

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

**FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ SANDVIÇ
PLAKALARIN BALİSTİK DAVRANIŞI**

**Hazırlayan
Murat AYDIN**

**Danışman
Prof.Dr. M.Kemal APALAK**

Doktora Tezi

**Şubat 2014
KAYSERİ**

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

**FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ SANDVIÇ
PLAKALARIN BALİSTİK DAVRANIŞI**

**Hazırlayan
Murat AYDIN**

**Danışman
Prof.Dr. M.Kemal APALAK**

Doktora Tezi

**Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 112M917 numaralı araştırma projesi
ve Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından
FBD-12-3832 kodlu proje ile desteklenmiştir**

**Şubat 2014
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI

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.

Murat AYDIN

YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI

“Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Balistik Davranışı”
adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan
Murat AYDIN

Danışman
Prof.Dr. M.Kemal APALAK

Makina Mühendisliği ABD Başkanı
İbrahim UZMAY

Prof.Dr. M.Kemal APALAK danışmanlığında **Murat AYDIN** tarafından hazırlanan “**Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Balistik Davranışı**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

.... / /

JÜRİ :

Başkan : Prof. Dr. Ömer EYERCİOĞLU

Üye : Prof. Dr. M. Kemal APALAK

Üye : Prof. Dr. Sedat ÖZDEN

Üye : Doç. Dr. Fehmi NAİR

Üye : Doç. Dr. Recep GÜNEŞ

ONAY :

Bu tezin kabülü Enstitü Yönetim Kurulunun tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.... / /

Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Kâzım KEŞLİOĞLU

TEŞEKKÜR

Akademik kariyerimin en önemli dönemlerinden biri olan doktora eğitimimin her aşamasında akademik bilgi ve deneyimleriyle destek ve rehberliğini esirgemeyen, ilminden ve ahlaki değerlerinden elimden geldiğince istifade etmeye çalıştığım saygıdeğer danışmanım **Prof. Dr. M. Kemal APALAK**'a

Her zaman yakın ilgi ve yardımlarını gördüğüm, hiç şüphesiz ki akademik hayatımda önemli bir yeri olan değerli hocam **Doç. Dr. Recep GÜNEŞ**'e, yardıma ihtiyacım olduğu her durumda emeğini hiçbir zaman esirgemeyen **Doç. Dr. Fehmi NAİR**'e, tezimi derlememdeki yardımlarından dolayı **Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILDIRIM**'a,

Bu çalışmada bana laboratuvar olanağı sağlayan **II. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı**'na, FBD-12-3832 numaralı araştırma projesi ile tezimi destekleyen **Erciyes Üniversitesi**'ne, 112M917 numaralı araştırma projesi ile desteklerinden dolayı **TÜBİTAK**'a

Tez çalışmam boyunca maddi ve manevi desteklerini hep arkamda hissettiğim değerli aileme, özellikle göstermiş olduğu hoşgörü ve sabrından dolayı eşime ayrıca benim ben oluşumda pay sahibi olan herkese teşekkürü bir borç bilirim.

FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ SANDVIÇ PLAKALARIN BALİSTİK DAVRANIŞI

Murat AYDIN
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Şubat 2014
Tez Danışman : Prof.Dr. M.Kemal APALAK

ÖZET

Bir insanı ya da bir aracı korumak için kullanılan koruyucu giysi, levha ya da kaplamaya zırh denir. Bilinen en eski zırh hayvan postları ve derilerinden yapılmıştır. Metal teknolojisinin gelişmesiyle zırh yapımında kullanılan malzemeleri bronz ve demir takip etmiştir. 15. yüzyılda geliştirilen yay, yaylı tüfek ve ateşli silahlara karşı korunmada mevcut zırhların savunma kabiliyetlerini kaybetmesiyle çelik plaka ve diskler kullanılmıştır. Silah sistemlerinin gelişimine paralel olarak, ağırlığın azaltılarak hareket kabiliyetinin artırılması ihtiyacından dolayı daha sonraki yıllarda bu malzemelerin yerini kompozit zırhlar almıştır.

Günümüzde de gelişen tehditler karşısında daha etkin balistik koruma sağlayacak hafif ve yüksek performanslı zırhların geliştirilmesi kritik bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu sahadaki yeni malzeme arayışları seramik ön yüzlü kompozit zırhları ön plana çıkarmıştır. Her ne kadar balistik sistemlerde kullanılacak bir malzemedan beklenen yüksek sertlik, termal direnç ve basma dayanımına seramik malzemeler sahip olsa dahi kırılgan bir yapıya sahip olmalarından dolayı tek başına bu amaç için kullanılmazlar.

Ön yüz malzemesi olarak kullanılan seramik, merminin delici ucunu deforme ederken arka yüzeyde kullanılan metal ya da fiber takviyeli polimer matrisli kompozit enerjiyi absorbe ederek merminin durdurulmasını sağlamakta, mermi ve parçacıkları tutarak tam nufuziyeti engellemektedir.

Katmanlı yapıya sahip bu plakalar yüksek mukavemetleri ve yüksek rijitlikleri nedeniyle balistik sistemlerde yaygın olarak kullanılırlar. Ancak, katmanlardaki malzeme özelliklerinin ani olarak değişmesi nedeniyle ara yüzeylerde yüksek gerilmeler meydana gelir ve bu gerilmeler de katmanlar arasında ayrılmalara (delaminasyon) neden olur. Bu olumsuz etkiler fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (FGM) kullanılarak azaltılabilir ya da ortadan kaldırılabilir.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (Functionally Graded Materials=FGMs) belirli bir pozisyonda malzeme kompozisyonunun sürekli olarak değiştiği yapılar olarak tanımlanırlar. Genellikle seramik-metal bileşiminden oluşan bu malzemeler kötü çalışma şartlarına sahip uygulamalar için son derece uygundur [1]. Örneğin malzemenin bir tarafı yüksek mekanik dayanıma sahip olabilirken diğer tarafı ise yüksek ısı dayanıma sahip olabilir, bu durum söz konusu malzemenin içerisinde iki ayrı özelliği barındırması demektir. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerde malzeme kompozisyonundaki değişim sürekli ya da kademeli olarak gelişir ismini de bu değişimden ötürü almıştır.

Malzeme özellikleri, seramik yüzeyden metal yüzeye doğru oldukça yumuşak bir geçişe sahip olan fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler ileri malzemeler arasında oldukça ilgi çekicidir. Bu fonksiyonel geçiş sayesinde fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler yüksek sıcaklık gradyantına sahip ortamlara dayanım gösterdikleri gibi malzeme bütünlüğünü de koruyabilmektedirler. Ayrıca fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, seramik-metal bağlantıların ara yüzeylerinde termo-mekanik uyumsuzlukların azaltıldığı ideal yapılardır ve böylece yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan yapılarda oluşan artık gerilmeleri de azaltabilirler.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerdeki ısı gerilmeleri kompozisyonel ve mikro-yapısal dağılımın kontrol edilmesiyle azaltılabilir. Yine de fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin çoğu kompozisyonundaki sürekli makroskobik değişimler nedeniyle artık gerilmelere sahiptirler ve bu artık gerilmeler fonksiyonel kademelendirilmiş malzemenin mekanik özelliklerini de etkiler.

Her ne kadar yeni ve gelişme aşamasında olan bir teknoloji olsa da fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin uygulama alanları uzay, nükleer ve otomobil endüstrileri gibi oldukça özellikli alanlardır. Ayrıca metal-seramik bileşenlere sahip fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin büyük yapısal yüklemelere dayanım göstermesi ve balistik uygulamalarda sağladığı avantajlar nedeniyle savunma sanayinde kullanımı da öne sürülmüştür. Bu nedenle fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin mekanik özelliklerinin ve malzeme karakterizasyonunun belirlenmesi oldukça önem taşımaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalar fonksiyonel

kademelendirilmiş malzemelerin ortaya atılmasından bu güne hızlı bir şekilde ilerlemektedir.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin zor çalışma şartlarına sahip darbeli ortamlarda veya balistik amaçlı olarak da kullanıldıklarından dolayı bu malzemelerin darbe dayanımlarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu tez çalışması ile, son derece kritik uygulamalara sahip olan farklı malzeme kompozisyonundaki fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalarda balistik darbe yükleme şartları altında meydana gelen hasar mekanizmaları ve deformasyonları sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmalarda, fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç malzemelerin mikro yapısı esas alınarak oluşturulan nümerik modelin LS-DYNA yazılımında analizi yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda ise toz istifleme sıcak presleme yöntemi ile üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların balistik testleri yapılarak elde edilen sonuçların sayısal çalışmalarla uyumluluğu incelenmiştir.

Çalışmanın en önemli sonucu; değişen malzeme kompozisyonu ile fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların, balistik dayanımları ve hasar mekanizmalarının değiştiği bu sebeple doğru fonksiyonel yapının tasarlanması ve optimum kalınlık tespitinin sözkonusu plakaların balistik amaçlar için kullanılabilirliği açısından önemli olduğudur.

Anahtar Kelimeler:Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (FGM); Balistik performans; Sandviç plaka; Sonlu elemanlar metodu

BALLISTIC IMPACT BEHAVIORS OF FUNCTIONALLY GRADED SANDWICH PLATES

Murat AYDIN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Ph.D. Thesis, February 2014

Thesis Supervisor: Prof.Dr. M.Kemal APALAK

ABSTRACT

Any protective cover made from clothing, plate or coating in order to protect a person or vehicle against to lethal effects is called armor. The oldest known armor was made of animal skins and leathers. In the development of metal technology, bronze and iron were appeared to be used for armor. For the first time, steel plates and discs began to be used an armor in the fifteenth century because the existing armor equipments lost their defensive abilities against to bow, crossbow and other weapons. In later years, composite armor was used in order to reduce weight and to increase mobility.

Throughout history, the development of armor systems has continued to be parallel to the development of weapon systems. Today, the development of high-performance and light armors has become a critical requirement against emerging threats. The research for new materials in this field has brought ceramic-faced composite armors to the forefront. Eventhough having high hardness, thermal resistance and compressive strength, ceramics are not used as armor alone due to their brittle. In a firearm shot, through ceramic material, while the ceramic front-surface deforms tip of the bullet piercing, back-surface of the metal or fiber-reinforced polymer matrix composite absorbs the energy and prevents the perforation. Layered composite structures are widely used in ballistic systems due to their high strength and high stiffness. An abrupt change in their material properties across an interface between discrete materials introduces large interlaminar stresses that could cause delamination. One way to overcome this adverse effect is to use a functionally graded material (FGM).

The mechanical and physical properties of functionally graded material (FGM) vary continuously along a direction in the macroscopic sense. In general, they are composed of ceramic and metal, and are most suitable structures in order to relieve

thermo-mechanical mismatches along the bi-material interfaces; therefore, thermal residual stresses in such structures become more uniform in high temperature environments. FGMs have found special applications in the fields of economics such as aerospace, nuclear and automotive industries. FGMs can serve for ballistic purposes or percussive applications where the operating conditions are severe. Consequently, the mechanical behavior of FGMs becomes important under impact loadings.

Functionally graded materials have been increasingly used in the design of impact resistant structures as well as in the design of advanced thermal barrier coatings. A functionally graded plate with a tailored ceramic to metal through-thickness gradient combines the superior features of ceramics and metals in the same material system. The ceramic side provides good protection against projectiles, while the metal-rich side offers toughness and strength to maintain the integrity of the structure as long as possible. Thus, the ceramic plates are used for single impact applications, whereas the FGM can be used multiple impact applications with high ballistic performance.

The purpose of this thesis is to determine damage and deformation mechanisms of functionally graded sandwich plates, which have highly critical applications, under ballistic impact loads by means of both theoretical and experimental approaches. In the theoretical studies, the analysis of numerical models that developed on the base of micro structure of functionally graded sandwich materials was conducted using explicit code LS-DYNA software. In the experimental studies, the ballistic tests of functionally graded sandwich materials manufactured with powder stacking-hot pressing method were performed and the results were compared to the theoretical results.

