Luo, J.J., Daniel, I.M., 2005. Low velocity impact behavior of composite sandwich panels, **Composites: Part A**, **36**: 1389–1396.
23. Schubel, P.M., Luo, J.J., Daniel, I.M., 2007. Impact and post impact behavior of composite sandwich panels, **Composites: Part A**, **38**: 1051–1057.
24. Yu, J., Wang, E., Li, J., Zheng, Z., 2008. Static and low-velocity impact behavior of sandwich beams with closed-cell aluminum-foam core in three-point bending, *International Journal of Impact Engineering*, **35**: 885-894.
25. Gong, S.W., Lam, K.Y., Reddy, J.N., 1999. The Elastic Response of Functionally Graded Cylindrical Shells to Low-Velocity Impact, **International Journal of Impact Engineering**, **22**: 397-417.
26. Apetre, N.A., Sankar, B.V., Ambur, D.R., 2006. Low-Velocity Impact Response of Sandwich Beams With Functionally Graded Core, **International Journal of Solids and Structures**, **43**: 2479-2496.
27. Kubair, D.V., Lakshmana, B.K., 2008. Cohesive Modeling of Low-Velocity Impact Damage in Layered Functionally Graded Beams, **Mechanics Research Communications**, **35**: 104-114.
28. Etemadi, E., Afaghi Khatibi, A., Takaffoli, M., 2009. 3D finite element simulation of sandwich panels with a functionally graded core subjected to low velocity impact, **Composite Structures**, **89**: 28–34.
29. Larson, R.A., Palazotto, A.N., Gardenier, H.E., 2009. Impact response of titanium and titanium boride monolithic and functionally graded composite plates, **AIAA Journal**, **47**: 676-691.
30. Gunes, R., Aydin, M., 2010. Elastic response of functionally graded circular plates under a drop-weight, **Composite Structures**, **92**: 2445-2456.
31. Gunes, R., Aydin, M., Apalak, M.K., Reddy, J.N., 2011. The elasto-plastic impact analysis of functionally graded circular plates under low velocities, **Composite Structures**, **93**: 860-869.
32. Kieback, B., Neubrand, A., Riedel, H., 2003. Processing techniques for functionally graded materials, **Materials Science and Engineering A**, **362**: 81-105.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: İsmail ÖZKEŞ
 Uyuğu: Türkiye (TC)
 Doğum Tarihi ve Yeri: 8 Şubat 1983, Kayseri
 Medeni Durumu: Bekâr
 Tel: +90 352 236 12 23
 email: ismailozkes@hotmail.com
 Yazışma Adresi: Mevlana Mah. Tamer Cad. Yiğitler Konağı Kat:13 No: 49
 Anayurt/Talas/Kayseri

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	EÜ Müh. Fak. Makine	2006
Lise	Melikgazi Lisesi	2000

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2012- Halen	Yataş Yatak Yorgan A.Ş	Proje Ve Yatırım Şefi
2008–2012	Isısan Isı A.Ş	Bakım Onarım Şefi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Gunes R., Apalak M.K ,Yildirim M, Ozkes I. ,(2010) "Free vibration analysis of adhesively bonded single lap joints with wide and narrow functionally graded plates", **Composite Structures**, 92 : 1–17