Keywords:Functionally graded materials (FGMs); Ballistic performance; Sandwich plates; Finite element method

İÇİNDEKİLER

FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ SANDVIÇ PLAKALARIN BALİSTİK DAVRANIŞI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI	ii
KABUL VE ONAY	iii
TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	viii
İÇİNDEKİLER	x
TABLolar LİSTESİ	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. Balistik	3
1.1.1. İç Balistik	3
1.1.2. Dış Balistik	3
1.1.2.1. Coriolis Etkisi	4
1.1.2.2. Balistik Katsayı (BC)	5
1.1.3. Terminal Balistik	5
1.2. Balistiğin Fiziksel Temelleri	7
1.3. Kaynak Araştırması	9

2. BÖLÜM

GEREÇ VE YÖNTEM

2.1. Bünye İlişkileri ve Karışım Teorisi	16
2.2. Tamura-Tomota-Ozowa (TTO) Model	18
2.3. Sonlu Elemanlar Formülasyonu	20
2.3.1. Yapısal Denklemler	21
2.3.2. Üç Boyutlu Sekiz Düğüm Noktalı Katı Sonlu Eleman	25
2.3.3. Hacim İntegrasyonu	27
2.3.4. Plastik Kinematik Malzeme Modeli	28
2.3.5. Düzlem Gerilim Plastisitesi	31
2.4. Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakaların Üretimi	32
2.4.1. Plaka Üretiminde Kullanılan Tozlar	33
2.4.1.1. Alüminyum (Al)	36
2.4.1.2. Silisyum Karbür (SiC)	37
2.4.2. Toz Karıştırma Ünitesi	37
2.4.3. Üretim Kalıpları	38
2.4.4. Plaka Sinterleme Ünitesi	38
2.5. Balistik Test Sistemi	39
2.5.1. Lançer	39
2.5.2. Mermi Hızı Ölçüm Cihazı	40
2.5.3. Hedef Plakaları Sabitleme Yöntemi	40
2.5.4. Balistik Testlerde Kullanılan Mermiler	41
2.6. Balistik Testlerde Kullanılan Standartlar	43

3. BÖLÜM

FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ SANDVIÇ PLAKALARIN BALİSTİK DARBE DAVRANIŞLARI

3.1. Giriş	47
----------------------	----

3.2. Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Modellenmesi	47
3.3. Malzeme Modeli	50
3.4. 9 mm x 19 Parabellum Mermi Sayısal Analiz Sonuçları	54
3.5. 7.62 mm x 51 Mermi Sayısal Analiz Sonuçları	64

4. BÖLÜM

FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ SANDVIÇ PLAKALARIN BALİSTİK TEST SONUÇLARI

4.1. Giriş	81
4.2. 9 mm x 19 Parabellum Mermi Balistik Test Sonuçları	82
4.3. 7.62 mm x 51 Mermi Balistik Test Sonuçları	90
4.4. Sayısal ve Deneysel Sonuçların Mukayesesi	96

5. BÖLÜM

TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER

KAYNAKLAR	102
ÖZGEÇMİŞ	108

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin üretim teknikleri [2].	33
Tablo 2.2.	Zırh yapımında kullanılan seramik malzeme özellikleri [3].	36
Tablo 2.3.	Al6061 Kimyasal Bileşimi.	37
Tablo 2.4.	9 mm x 19 Parabellum Tabanca Fişegi Teknik Özellikler.	42
Tablo 2.5.	7.62 mm x 51 (M80) Normal Fişek Teknik Özellikler.	43
Tablo 2.6.	Balistik koruma seviyeleri (NIJ 0101.03) [4].	45
Tablo 2.7.	Balistik koruma seviyeleri (STANAG-4569) [5].	46
Tablo 3.1.	Mermi bileşenlerin mekanik özellikleri.	48
Tablo 3.2.	Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakayı oluşturan bileşenlerin mekanik özellikleri.	48

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Namlu içerisindeki Yiv-Setlerin görünümü.	6
Şekil 1.2.	Plakalarda oluşan yaygın hasar mekanizmaları [6].	12
Şekil 2.1.	Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka.	17
Şekil 2.2.	Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın kalınlığı boyunca farklı kompozisyonel gradyanlarda seramik bileşenin hacimsel oranı (V_c).	18
Şekil 2.3.	TTO Modelin şematik gerilme-şekil değiştirme eğrisi.	21
Şekil 2.4.	Farklı kompozisyonlardaki plakaların TTO model ile üretilmiş gerilme-şekil değiştirme eğrileri.	22
Şekil 2.5.	Notasyon [7].	23
Şekil 2.6.	8 düğüm noktalı altı yüzlü katı eleman [7].	26
Şekil 2.7.	l_0 ve l sırasıyla deforme olmamış ve deforme olmuş tek eksenli çekme numunesi uzunluğu olmak üzere izotropik ve kinematik sertleşme durumunda elasto-plastik davranış [7].	29
Şekil 2.8.	Farklı malzeme kompozisyonlarında ($n=0.1$, 1.0 , ve 10.0) üretilmiş Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar. .	34
Şekil 2.9.	Farklı malzeme kompozisyonlarında ($n=0.1$, 1.0 , ve 10.0) üretilmiş Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalarda kalınlık boyunca bileşenlerin değişimi.	35
Şekil 2.10.	Toz karıştırma ünitesi.	38
Şekil 2.11.	Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka üretimi için sıcak iş çeliğinden (AISI2344) imal edilmiş kalıplar.	39
Şekil 2.12.	Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka üretimi için kullanılan sıcak pres ünitesi.	40
Şekil 2.13.	Balistik test sistemi.	41
Şekil 2.14.	Balistik atışların kullanılan silah sistemi.	42

Şekil 2.15.	Hız ölçüm sistemi.	43
Şekil 2.16.	Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların hedef noktasına sabitlenmesi.	44
Şekil 2.17.	Balistik testlerde kullanılan mermilere ait ceket ve kurşun resimleri.	45
Şekil 3.1.	Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların sabitlenmesi. . .	48
Şekil 3.2.	Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka ve 9 mm x 19 parabellum tabanca fişeginin sonlu elemanlar modeli.	51
Şekil 3.3.	Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka ve 7.62 mm x 51 (M80) fişeginin sonlu elemanlar modeli.	52
Şekil 3.4.	Toz sinterleme yöntemi ile üretilmiş çekme numunesi.	53
Şekil 3.5.	Al 6061 gerilme şekil değişimi eğrisi.	54
Şekil 3.6.	9 mm x 19 Parabellum tabanca fişek hızının zamana göre değişimi.	55
Şekil 3.7.	9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi ($v = 360m/s$) çarpması sonrasında alüminyum plakada oluşan deformasyon.	57
Şekil 3.8.	Gerinim hızı parametrelerinin ihmal edildiği durum için 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi ($v = 360m/s$) çarpması sonrasında metal yoğun karışıma ($n = 0.1$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.	59
Şekil 3.9.	Gerinim hızı parametrelerinin ihmal edildiği durum için 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi ($v = 360m/s$) çarpması sonrasında lineer karışıma ($n = 1$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.	61
Şekil 3.10.	Gerinim hızı parametrelerinin ihmal edildiği durum için 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi ($v = 360m/s$) çarpması sonrasında seramik yoğun karışıma ($n = 10$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.	63
Şekil 3.11.	9 mm x 19 Parabellum tabanca fişek hızının zamana göre değişimi.	65

Şekil 3.12.	Temsili gerinim hızı parametrelerinin kullanıldığı durum için 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi ($v = 360m/s$) çarpması sonrasında metal yoğun karışıma ($n = 0.1$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.	67
Şekil 3.13.	Temsili gerinim hızı parametrelerinin kullanıldığı durum için 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi ($v = 360m/s$) çarpması sonrasında lineer karışıma ($n = 1$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.	69
Şekil 3.14.	Temsili gerinim hızı parametrelerinin kullanıldığı durum için 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi ($v = 360m/s$) çarpması sonrasında seramik yoğun karışıma ($n = 10$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.	71
Şekil 3.15.	7.62 mm x 51 fişek hızının zamana göre değişimi.	72
Şekil 3.16.	7.62 mm x 51 fişek ($v = 860m/s$) çarpması sonrasında alüminyum plakada oluşan deformasyon.	74
Şekil 3.17.	7.62 mm x 51 fişek ($v = 860m/s$) çarpması sonrasında metal yoğun karışıma ($n = 0.1$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.	76
Şekil 3.18.	7.62 mm x 51 fişek ($v = 860m/s$) çarpması sonrasında lineer karışıma ($n = 1$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.	78
Şekil 3.19.	7.62 mm x 51 fişek ($v = 860m/s$) çarpması sonrasında seramik yoğun karışıma ($n = 10$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.	80
Şekil 4.1.	9 mm x 19 Parabellum mermi isabeti altında plaka ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyon.	85
Şekil 4.2.	9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi çarpması sonrası alüminyum plaka deformasyonu makro görüntüleri.	86
Şekil 4.3.	9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi çarpması sonrası metal zengin ($n=0.1$) fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka deformasyonu makro görüntüleri.	87

Şekil 4.4.	9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi çarpması sonrası lineer karışım ($n=1.0$) fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka deformasyonu makro görüntüleri.	88
Şekil 4.5.	9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi çarpması sonrası seramik zengin ($n=10$) fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka deformasyonu makro görüntüleri.	89
Şekil 4.6.	7.62 mm x 51 mermi isabeti altında plaka ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyon.	91
Şekil 4.7.	7.62 mm x 51 fişek çarpması sonrası alüminyum plaka deformasyonu makro görüntüleri.	92
Şekil 4.8.	7.62 mm x 51 fişek çarpması sonrası metal zengin ($n = 0.1$) fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka deformasyonu makro görüntüleri.	93
Şekil 4.9.	7.62 mm x 51 fişek çarpması sonrası lineer karışım ($n = 1.0$) fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka deformasyonu makro görüntüleri.	94
Şekil 4.10.	7.62 mm x 51 fişek çarpması sonrası seramik zengin ($n = 10$) fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka deformasyonu makro görüntüleri.	95

GİRİŞ

Konu ve Önemi

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (Functionally Graded Materials=FGMs) belirli bir pozisyonda malzeme kompozisyonunun sürekli olarak değiştiği yapılar olarak tanımlanırlar. Genellikle seramik-metal bileşiminden oluşan bu malzemeler zor çalışma şartlarına sahip uygulamalar için son derece uygundur. Örneğin, ağır aşındırıcı parçaların taşınmasında aşınmaya karşı astar olarak, roket ısı koruyucularında, ısı değiştirici tüplerde, termoelektrik jeneratörlerde, ısı motoru parçalarında, füzyon reaktörlerinin koruyucu yüzeylerinde ve elektrik yalıtımında.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, seramik-metal bağlantıların ara yüzeylerinde termo-mekanik uyumsuzlukların azaltıldığı ideal yapılardır ve böylece yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan yapılarda oluşan artık gerilmeleri de azaltabilirler. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerdeki ısıl gerilmeler kompozisyonel ve mikro-yapısal dağılımın kontrol edilmesiyle azaltılabilir. Yine de fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin çoğu kompozisyonundaki sürekli makroskobik değişimler nedeniyle artık gerilmelere sahiptirler ve bu artık gerilmeler fonksiyonel kademelendirilmiş malzemenin mekanik özelliklerini de etkiler.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler zor çalışma şartlarına sahip darbeli ortamlarda veya balistik amaçlı olarak da kullanılabilirler. Bu nedenle bu malzemelerin darbe dayanımlarının da belirlenmesi oldukça önemlidir. Mühendislik uygulamalarında dışarıdan gelebilecek darbelere karşı istenmeyen sonuçların ortaya çıkmaması için malzemenin gerekli en uygun cevabı veya davranışı verebilmesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler farklı şekillerde olabilir. Buna karşın darbeye karşı olan cevap da malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımlarının

darbeye karşı cevabı; elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı, çoğunlukla, çarpma yüzeyinde başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir. Darbe hasarı, metal malzemelerde genellikle bir tehlike işareti olarak kabul edilmez, çünkü metaller plastik şekil değiştirebilme kabiliyetlerinden dolayı, büyük miktarda enerjiyi absorbe edebilirler. Metaller sabit bir gerilme durumunda yapı sertleşmeden önce çok büyük uzamalarda akabilirler, bu nedenle oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Buna karşın kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde de meydana gelebilir, içyapıda oluşan tabakalar arasında ayrılma (delaminasyonlar) şeklinde başlayabilir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme veya bu şekil değişikliği sonucunda bir kopma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez. Genellikle gözle görülmeyen veya çok zayıf bir şekilde görülebilen hasarlar meydana gelebilir. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılacak enerjinin miktarı ve malzemenin bu enerjiyi sönümleyebilme kabiliyeti malzemede oluşacak hasar modlarını belirleyecektir. Bu nedenle kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi oldukça büyük bir öneme sahiptir.

Gelişen tehditlere karşı koruyucu amaçlı zırh malzemeleri, askeri ve sivil sahadaki kara, hava ve deniz araçlarında kullanılmaktadır. Ağırlığın azaltılarak hareket kabiliyetinin arttırılması amacı doğrultusunda yeni malzeme arayışları kompozit malzemeleri ön plana çıkarmaktadır. Bu doğrultuda balistik zırh olarak kullanılma potansiyeline sahip fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin balistik davranışları dikkate alınmadan gerçekleştirilecek tasarım ve imalatlar eksik ve hatalı olacaktır. Bu çalışma balistik üzerinde çalışan tasarımcı ve üreticilere faydalı ve sağlıklı bilgiler sunacaktır.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. Balistik

Balistik genel anlamda, fişğin ateşlenmesi ile mermi çekirdeğinin namludan çıkıp hedefe ulaşmasına kadar olan hareketlerini, hedef üzerindeki tahribatını ve mermi çekirdeğinin bu hareketine etki eden faktörleri inceleyen bilimdir. Balistik; iç balistik, dış balistik ve terminal balistiği olmak üzere üç ana disipline ayrılmıştır [8].

1.1.1. İç Balistik

İç balistik, mermi çekirdeğinin namlu içerisindeki hareketlerini ve bu hareketlere etki eden faktörleri inceler veya ateşleme yapıldıktan sonra silah namlusu içerisinde neler olduğunu, silahın tetiği çekildikten sonra mermi çekirdeğinin namluyu terk edinceye kadar geçen süre içerisinde kovan ve mermi çekirdeğinin durumunu inceler şeklinde tanımlanmaktadır. Saniyenin onda birinden daha kısa bir süre içerisinde gerçekleşen balistiğin bu bölümü; ateşli silah, fişek, fişğin ateşlenmesi, ateşleme iğnesinin vuruşu, kapsülün yapısı, kapsülün ateşlenmesi, barutun yapısı ve yanma hızı, ses seviyesi ve etkisi, namlu yapısı ve boyutları, namluda bulunan setlerin yapısı ve set sayısı ile ilgilenir.

1.1.2. Dış Balistik

Dış balistik, mermi çekirdeğinin namluyu terk ettiği andan hedefe ulaştığı ana kadar geçen zaman içerisindeki hareketlerini etkileyen faktörleri inceler veya mermi çekirdeğinin, namludan çıktıktan sonra hedefe varıncaya kadar geçen süre içerisinde

havanın direnci, mermi çekirdeğinin yer çekimi etkisinde kalması, yere düşüşü, sürüklenişi ve dengesi ile ilgilenir. Fişegin ateşlenmesinden sonra kovan içerisindeki gazın genişlemesiyle ortaya çıkan enerji, mermi çekirdeğine sıcaklık ve hareket olarak transfer edilerek çekirdeğin namluda ivme kazanmasını sağlar ve mermi çekirdeği namludan çıktıktan sonra kazandığı yüksek hızla havada hareket etmeye başlar. Mermi çekirdeğinin namlu ağzından hedefe varıncaya kadar hareketinde çizdiği yola "mermi çekirdeği yolu" denir ve mermi çekirdeğine uçuş esnasında tesir eden rüzgar, sıcaklık gibi dış etkiler yardımı ile tespit edilir.

1.1.2.1. Coriolis Etkisi

Deniz savaşlarında olduğu gibi özellikle çok uzaktaki hedeflere yapılan atışlarda, yörüngenin oluşumunda etkin olan bir kuvvet de Coriolis kuvvetidir. Kuzey yarım kürede yapılan atışlarda mermi sağa, güney yarım kürede yapılan atışlarda ise sola sapar. Bu konuyu en iyi açıklayan örnek ise I. Dünya savaşından verilebilir. Güney Atlantik'te 50 derece güney enleminde yer alan Falkland Adaları civarında Alman donanmasına karşı savaşan İngiliz donanmasına bağlı gemilerde yapılan top atışlarında Alman gemilerinin hep 90m kadar soluna isabet ettirilmiş gemiler vurulamamıştır. Sonradan yapılan araştırmada İngiliz gemilerinin nişan mekanizmalarının kuzey yarım kürede savaşmak üzere ayarlanmış olduklarından güney yarım kürede yapılan atışların Coriolis kuvvetinin neden olduğu sapmanın iki katı kadar hedefin soluna yapıldıkları anlaşılmıştır.

Mermi çekirdeği yörüngesinin şekli esas olarak aşağıdaki faktörlere bağlıdır;

- Yerçekimi etkisi
- İlk hızı (namludan çıkış hızı)
- Namlunun yatay düzlemle yaptığı açı
- Mermi çekirdeğinin şekli

1.1.2.2. Balistik Katsayı (BC)

Hava direncinin tesiri mermi çekirdeğinin şekline bağlıdır. Sivri uçlu bir mermi çekirdeği, küt uçlu olana göre daha az hava direnci ile karşılaşır. Hava direncindeki bu fark balistikte sembolü i olan şekil faktörü ile alakalıdır. Balistik katsayı kesitsel yoğunluğun (SD) şekil faktörüne bölünmesiyle elde edilen bir değerdir. Kesitsel yoğunluk ise mermi çekirdeğinin kütesinin, çapının karesine oranı ile elde edilir .

$$SD = \frac{m}{d^2} \quad (1.1)$$

$$BC = \frac{SD}{i} \quad (1.2)$$

Balistik katsayısı büyük olan mermi çekirdeği küçük olana nazaran hızı daha fazla korur ve daha kararlı şekilde hedefe doğru gider [9].

Silahların namluları içerisinde bulunan helezon şeklinde uzanan girintilere "yiv", çıkıntılara ise "set" ismi verilir (Şekil 1.1). Mermi çekirdeğine kendi eksenini etrafında dönü veren yiv ve setlerin namlu içerisindeki dönüşleri, soldan sağa veya sağdan sola doğrudur. Mermi çekirdeğinin havayı burğu gibi delerek atış menzilinizi uzatması, hedefe ilk önce uç kısmı ile varması ve delme gücünün artması yiv ve setler vasıtasıyla olur. Bu sebeple yivli ve setli silahların hızı, tahribat gücü ve mesafesi, yivsiz setsiz silahlara oranla daha fazladır. Fişegin ateşlenmesinden sonra mermi çekirdeği barut gazının etkisiyle namlu içerisinde yol alır ve devamında yüksek bir hızla namludan dışarıya doğru hareket eder. Mermi çekirdeğinin, namludan çıktıktan sonra havada hareketi, uçakların hareketine benzemekte olup; yalpalama, dönü ve yalpalı dönü olarak adlandırılır. [8]

1.1.3. Terminal Balistik

Mermi çekirdeğinin hedefe çarptıktan, duruncaya kadar yaptığı; delme gücü enerjisini çarptığı cisme iletmesi gibi etkilerle ilgilenir. Mermi çekirdeğinin hedefe çarpması sonucu kaybolan kinetik enerji miktarı esas olarak 4 faktöre bağlıdır.

1) Hedefe çarpma esnasında mermi çekirdeğinin sahip olduğu enerji: Bu mermi çekirdeğinin kütesi ve hızına bağlıdır.



Şekil 1.1. Namlu içerisindeki Yiv-Setlerin görünümü.

2) Hedefe çarpma esnasında mermi çekirdeğinin yalpalama açısının değeri: Mermi çekirdeği namludan hızla çıkarken yivlere sürtünmesi nedeniyle jiroskopik bir dönüşe sahip olur. Bu sırada bir yalpalama da başlar sonra düzelir ve dönüş değeri azaldıkça yalpalama çoğalır. Bu yalpalama mermi çekirdeğinin uzunluğuna, çapına, kesitsel yoğunluğuna, yivlerin dönüş derecesine, hava yoğunluğuna bağlı olarak farklı değerlerde meydana gelebilir.

3) Mermi çekirdeğinin kalibresi, şekli, yapısı: Küt uçlu mermi çekirdekleri, sivri, uçlu olanlara göre hedef tarafından daha fazla engellenir dolayısıyla daha fazla enerji kaybederler. Yumuşak uçlu ve çukur (gömleksiz, yarı gömlekli) mermi çekirdekleri hedef içerisine girerken genişleme eğiliminde olup daha fazla enerji kaybederler.

4) Mermi çekirdeğinin çarptığı hedefin yoğunluğu, sertliği ve elastikiyeti: Yoğunluğu yüksek olan hedef, mermi çekirdeği geçişine daha fazla direnir ve çekirdeğin enerji kaybı daha fazla olur [9].

Farklı kompozisyonlara sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların, farklı geometri ve hızlara sahip iki tip mermi tesiri altındaki balistik performansının inceleneceği bu tez çalışması terminal balistik ile ilgilidir. Atışlarda kullanılan mermilerin hedef plakaya ulaşmaya kadar geçen zaman içerisindeki hareketleri ve bu hareketleri etkileyen faktörler bu çalışma kapsamının dışındadır. Mermilerin hızı namlunun yaklaşık olarak 1.5 metre ilerisine yerleştirilmiş optik hız ölçme sistemi kullanılarak hesaplanmış olup merminin hedef plakaya çarpmadan hemen önce ve plakayı delip geçtikten sonra sahip olduğu hız değerleri test merkezinin

kabiliyetlerinin yetersiz olması sebebiyle hesaplanamamıştır.

1.2. Balistiğin Fiziksel Temelleri

Aristoteles'e göre bir ok veya benzeri bir cisim fırlatıldığı zaman önünde bulunan ve yerini aldığı hava sürekli biçimde cismin arkasına geçer ve onu iterek yol almasını sağlardı. Cismin arkasına geçen hava gücünü yitirdiğinde o cisim yere düşerdi. Bu görüş 2000 yıl kadar kabul görmüştür. Bu arada farklı düşünenler de çıkmıştır, M.S. 6. yüzyılda yaşayan Philoponos adlı bir filozof fırlatılan cisimde "impetus" denilen, cismi ileri doğru iten bir kuvvet bulunduğunu, bu kuvvet tükendiğinde cismin yere düştüğünü kabul etmiştir.

1537 tarihinde yayınlanan Nicolo Tartaglia'nın "Nova Sci-entia" ve 1606 tarihinde yayınlanan Cespedes'in "Instrumentos Nuevos de Giometria" adlı eserleri balistik alanında ilk önemli çalışmalar arasında sayılırlar. Sir Issac Newton, 1687 yılında yayınladığı kısaca "Principia" olarak bilinen "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica" adlı büyük eserinde hareket kanunları da denilen dinamiğin temel prensiplerini ortaya koymuştur.

Newton Kanunları: Dinamiğin Temel Prensipleri

Newton'un 1. Kanunu: Bir cisme etkiyen bileşke kuvvet sıfırsa; cisim eğer başlangıçta hareketsiz ise hareketsiz kalır, eğer başlangıçta hareketli ise sabit hızla bir doğru üzerinde hareket eder.

Newton'un 2. Kanunu: Bir cisme etkiyen bileşke kuvvet sıfır değilse, cisim bileşke kuvvetin şiddeti ile orantılı ve bu bileşke kuvvetin doğrultusunda bir ivme kazanır.

$$\underline{F} = m\underline{a} \quad (1.3)$$

Burada $\underline{F}$ kuvvet, m kütle ve $\underline{a}$ ise ivme olmakla birlikte bu bağıntı Newton'un ikinci kanununu tam olarak formüle etmektedir; denklem sadece $\underline{F}$ ve $\underline{a}$ 'nın şiddetlerinin orantılı olduğunu değil, doğrultularının da aynı olduğunu ifade eder. Eğer $\underline{F}$ kuvveti sabit olmayıp t ile değişirse $\underline{a}$ ivmeside t ile değişecektir. Cisim aynı anda birden fazla kuvvetin etkisi altında bulunuyor ise denklem;

$$\sum \underline{F} = m\underline{a} \quad (1.4)$$

şeklinde olacaktır. Burada $\sum \underline{F}$, cisme etki eden bütün kuvvetlerin vektörel toplamını veya bileşkesini göstermektedir.

Newton'un 3. Kanunu: Birbiri ile temasta olan cisimlerin arasındaki etki ve tepki kuvvetleri aynı şiddete, zıt yönlü ve aynı tesir çizgisi üzerindedir.

İmpuls-Momentum

Bir $\underline{F}$ kuvvetinin etkisinde bulunan m kütleli bir cismi göz önüne alırsak. Newton'un ikinci kanunu olan $\underline{F} = m.\underline{a}$ da $\underline{a} = d\underline{v}/dt$ yerine yazılırsa;

$$\underline{F} = m \frac{d\underline{v}}{dt} \quad (1.5)$$

olur ve m kütlesi sabit olduğundan

$$\underline{F} = \frac{d}{dt}(m\underline{v}) \quad (1.6)$$

elde edilir. $m\underline{v}$ vektörüne cismin momentumu denir. Denklemin her iki tarafını dt ile çarpar ve t_1 zamanından t_2 zamanına kadar integre edilirse

$$\underline{F} dt = d(m\underline{v}) \quad (1.7)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} \underline{F} dt = m\underline{v}_2 - m\underline{v}_1 \quad (1.8)$$

elde edilir. Denklemin sol tarafındaki integrale, $\underline{F}$ kuvvetinin göz önüne alınan zaman aralığındaki impulsu denir.

Momentumun Korunumu

Kendisine dış kuvvetler etkimeyen bir sistemin momentumu sabit kalır. Bir silah ateşlendiğinde mermi çekirdeğini fırlatan kuvvet, fişek yatağında yanmaya başlayan barutun meydana getirdiği gazların mermi çekirdeğine namlu boyunca yapmış olduğu basınç kuvvetidir. O halde momentumu sabit kalmalıdır. Hâlbuki mermi çekirdeği namlu içinde dururken sistemin momentumu sıfırdır. Sonra mermi

çekirdeği, silahı hızla terk edince, kütlesi m , hızı $\underline{V}$ ile gösterilirse $m.\underline{V}$ değerinde bir momentuma sahip olur. Sistemin momentumunun değişmemesi, yine sıfır olması için silah da ters yöne hareket etmelidir. Silahın kütlesi M , geriye doğru hızı $\underline{v}$ ile gösterilirse silah $M.\underline{v}$ değerinde bir momentuma sahip olur. Her iki momentum birbirine eşit olacaktır. O halde:

$$m\underline{V} = M\underline{v} \quad (1.9)$$

Burada $\underline{v}$ değeri silahın geri tepme hızıdır.

Bir Mermi Çekirdeğinin Enerjisi

Bir mermi ateşlendiğinde çekirdeği, barut gazlarının itmesi sonucu bir kinetik enerjiye sahip olur. Bu enerji mermi çekirdeğinin kütlesi ve kazandığı hızın karesi ile orantılıdır.

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.10)$$

Eğer silahın namlusu yivli ise mermi çekirdeği ayrıca bir de rotasyonel enerjiye sahip olacaktır.

$$E_{rot} = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (1.11)$$

Burada I atalet momenti (kg.m^2), ω açısal hız (rad/s) değeridir. Merminin sahip olduğu toplam enerji değeri;

$$E_{top} = E_{kin} + E_{rot} \quad (1.12)$$

olur. Ancak literatürde genellikle sadece kinetik enerjileri verilir.

1.3. Kaynak Araştırması

Tarih boyunca ülkeler arasındaki savaşlarda ülkelerin sahip oldukları silah ve savunma araçlarının kabiliyetleri önemli rol oynamıştır. Bu alanda diğer ülkelerin sahip olmadığı teknolojiye sahip olan ülkeler, kendi bölgelerinde ve dünyada caydırıcı güç olma özelliği kazanmış ve dünyanın en güçlü ülkeleri arasında yer almışlardır. Ülkelerin sahip oldukları teknoloji izleyecekleri savunma politikaları açısından da oldukça önem taşımaktadır. Nitekim Osmanlının gerileme döneminde sanayi devriminin yakalanamaması ve teknolojik gelişmelerin takip edilememesi yeni

savunma sistemlerinin üretilmemesi ve bunlardan yararlanılmaması imparatorluk ordusunun savunma kabiliyetlerini düşürmüş ve yenilgilerinin önemli nedenlerinden birisi olmuştur.

Genellikle kara araçlarında zırh malzemesi olarak çelik ve alüminyum alaşımlar kullanılırken hava araçlarında kompozit ve alüminyum malzemeler kullanılmaktadır. Bir yapıyı tüm yönleriyle bütün mermi tehditlerine karşı koruyabilecek bir zırh sistemini tasarlamak yüksek maliyetli ve kütleli olarak çok ağır olacaktır. Bu sebeple yapının ihtiyaç duyacağı koruma seviyesine bağlı olarak en uygun ağırlık-performans oranına sahip bir zırh tasarlamak gerekir. Buna paralel olarak tahrip gücü ve etki alanı sürekli artan mermi tehditleri, zırh sistemlerinde yeni malzeme arayışlarını mecburi kılmıştır. Zırh teknolojisindeki bu gelişmeler ışığında hafif, yüksek darbe dayanımına ve yüksek hareket kabiliyetlerine sahip daha iyi malzeme üretmek için endüstriyel ve savunma alanında pek çok çalışma yürütülmektedir [10–13].

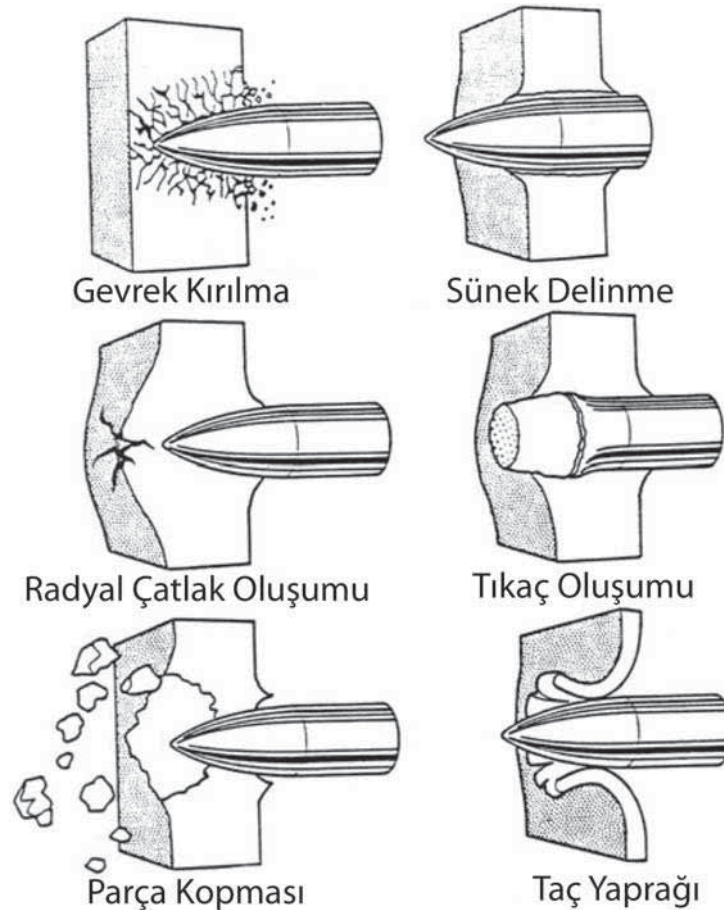
Günümüzde metaller mekanik özellikleri bakımından gelişen teknolojinin ihtiyaçları için yeterli olamayınca, daha üstün özelliklere sahip olan kompozit malzemeler üretilmeye başlanarak bu konuda hızlı bir gelişme sürecine girilmiştir. Kompozit malzemelerden yapılmış mühendislik yapı elemanları havacılık, askeri, otomotiv, gemicilik, spor malzemeleri ve inşaat mühendisliği gibi birçok endüstri alanında artarak kullanılmaktadır. Kompozitlerin kullanılmasının zorlayıcı nedeni metaller gibi klasik malzemelere göre sağladığı avantajlardır. Bu avantajlar kısaca şöyle sıralanabilir; yüksek mukavemet-ağırlık oranı, yüksek rijitlik-ağırlık oranı, korozyona karşı direnç, düşük ısı genleşme katsayısı, geniş sıcaklık aralığında kullanılabilirlik ve gereksinimlere göre istenilen toleranslarda üretilerek kullanılabilirlerdir. Kompozitlerin kritik öneme sahip kullanım alanlarından biride savunma sanayidir. Kompozit zırh sistemleri birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerden veya fazlardan oluşan zırh sistemidir. Kompozit zırh sistemi yapısında fiber takviyeli polimer yapıya ilave olarak seramik ve çelik plakalar eklenmektedir. İlk kullanımı İngiliz Chobham zırhında gerçekleşmiştir. Geleceğin savaş araçlarında kompozit ve seramik esaslı zırh sistemleri üzerinde yoğun çalışmalar sürdürülmektedir [14, 15].

Bilindiği gibi metal yapıların çarpma hasarları genellikle yüzeyden başlar ve göz ile belirlenebilir. Fakat kompozitlerde karakteristik hasar mukavemetinde ciddi azalmalara sebep olan delaminasyon, matris çatlağı veya fiber kırılması şeklinde olup gözle görülemeyecek şekilde yapının içinde oluşabilir. Ayrıca, çarpma esnasında ortaya çıkan düşük ve orta enerjiler metaller tarafından elastik ve plastik deformasyonlar tarzında absorbe edilebilir. Kompozitlerde ise absorbe edilen enerjinin neden olduğu plastik deformasyon kabiliyeti oldukça sınırlıdır ve bu enerji malzemenin mukavemeti ve rijitliğinde azalmaya sebep olan hasar bölgelerinin oluşmasına neden olur. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılabilecek enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönümleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir. Bu nedenle kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi oldukça büyük bir öneme sahiptir [16].

Bununla beraber, kompozit yapılarda çarpma sonrası hasar bölgesinin davranışını tahmin etmek metallerinkinden daha zordur. Kompozit yapıların bu olumsuzluklarına rağmen, genellikle seramik matrisli ve katmanlı kompozitlerin çarpma davranışlarının belirlenmesi amacıyla yapılan birçok çalışma mevcuttur [17,18]. Şekil 1.2’de plakalarda oluşan yaygın hasar mekanizmaları gösterilmektedir.

Gonçalves [19] ve diğerleri, seramik-metal zırh kullanarak merminin çarpma sonrasındaki kütle kaybını, hız kaybını ve arka malzemedeki genişlemeyi incelemiştir. Ayrıca kompozit içerisindeki partikül büyüklüğünün balistik performansa etkisi incelenmiştir. Deneysel ve teorik çalışmalarda seramik tabaka kalınlığının balistik performansta önemli rol oynadığı sonucuna varmışlardır. Seramik tabaka kalınlığını arttırmak yerine, partikül büyüklüğünün arttırmanında balistik performansı arttırdığını deneysel yollarla tespit etmişlerdir.

Liu [20] ve diğerleri, kompozit tabakaların çarpma nüfuziyet karakteristikleri üzerine çalışmışlardır. Çarpma olayındaki önemli hasar bölgelerinde çarpma yükünün ve mekanik özelliklerin nüfuziyeti etkilediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca balistik çarpma nüfuziyet direncine en büyük etkenin kompozit kalınlığı olduğu sonucuna varmışlardır. Wang [21] ve diğerleri, tabakalı kompozitlerin zırh olarak kullanılması durumundaki davranışlarını incelemiştir. Çalışmalarında, cam fiber takviyeli



Şekil 1.2. Plakalarda oluşan yaygın hasar mekanizmaları [6].

levhaların balistik darbe altındaki dirençleri üzerinde testler yapmışlardır. Fiber kullanılarak üretilen kompozitlerin yüksek hızlardaki mermilere karşı tek başlarına kullanılmaması gerektiğini vurgulamışlardır. Bu gibi durumlarda, ilk çarpma yüzeyine seramik tabakası gibi sert koruyucu yapıların konulması gerektiğini vurgulamışlardır. Yüksek hızda çarpma ve yavaş hızda çarpma testleri sonucunda enerji absorpsiyonlarının birbirine yakın değerlerde olduğu deneysel çalışmalar yardımıyla tespit edilmiştir.

Karamis [22] ve diğerleri, AA5083 alüminyum matrisli SiC takviyeli kompozit malzemenin balistik davranışlarını incelemişlerdir. Deneyler sırasında 7.62 ve 9 mm kalibreli mermiler kullanılmıştır. Atışlar sonrası, çarpma yüzeylerinde kırılma çatlaklar gözlenmiştir. Ayrıca, mermi çarpma bölgelerinde matrisin, sürtünmeden dolayı ergidiği tespit edilmiştir. Testlerde, kompozit hedefin arkasında destek olup olmamasının, hedefin direncini etkilediği tespit edilmiştir.

Behzad [23] ve diğerkleri, alüminyum-alüminyum, alüminyum-çelik, çelik-alüminyum ve çelik-çelik katmanlı yapıların, balistik performansını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Sayısal çalışmalarda, sonlu elemanlar modeli olarak Johnson–Cook malzeme modelini kullanmışlar ve sayısal ve deneysel sonuçları Ipson and Recht analitik modeli ile kıyaslamışlardır. Deneysel çalışmalarda, en yüksek nüfuziyet direncini sırasıyla; çelik-çelik, çelik-alüminyum, alüminyum-çelik ve alüminyum-alüminyum katmanlı yapıların gösterdiğini tespit etmişler ve sayısal çalışmalarda %7 lik bir hata oranı ile bunu doğrulamışlardır.

Feli [24] ve diğerkleri, silindirik tungsten mermi etkisi altında seramik ön yüzü kompozit plakaların balistik perforasyonunun simülasyonunu LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirmişlerdir. İki boyutlu, dinamik explicit analizlerinde, plaka üst katmanını Al_2O_3 , arka katmanını ise Twaron elyaf takvileyi kompozit oluşturmuştur. Analizlerinde mermi, seramik katman ve kompozit katman için sırasıyla Johnson–Cook, Johnson–Holmquist ve Composite-Damage malzeme modellerini kullanmışlardır. Mermi hızı azaldıkça mermi koniklik açısının azaldığını, ayrıca darbe hızının artmasıyla, ara katmanlarda delemantasyonun etkilendiğini göstermişlerdir.

Taşdemirci [25] ve diğerkleri, seramik kompozit zırhlarda, ara katman malzemesinin balistik performans üzerine etkisini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı ara katman malzemesi kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmalarda, ara katman malzemesinin değişmesinin, gerilme dalgasının yayılımı üzerine etkili olduğunu göstermişlerdir.

Yapılan literatür çalışmasında görülmüştür ki, seramik matrisli ve katmanlı kompozit yapıların balistik davranışları konusunda pek çok çalışma mevcutken fonksiyonel kademelendirilmiş yapıların balistik performansını inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin ısı ve mekanik yüklemeler altındaki yer değiştirme, gerilme ve gerilme dalgası yayılımını inceleyen çalışmalarda; fonksiyonel kademelendirilmiş bölge boyunca değişen malzeme kompozisyonunun, malzemenin söz konusu yüklemeye tepkisi üzerinde etkili olduğu gözlenmiş, ısı yüklemeler

altında bu durumun daha belirgin olduğu saptanmıştır [26–30].

Chin [31], askeri uygulamalarda, hafif silah tehditlerine karşı, SiC takviyeli alüminyum matrisli fonksiyonel kademelendirilmiş zırh kompozitlerinin, balistik performansını incelemiş ve gelecekte fonksiyonel kademelendirilmiş kompozit zırhların savaş kabiliyetlerini arttıracak bir malzeme olacağını ortaya atmıştır. David ve diğerleri [32], sayısal bir model kullanarak, optimum balistik performans için fonksiyonel kademelendirilmiş zırhların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Plaka kalınlığı boyunca değişen sertlik düzeyinin, nüfuziyet üzerindeki etkisinin incelendiği bu çalışmada, sert yüzeyden yumuşak yüzeye doğru ve yumuşak yüzeyden sert yüzeye doğru gönderilen vurucunun nüfuziyet derinliği üzerinde önemli rol oynadığını, buna karşın vurucu çapından düşük olan nüfuziyetler için değişen sertlik değerinin önemli bir etkisinin olmadığını ortaya koymuşlardır. William [33] ve diğerleri, seramik-metal fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin, balistik uygulamalarda kullanılabilirliğinin fizibilitesini yapmışlardır. Bu çalışmada, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, balistik açıdan en uygun hale getirilmese de bu malzemelerin balistik uygulamalar açısından önemli tasarım faydası sağlayacağını ortaya koymuşlardır. James ve diğerleri [34], plazma sinterleme yöntemiyle ürettikleri titanyum diborür-titanyum, boron-titanyum; fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların, gaz silah sistemi kullanarak, düşük ve yüksek hızlarda balistik testlerini yapmışlardır. Balistik testler sonrası, taramalı elektron mikroskobu ile yapmış oldukları incelemelerde, dört, beş ve altı katman olarak ürettikleri plakalarda özellikle en üst katman olmak üzere ara yüzeylerde çatlaklarının ve katmanlar arası ayrılmalar oluştuğunu göstermişlerdir. Douglas ve diğerleri [35], alüminyum nitrür-alüminyum fonksiyonel kademelendirilmiş zırh sistemlerinin balistik performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Alüminyum nitrür için Johnson-Holmquist Beissel seramik model, alüminyum için ise Johnson Cook metal model kullanmışlardır. İki ve altı katman olarak modelledikleri hedef malzemelerin balistik limitlerini hesaplamışlardır. İki katman olarak modelledikleri hedef, 848 m/s mermi hızında delinirken, altı katman olarak modellenmiş hedefin 1004 m/s de delindiğini tespit etmişlerdir.

Sonuç olarak, literatürde fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların, balistik darbe yükleri altındaki davranışlarının, sayısal ve deneysel olarak incelendiği bir çalışmanın bulunmaması sebebiyle, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerden yapılmış plakaların, farklı yükleme ve sınır şartlarında, lineer olmayan mekanik davranışlarının tespiti ve bu bilgiler ışığında gerilmeleri azaltacak ve kullanım ömrünü uzatacak, optimum malzeme kompozisyonuna sahip yapıların belirlenmesi son derece önemlidir. Bununla birlikte, özellikle askeri uygulamalarda, zırh yapımında ve darbeli ortamlarda kullanılan fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların, dinamik tepkilerinin belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir.

2. BÖLÜM

GEREÇ VE YÖNTEM

2.1. Bünye İlişkileri ve Karışım Teorisi

Seramik ve metal bileşenlerden oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların, alt ve üst yüzeyleri metal olup, bu metal yüzeyler arasında kalan bölgede seramik oranı, alt yüzeyden üst yüzeye doğru ilerledikçe, kademeli olarak değiştiği kabul edilmektedir (Şekil 2.1). Seramik (c) ve metal (m) bileşenlerin hacimsel oranları arasındaki ilişki;

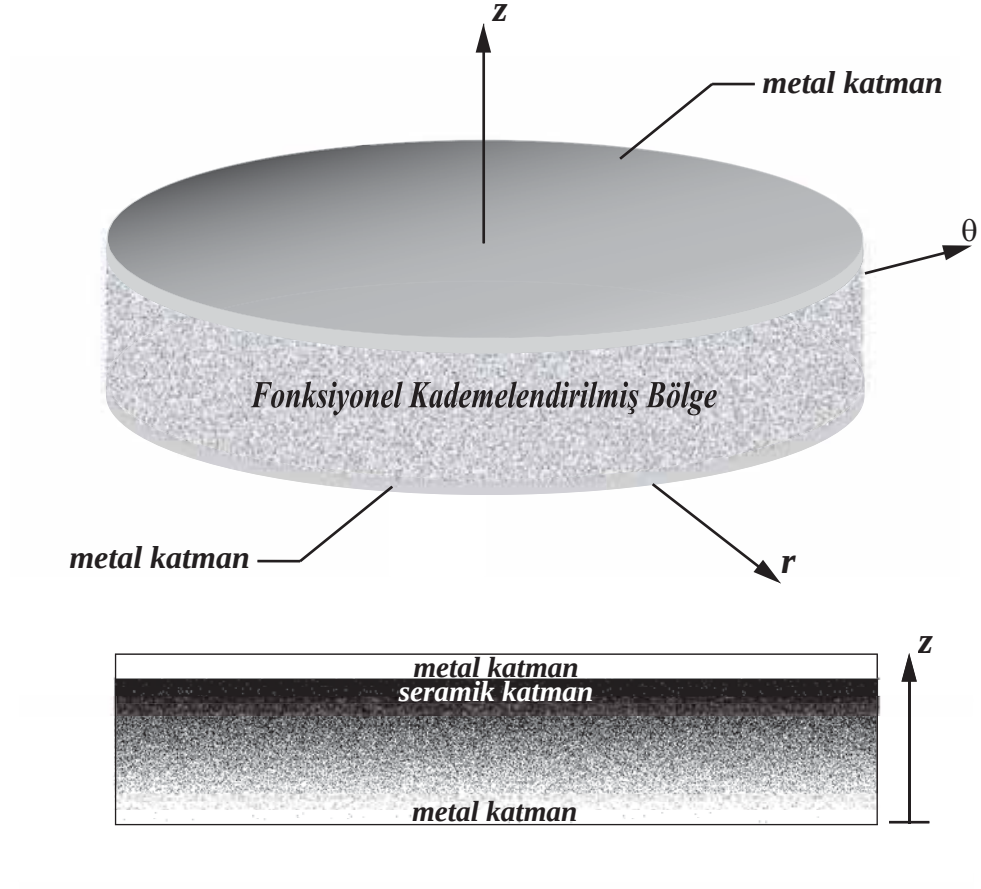
$$V_c + V_m = 1 \quad (2.1)$$

eşitliği ile ifade edilir. Bileşimin oranı plaka kalınlığı (h) boyunca konumun fonksiyonu olarak

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

şeklinde ifade edilir, burada $V_c(z)$ plakanın herhangi bir z mesafesindeki seramik bileşenin hacimsel oranı, h plakanın kalınlığı, n bileşimin değişimini lineer veya non-lineer olarak kontrol eden keyfi bir üstür. Çeşitli n değerleri için bileşimin hacimsel oranları Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Kademelendirilmiş bölgedeki, lokal malzeme özelliklerinin hesaplanmasında, mikro mekanik model olarak Mori-Tanaka şeması kullanılmıştır [36, 37]. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemenin etkili hacim modülü K ve kayma modülü G Mori-Tanaka şemasına göre şu şekilde ifade edilir;

$$\frac{K - K_m}{K_c - K_m} = \frac{V_c}{\left[1 + (1 - V_c) \frac{3(K_c - K_m)}{3K_m + 4G_m}\right]} \quad (2.3)$$



Şekil 2.1. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka.

$$\frac{G - G_m}{G_c - G_m} = \frac{V_c}{\left[1 + (1 - V_c) \frac{(G_c - G_m)}{G_m + f_1} \right]} \quad (2.4)$$

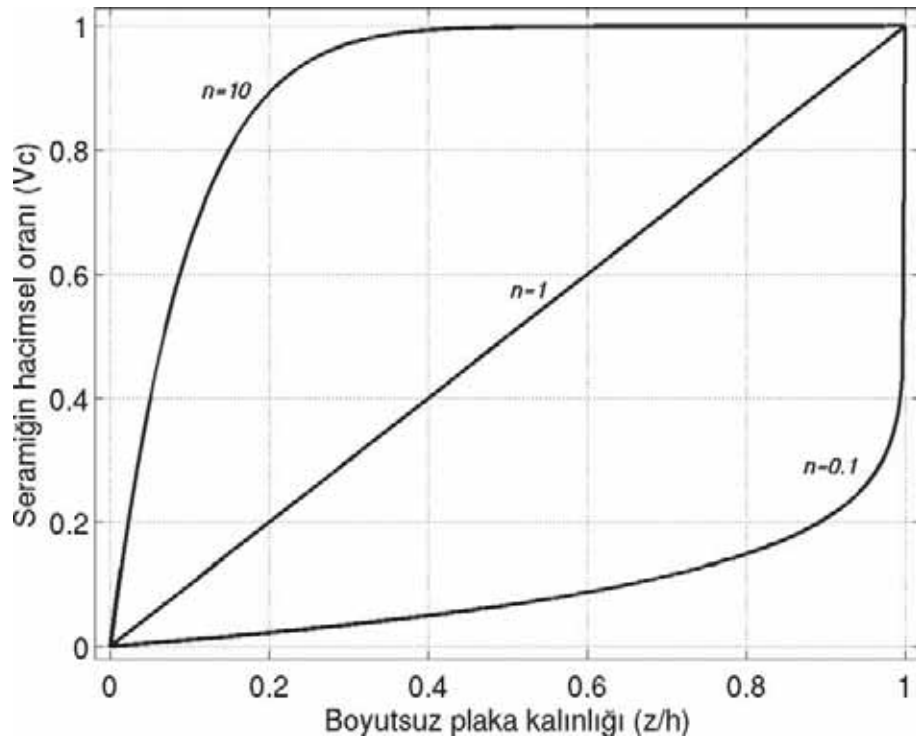
$$f_1 = \frac{G_m (9K_m + 8G_m)}{6 (K_m + 2G_m)} \quad (2.5)$$

Elastisite modülü E ve Poisson oranı v 'yi hesaplamak için;

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad (2.6)$$

ve

$$v = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)} \quad (2.7)$$



Şekil 2.2. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın kalınlığı boyunca farklı kompozisyonel gradyanlarda seramik bileşenin hacimsel oranı (V_c).

2.2. Tamura-Tomota-Ozawa (TTO) Model

Alışılmış kompozitlerin mikro mekanik modelleri kullanılarak, elastik özelliklerin yaklaşık olarak belirlendiği, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin lineer-elastik davranışları, klasik Hooke kanunu ile tariflenirken, elasto-plastik davranışlarını modellemek için Tamura ve diğerleri [38] tarafından ortaya atılan ve metal-seramik esaslı fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin, hacimsel oranlarını temel alan TTO model kullanılabilir.

TTO model iki fazlı kompozitlerde, iki bileşenin, ortalama tek eksenli gerilme ve şekil değiştirme değerleri kullanılarak elde edilen, tek eksenli gerilme (σ) ve şekil değiştirme (ε) değerleriyle ilişkilidir:

$$\sigma = V_1\sigma_1 + V_2\sigma_2, \quad \varepsilon = V_1\varepsilon_1 + V_2\varepsilon_2 \quad (2.8)$$

Burada σ_i ve ε_i ($i = 1, 2$) sırasıyla bileşenlerin ortalama gerilme ve şekil değiştirme değerleri ve V_i ($i = 1, 2$) ise hacimsel oranları ifade etmektedir. TTO, modele ilave

bir parametre olan q 'yu şu şekilde tanımlar:

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|}, \quad 0 < q < \infty \quad (2.9)$$

q parametresi gerilme-şekil değiştirme transfer oranı olarak isimlendirilir ve değeri, bileşenlerin malzeme özelliklerine ve kompozit yapı içerisindeki mikro yapısal etkileşimlerine bağlıdır. Örneğin, $q = \infty$ iken bileşen elemanların yükleme doğrultusundaki deformasyonları özdeştir, halbuki $q = 0$ iken bileşen elemanlar aynı gerilme seviyelerine sahiptirler. Genellikle, kompozit yapı içerisindeki bileşen elemanlar, karmaşık mikro yapıları (tane şekillerindeki fark, doğrultu, hacimsel oran vb.) nedeniyle, farklı gerilme ve şekil değiştirme değerlerine sahiptirler. q 'nın sıfırdan farklı, sonlu bir değeri, yaklaşık olarak bileşenlerin etkilerini yansıtabilir.

$$\sigma_i = E_i \varepsilon_i, \quad (i = 1, 2) \quad (2.10)$$

Burada E_i ($i = 1, 2$) bileşenlerin elastisite modülüdür. Kompozitin elastisite modülü E ise şu şekilde hesaplanabilir:

$$E = \frac{V_2 E_2 \frac{q + E_1}{q + E_2} + (1 - V_2) E_1}{V_2 \frac{q + E_1}{q + E_2} + (1 - V_2)} \quad (2.11)$$

Kompozitin Poisson oranı:

$$v = V_1 v_1 + V_2 v_2 \quad (2.12)$$

Burada v_i ($i = 1, 2$) bileşenlerin Poisson oranlarıdır. Seramik-metal kompozitlerin plastik deformasyonu uygulamalarında TTO model, metal bileşen akmaya başlayınca, kompozitin aktığını varsayar. Kompozitin akma gerilmesi σ_Y şu şekilde tariflenir

$$\sigma_Y = \sigma_0 \left[V_2 + \frac{q + E_2}{q + E_1} \frac{E_1}{E_2} (1 - V_2) \right] \quad (2.13)$$

Burada σ_0 , metalin akma gerilmesidir. Yukarıdaki denklem göstermektedir ki, kompozitin akma gerilmesi; metalin akma gerilmesi, metalin hacimsel oranı, bileşenlerin elastisite modülleri ve q parametresine bağlıdır. Şimdi burada, kompozitin gerilme-şekil değiştirme eğrisini yaklaşık olarak tarif edecek bir kuvvet-kanunu modelini kullanacağız. Sırasıyla, metal ve kompozitin akma noktasından sonraki gerilme-şekil değiştirme eğrileri için

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_0 \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^{n_0}, \quad \sigma_2 \geq \sigma_0 \quad (2.14)$$

ve

$$\varepsilon = \varepsilon_Y \left(\frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^n, \quad \sigma \geq \sigma_Y \quad (2.15)$$

burada

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_2} \quad \text{ve} \quad \varepsilon_Y = \frac{\sigma_Y}{E} \quad (2.16)$$

sırasıyla, metalin ve kompozitin akma şekil değiştirme değerleri, n_0 ve n ise metal ve kompozitin sertleşme katsayılarıdır. Kompozit için gerilme-şekil değiştirme ($\sigma - \varepsilon$) eğrisini veren parametrik denklem şu şekilde tarif edilebilir:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y} = \frac{V_1 E}{q + E_1} \frac{\sigma_2}{\sigma_Y} + \frac{(q + V_2 E_1) E}{(q + E_1) E_2} \frac{\sigma_0}{\sigma_Y} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^{n_0} \quad (2.17)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_Y} = \frac{V_2 q + E_1}{q + E_1} \frac{\sigma_2}{\sigma_Y} + \frac{(V_1 q E_1)}{(q + E_1) E_2} \frac{\sigma_0}{\sigma_Y} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^{n_0} \quad (2.18)$$

Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te sırasıyla TTO Model ile tariflenen kompozitin, gerilme-şekil değiştirme eğrisini şematik olarak gösterimi ve farklı kompozisyonlara sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların TTO model ile üretilmiş gerilme şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.

2.3. Sonlu Elemanlar Formülasyonu

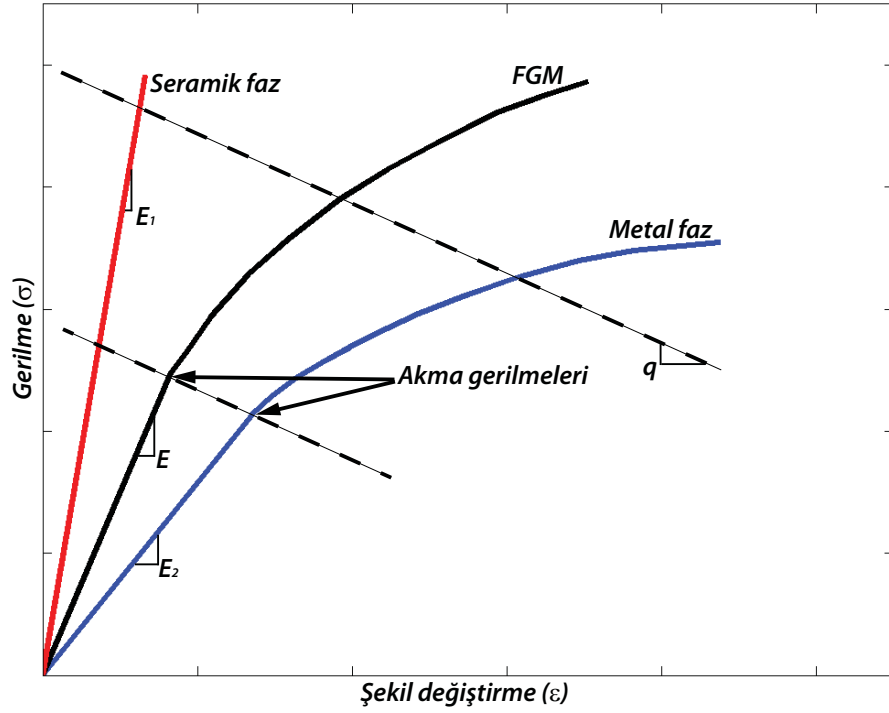
Sabit kartezyen koordinat sisteminde, başlangıç olarak X_α ($\alpha = 1, 2, 3$) sistemindeki bir b noktası, aynı koordinat sisteminde x_i ($i = 1, 2, 3$) noktasına hareket ederse, deformasyon, Lagrangian formülasyonuna göre Şekil 2.5'te de gösterilen döndürülmüş koordinatlar X_a ve zaman t ile ifade edilebilir.

$$x_i = x_i(X_a, t) \quad (2.19)$$

$t = 0$ 'da başlangıç şartları

$$x_i(X_a, 0) = X_a \quad (2.20)$$

$$\dot{x}_i(X_a, 0) = V_i(X_a) \quad (2.21)$$



Şekil 2.3. TTO Modelin şematik gerilme-şekil değiştirme eğrisi.

Burada V_i başlangıç hızını tanımlar.

2.3.1. Yapısal Denklemler

Temel amaç $x_i^+ = x_i^-$ olduğu durumda, bir iç sınır ∂b_3 boyunca temas süreksizliğini

$$(\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-)n_i = 0 \quad (2.22)$$

sınır ∂b_2 üzerinde yer değiştirme sınır şartlarını

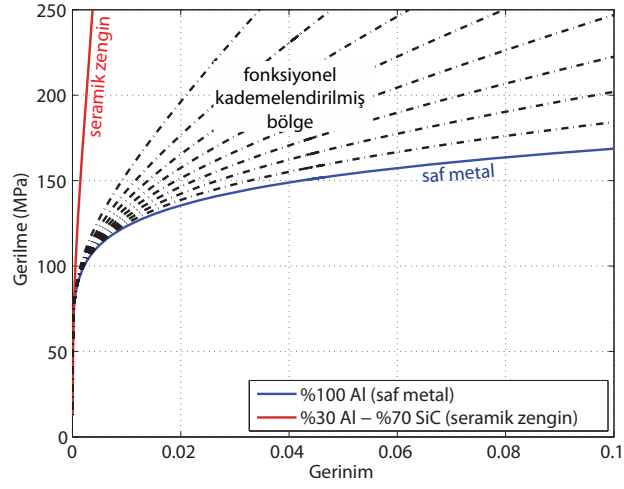
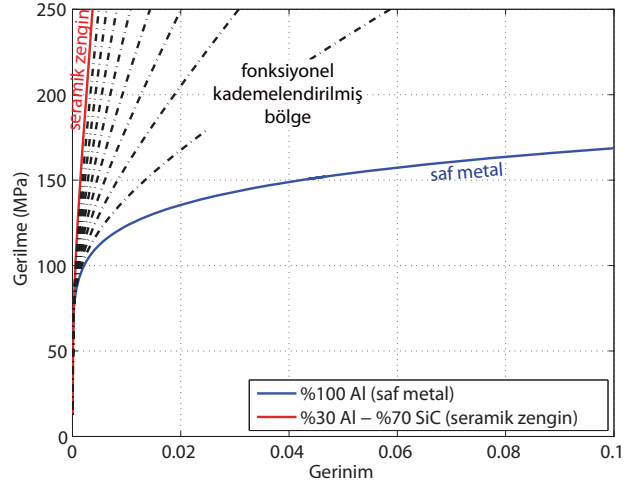
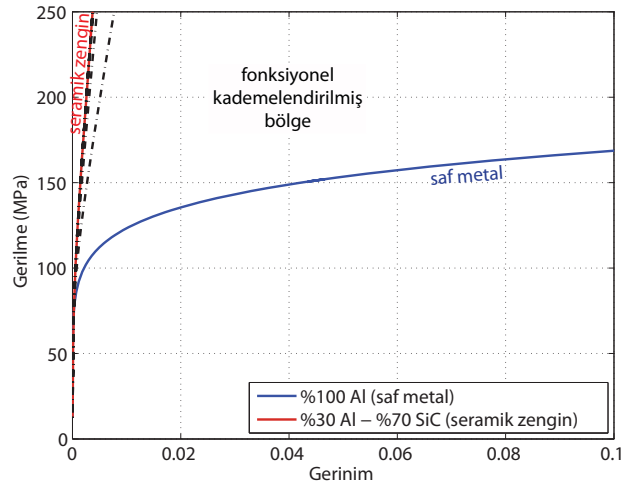
$$x_i(X_a, t) = D_i(t) \quad (2.23)$$

sınır ∂b_1 üzerinde çekme sınır şartlarını

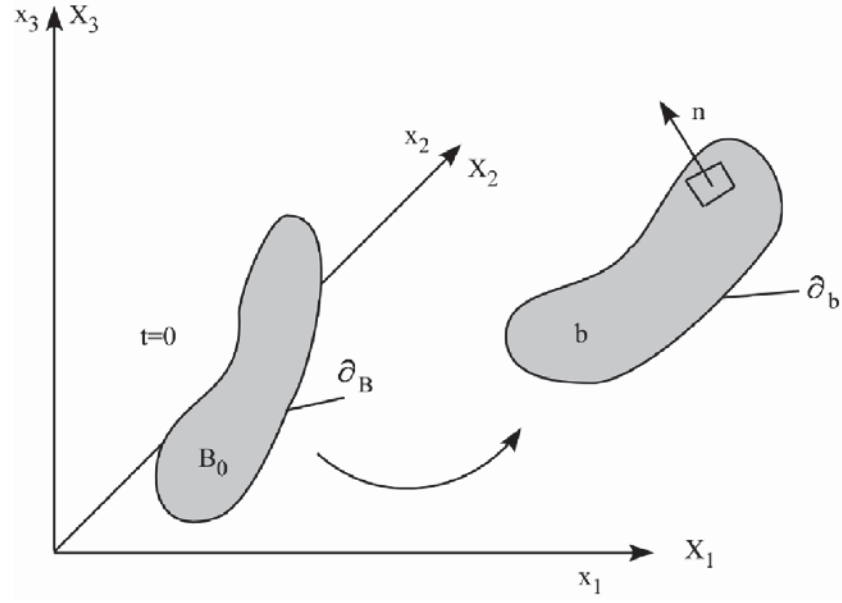
$$\sigma_{ij}n_j = t_i(t) \quad (2.24)$$

sağlayan aşağıdaki momentum denklemine bir çözüm bulmaktır.

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i \quad (2.25)$$

a) $n=0.1$ (metal zengin karışım)b) $n=1$ (lineer karışım)c) $n=10$ (seramik zengin karışım)

Şekil 2.4. Farklı kompozisyonlardaki plakaların TTO model ile üretilmiş gerilme-şekil değiştirme eğrileri.



Şekil 2.5. Notasyon [7].

Burada σ_{ij} Cauchy gerilmesini, ρ yoğunluğu, f cisim kuvvet yoğunluğunu, $\ddot{x}$ ivmeyi, virgül kovaryant diferansiyelini ve n_j sınır elemanı ∂b 'nin birim dış yönlü normalini temsil etmektedir. Kütle dönüşümü

$$\rho V = \rho_0 \quad (2.26)$$

şeklinde belirtilmiştir. Burada V bağıl hacimdir, diğer bir deyişle deformasyon gradyant matrisi F_{ij} 'nin determinantıdır;

$$F_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} \quad (2.27)$$

ρ_0 ise referans yoğunluğudur. Enerji denklemi

$$\dot{E} = V s_{ij} \dot{e}_{ij} - (p + q) \dot{V} \quad (2.28)$$

zamana göre integre edilir ve durum değerlendirme denklemleri ile genel enerji dengesi için kullanılır. Denklem 2.28'de s_{ij} ve p sırasıyla deviatorik gerilmeler ve basıncıdır.

$$s_{ij} = \sigma_{ij} + (p + q) \delta_{ij} \quad (2.29)$$

$$p = -\frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij} - q = \frac{1}{3} \sigma_{kk} - q \quad (2.30)$$

Eşitlik 2.30'da q bulk viskozitesi, δ_{ij} Kronecker delta ($i = j$ ise $\delta_{ij} = 1$ aksi halde $\delta_{ij} = 0$ 'dır) ve ε_{ij} şekil değiştirme tensörüdür.

Bu durumda,

$$\int_v (p\ddot{x}_i - \sigma_{ij,j} - pf)\delta x_i dv + \int_{\partial b_1} (\sigma_{ij}n_j - t_i)\delta x_i ds + \int_{\partial b_3} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-)n_j\delta x_i ds = 0 \quad (2.31)$$

eşitliği yazılabilir. Burada δx_i , ∂b_2 deki tüm sınır şartlarını sağlar. Denklem 2.31'e Diverjans teoremi uygulanırsa;

$$\int_v (\sigma_{ij}\delta x_i)_{,j} dv = \int_{\partial b_1} \sigma_{ij}n_j\delta x_i ds + \int_{\partial b_3} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-)n_j\delta x_i ds \quad (2.32)$$

elde edilir. Burada

$$(\sigma_{ij}\delta x_i)_{,j}\sigma_{ij,j}\delta x_i = \sigma_{ij}\delta x_{i,j} \quad (2.33)$$

denklemini bizi denge denklemlerinin zayıf formuna götürür, buradan;

$$\delta\pi = \int_v p\ddot{x}_i\delta x_i dv + \int_v \sigma_{ij}\delta x_i dv - \int_v pf_i\delta x_i dv - \int_{\partial b_1} t_i\delta x_i ds = 0 \quad (2.34)$$

elde edilir. Denklem 2.34 diğer bir deyişle sanal işin prensibini ifade eder.

Sonlu elemanlar ağı tatbik edildikten sonra, referans konfigürasyon üzerindeki düğüm noktalarının, zamana göre yer değiştirmesi

$$x_i(X_a, t) = x_i(X_a(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^k \phi_j(\xi, \eta, \zeta)x_i^j(t) \quad (2.35)$$

şeklindedir. Burada ϕ_j lokal koordinatlardaki (ξ, η, ζ) şekil fonksiyonları, k eleman üzerinde tanımlı düğüm noktalarının sayısı ve x_i^j i 'inci doğrultudaki j 'inci düğüm noktasının düğüm koordinatlarını temsil etmektedir.

Toplam n elemanlar üzerinden yapılan toplama ile $\delta\pi$ yaklaşık olarak;

$$\delta\pi = \sum_{m=1}^n \delta\pi_m = 0 \quad (2.36)$$

gibi belirlenebilir ve

$$\sum_{m=1}^n \left[\int_{v_m} p\ddot{x}_i\Phi_i^m dv + \int_{v_m} \sigma_{ij}^m p\Phi_{i,j}^m dv - \int_{v_m} pf_i\Phi_i^m dv - \int_{\partial b_1} t_i\Phi_i^m ds \right] = 0 \quad (2.37)$$

$$\Phi_i^m = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k)_i^m \quad (2.38)$$

yazılır. Matris notasyonu ile denklem 2.37;

$$\sum_{m=1}^n \left[\int_{v_m} p \mathbf{N}^t \mathbf{N} a dv + \int_{v_m} \mathbf{B}^t \sigma dv - \int_{v_m} p \mathbf{N}^t b dv - \int_{\partial b_1} \mathbf{N}^t t ds \right]^m = 0 \quad (2.39)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada $\mathbf{N}$ interpolasyon matrisi, $\mathbf{B}$ şekil değiştirme-yer değiştirme matrisi, a düğüm ivme vektörü, σ ise gerilme vektörüdür.

$$\sigma^t = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}) \quad (2.40)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} = \mathbf{N} \begin{bmatrix} a_{x_1} \\ a_{y_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{y_k} \\ a_{z_k} \end{bmatrix} = \mathbf{N} a \quad (2.41)$$

b cisim kuvvet vektörü ve t 'ler ise yüzeyde uygulanan çekme yükleridir.

$$b = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix}, t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

2.3.2. Üç Boyutlu Sekiz Düğüm Noktalı Katı Sonlu Eleman

8 düğüm noktalı 6 yüzlü katı bir eleman için denklem 2.35

$$x_i(X_a, t) = x_i(X_a(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^8 \phi_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t) \quad (2.43)$$

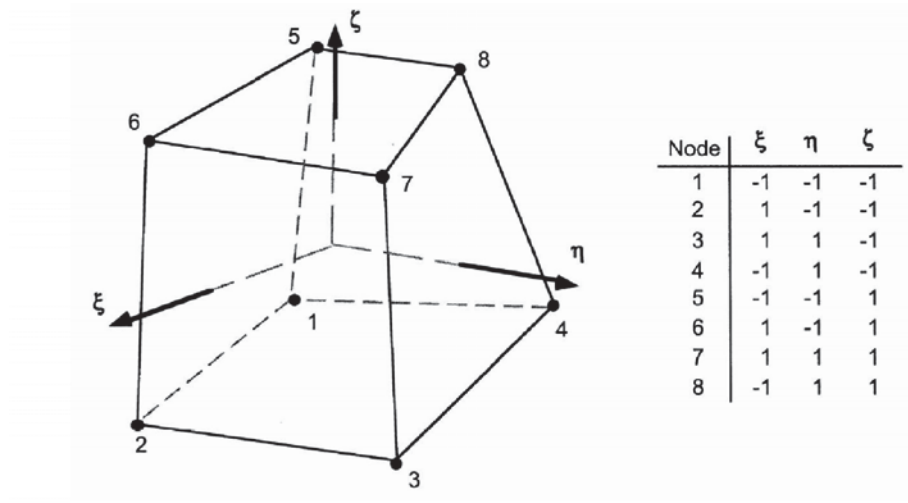
gibi olur. 8 düğüm noktalı 6 yüzlü katı eleman için şekil fonksiyonu ϕ_j

$$\phi_j = \frac{1}{8}(1 + \xi \xi_j)(1 + \eta \eta_j)(1 + \zeta \zeta_j) \quad (2.44)$$

şeklinde tanımlanır. Burada ξ_j, η_j ve ζ_j lokal koordinatlardır ve $(\pm 1, \pm 1, \pm 1)$ değerlerini alırlar, x_i^j ise i 'inci doğrultudaki j 'inci düğüm noktasının düğüm koordinatıdır (Şekil 2.6)

Katı eleman için $\mathbf{N}$, 3x24'lük interpolasyon matrisidir ve şu şekilde ifade edilir [7]

$$\mathbf{N}(\xi, \eta, \zeta) = \begin{bmatrix} \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & \cdot & \cdot & \cdot & \phi_8 & 0 \\ 0 & 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \phi_8 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$



Şekil 2.6. 8 düğüm noktalı altı yüzlü katı eleman [7].

σ gerilme vektörü

$$\sigma^t = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}) \quad (2.46)$$

B, 6x24'lük şekil değiştirme-yer değiştirme matrisi

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \mathbf{N} \quad (2.47)$$

Diagonal kütle matrisini elde etmek için satırlar toplanır ve aşağıdaki k 'inci diagonal terim elde edilir

$$m_{kk} = \int_v p \phi_k \sum_{i=1}^8 \phi_i dv = \int_v p \phi_k dv \quad (2.48)$$

Şekil değiştirme yer değiştirme matrisindeki terimler şu şekilde hesaplanır

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} &= \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi} + \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \eta} &= \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} &= \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{aligned} \quad (2.49)$$

Matris notasyonunda

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \eta}{\partial \phi_i} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial x} & \frac{\partial y}{\partial x} & \frac{\partial z}{\partial x} \\ \frac{\partial \eta}{\partial x} & \frac{\partial \eta}{\partial y} & \frac{\partial \eta}{\partial z} \\ \frac{\partial \zeta}{\partial x} & \frac{\partial \zeta}{\partial y} & \frac{\partial \zeta}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Jakobiyen matrisinin, J , tersi alınrsa istenilen terimler bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

2.3.3. Hacim İntegrasyonu

Hacim integrasyonu, Gauss yaklaşımı ile bulunur. Eğer $g(x, y, z)$ hacim üzerinden tarif edilen bir fonksiyon ve n ise integrasyon noktalarının sayısı ise, yerel koordinatlarda

$$\int_v g dv = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} g |J| d\xi d\eta d\zeta \quad (2.52)$$

yaklaşık olarak

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n g_{jkl} |J_{jkl}| w_j w_k w_l \quad (2.53)$$

bulunur. Burada w_j, w_k, w_l ağırlık faktörleridir, g_{jkl} aşağıdaki gibidir

$$g_{jkl} = g(\xi_j, \eta_k, \zeta_l) \quad (2.54)$$

ve $|J|$ ise Jacobian matrisinin determinantıdır. Bir noktalı Gauss yaklaşımı için;

$$\begin{aligned} n &= 1 \\ w_i &= w_j = w_k = 2 \\ \xi_l &= \eta_l = \zeta_l = 0 \end{aligned} \quad (2.55)$$

dir. Bu durumda

$$\int g dv = 8g(0, 0, 0) |J(0, 0, 0)| \quad (2.56)$$

ifadesi yazılabilir. $8|J(0, 0, 0)|$ yaklaşık olarak eleman hacmine eşittir. Bir noktada integrasyonun en büyük avantajı hesaplama zamanını önemli ölçüde azaltmasıdır.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_1}{\partial x_i} &= -\frac{\partial \phi_7}{\partial x_i} \frac{\partial \phi_3}{\partial x_i} = -\frac{\partial \phi_5}{\partial x_i} \\ \frac{\partial \phi_2}{\partial x_i} &= -\frac{\partial \phi_8}{\partial x_i} \frac{\partial \phi_4}{\partial x_i} = -\frac{\partial \phi_6}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (2.57)$$

Denklem 2.57'deki gerinme matrisinin $\xi = \eta = \zeta = 0$ 'daki bir anti-simetri özelliği, 8 noktalı integrasyon yöntemi için harcanacak emeği 25 kat azaltmasıdır. Bu tasarruf gerinme ve düğüm noktası kuvvet hesaplamalarında kendisini gösterir ve çarpanların sayısı 16 kat azalır. 8 nokta integrasyonun dezavantajı, Poisson oranının 0.5'e yaklaştığı plastisite problemleri ve diğer problemlerde kullanılan tam integre edilmiş elemanlar, sabit hacimli bükülme modlarında kilitli kalmasıdır. Kilitlenmeyi önlemek için elemanlar üzerinde ortalama bir basıncın kullanılması gerekir. Sonuç olarak, sıfır enerji modlarına, deviatorik gerilme tarafından direnç gösterilir. Eğer deviatorik gerilme belirsiz bir şekilde basınçla ilgili olursa veya daha kötüsü, malzeme buna neden olursa, hourglassing meydana gelir ve hiçbir direnç ortaya çıkmaz.

2.3.4. Plastik Kinematik Malzeme Modeli

İzotropik kinematik veya bunların bir kombinasyonu ile yapılan sertleştirme, β parametresini 0 ile 1 arasında değiştirerek elde edilebilir. Sırasıyla β 'nın 0'a ve 1'e eşit olduğu durumlarda, kinematik ve izotropik sertleştirme Şekil 2.7'de gösterildiği gibi elde edilir. Krieg and Key, bu modeli formüle etmişlerdir [39]. İzotropik sertleşmede, akma yüzeyi merkezi sabittir, fakat çap plastik şekil değiştirmenin fonksiyonudur. Kinematik sertleşmede, akma yüzeyi çapı sabittir, fakat merkez plastik şekil değiştirme ile birlikte yer değiştirir. Böylece akma şartı,

$$\phi = 0.5\xi_{ij}\xi_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} = 0 \quad (2.58)$$

olur. Burada

$$\xi_{ij} = s_{ij} - \alpha_{ij} \quad (2.59)$$

$$\sigma_y = \sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p \quad (2.60)$$

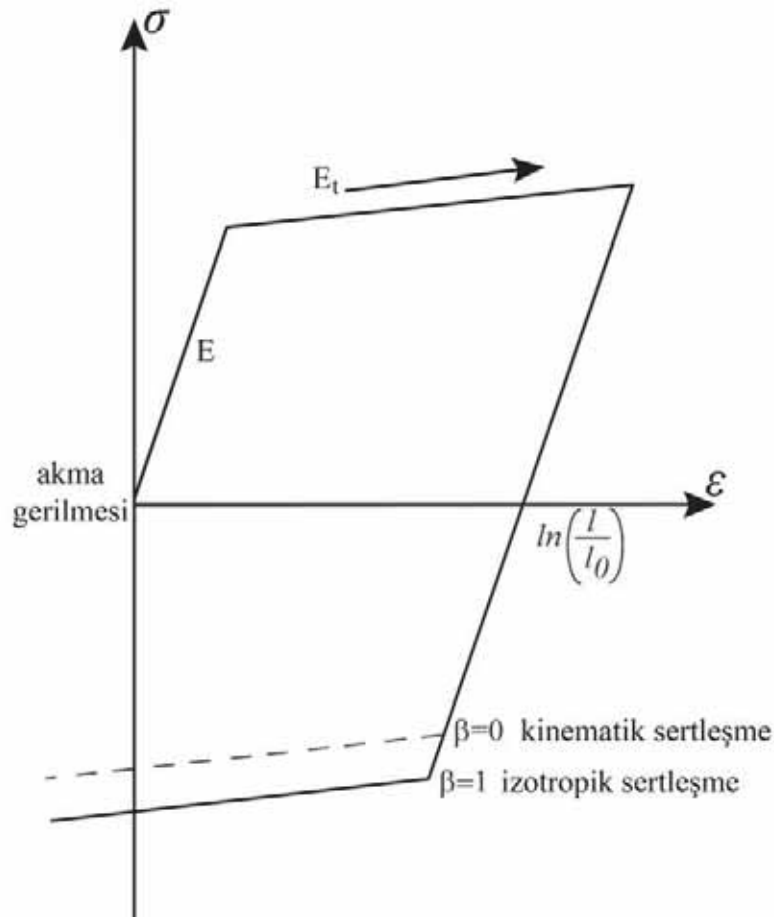
dir. α_{ij} 'nin korotasyonel oranı

$$\alpha_{ij}^\nabla = (1 - \beta) \frac{2}{3} E_p \dot{\varepsilon}_{ij} \quad (2.61)$$

böylece

$$\alpha_{ij}^{n+1} = \alpha_{ij}^n + \left(\alpha_{ij}^{\nabla n+0.5} + \alpha_{ij}^n \Omega_{kj}^{n+0.5} \alpha_{jk}^n \Omega_{ki}^{n+0.5} \right) \Delta t^{n+0.5} \quad (2.62)$$

olur. Deformasyon hızı, akma gerilmesi değerini ölçeklendiren gerinim hızına bağlı faktör ile Cowper-Symonds modeli kullanılarak hesaplanır. Gerinim hızına bağlı



Şekil 2.7. l_0 ve l sırasıyla deforme olmamış ve deforme olmuş tek eksenli çekme numunesi uzunluğu olmak üzere izotropik ve kinematik sertleşme durumunda elasto-plastik davranış [7].

akma gerilmesi aşağıdaki gibidir;

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p) \quad (2.63)$$

Burada p ve C , kullanıcı tarafından belirlenen girdi sabitleridir ve $\dot{\epsilon}$;

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} \quad (2.64)$$

ile ifade edilen gerinim hızıdır. Akma yüzeyinin, mevcut çapı σ_Y , başlangıç akma mukavemeti σ_0 , büyüme $\beta E_p \varepsilon_{eff}^p$ toplamıdır. Burada E_p plastik sertleşme modülü

$$E_p = \frac{E_t E}{E - E_t} \quad (2.65)$$

ve ε_{eff}^p efektif plastik gerinim

$$\varepsilon_{eff}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p \right)^{0.5} dt \quad (2.66)$$

dir. Plastik gerinim oranı, toplam ve elastik gerinim oranları farkıdır. Yada

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^e \quad (2.67)$$

dir. Bu malzeme modelinin uygulamasında, deviatorik gerilme elastik olarak yüklenir. Yani

$$\sigma_{ij}^* = \sigma_{ij}^n + C_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl} \quad (2.68)$$

şeklinde tekrarlanmıştır. Burada

σ_{ij}^* : gerilme tensörünü

σ_{ij}^n : önceki zaman adımından gerilme tensörünü

C_{ijkl} : elastik tanjant modülü matrisini

$\Delta \varepsilon_{kl}$: artan deformasyon tensörünü

temsil eder. Ayrıca, eğer akma fonksiyonu doğrulanırsa, hiçbir şey yapılmaz fakat akma fonksiyonu ihlal edilirse plastik gerinmede bir artım hesaplanır, gerilmeler geriye doğru akma yüzeyine ölçeklendirilir ve akma yüzey merkezi güncellenir. Varsayalım ki s_{ij}^* , $n + 1$ 'de elastik deviatorik gerilimi durumunu temsil etsin, şöyle ki;

$$s_{ij}^* = \sigma_{ij}^* - \frac{1}{3} \sigma_{kk}^* \quad \text{ve} \quad \xi_{ij}^* = s_{ij}^* - \alpha_{ij} \quad (2.69)$$

Akma fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlansın:

$$\phi = \frac{3}{2} \xi_{ij}^* \xi_{ij}^* - \sigma_y^2 = \Lambda^2 - \sigma_y^2 \begin{cases} \leq 0 & \text{elastik yükleme durumu} \\ \geq 0 & \text{plastik sertleşme durumu} \end{cases} \quad (2.70)$$

Böylece plastik sertleşme için;

$$\varepsilon_{eff}^{p^{n+1}} = \varepsilon_{eff}^{p^n} + \frac{\Lambda - \sigma_y}{3G - E_p} = \varepsilon_{eff}^{p^n} + \Delta \varepsilon_{eff}^p \quad (2.71)$$

denklemini;

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^* - \frac{3G \Delta \varepsilon_{eff}^p}{\Lambda} \xi_{ij}^* \quad (2.72)$$

gerilim deviatorlerini geriye doğru ölçeklendirir ve

$$\alpha_{ij}^{n+1} = \alpha_{ij}^n - \frac{(1 - \beta) E_p \Delta \varepsilon_{eff}^p}{\Lambda} \xi_{ij}^* \quad (2.73)$$

merkezini günceller.

2.3.5. Düzlem Gerilim Plastisitesi

Düzlem gerilim plastisitesi kiriş, kabuk ve kalın kabuklara uygulanır. Gerilim tensörünü güncellemek amacıyla, Jaumann oranının uygulaması, normal gerilmenin (σ_{33}) sıfır olmayacağı ihtimaline müsaade eder. Gerilme tensörünü güncellemek için ilk adım, artımlı gerinim elastik olduğunu varsayarak, deneme düzlemi gerilim güncellemesini hesaplamaktır. Yukarıda normal gerinim artımı, $\Delta\epsilon_{33}$, elastik gerinim artımı ile yer değiştirmiştir.

$$\Delta\epsilon_{33} = \frac{\sigma_{33} + \lambda(\Delta\epsilon_{11} + \Delta\epsilon_{22})}{\lambda + 2\mu} \quad (2.74)$$

Burada λ ve μ Lamé sabitleridir. Deneme gerilimi, akma yüzeyi içinde olduğu durumda, gerinim artımı elastiktir ve gerinim güncellemesi tamamlanmıştır. Diğer türlü, yani plastik düzlem gerilimi durumunda,

$$\sigma_{33}^i = \sigma_{33}^* - \frac{3G\Delta\epsilon_{eff}^{p^i}\xi_{33}}{\Lambda} \quad (2.75)$$

denkleminde belirtilen, sıfır normal gerilimi üretmesi gereken normal gerinim artımı ($\Delta\epsilon_{33}$) için çözülecek, denklemi (denklem 2.72) çözmek için sekant iterasyonu kullanılır. Burada üst indis i iterasyon numarasını belirtir.

$\Delta\epsilon_{33}$ için sekant iterasyon formülü;

$$\Delta\epsilon_{33}^{i+1} = \Delta\epsilon_{33}^{i-1} - \frac{\Delta\epsilon_{33}^i - \Delta\epsilon_{33}^{i-1}}{\sigma_{33}^i - \sigma_{33}^{i-1}} \sigma_{33}^{i-1} \quad (2.76)$$

şeklinde. Burada iki adet başlangıç değeri, başlangıç elastik tahmini ve

$$\Delta\epsilon_{33}^1 = -(\Delta\epsilon_{11} - \Delta\epsilon_{22}) \quad (2.77)$$

denklemindeki gibi tamamen plastik artım varsayımı ile elde edilir. Bu başlangıç değerleri, asıl normal gerinim artım değerlerini sınırlamalıdır. Bu iterasyon prosedürü, ilk deviatorik gerilimi güncellemek için güncellenmiş normal gerinim artımını kullanır. Daha sonra denklem 2.75'da yer alan normal gerilimin, sonraki tahminini hesaplamak için diğer büyüklükler gereklidir. İterasyonlar, normal gerilim σ_{33}^i yeterince küçük oluncaya kadar devam eder. Yakınsama kriteri, normal gerinimlerin yada

$$\frac{|\Delta\epsilon_{33}^i - \Delta\epsilon_{33}^{i-1}|}{|\Delta\epsilon_{33}^{i+1}|} < 10^{-4} \quad (2.78)$$

denkleminin yakınsamasını gerektirir. Yakınsamadan sonra 2.72 ve 2.73 denklemlerindeki verilen ilişki kullanılarak, gerinim güncellemesi tamamlanır [7].

2.4. Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakaların Üretimi

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin üretimi, genel olarak toz metalürjisi ile kademelendirilmiş yapının elde edilmesi ve daha sonra sinterlenmesi esasına dayanır. Literatürde, fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların üretim yöntemleri üzerine yapılmış birçok çalışma mevcut olup bu yöntemlerden bazıları şu şekilde özetlenebilir [2, 40–43].

Toz istifleme yöntemi; sinterleme kalıbı içerisinde katman kompozisyonunun değiştirilerek, kompakt yapının oluşturulması esasına dayanır. Levha katmanlama yönteminde, öncelikle farklı kompozisyonlarda ince levhalar kuru veya ıslak toz yöntemi ile üretilir, daha sonra kademelendirilmiş yapının oluşturulması amacıyla, bir araya getirilir. Islak toz püskürtme yönteminde, hava tabancası ile toz süspansiyonu katmanı oluşturması arzu edilen yüzeye püskürtülerek, katmanlı yapı oluşturulur. Daldırma yönteminde, kademeli yapı oluşturmak için farklı kompozisyona sahip daldırma havuzlarına, sırasıyla daldırma yapılır. Ani katılaştırma yönteminde, akışkanlık özelliği taşıyan toz bağlayıcı karışımı, iki boyutta hareket edebilen bir ekstrüzyon jeti ile birlikte, yüzeye ekstrüzyon edilerek katman oluşturulur ve aynı işlem, diğer katmanlar için farklı kompozisyonlarda tekrarlanır. Santrifüj yönteminde kademelendirilmiş yapının oluşturulması, toz süspansiyonun içerisindeki tozların santrifüj kuvvetleri etkisi ile konumlandırılması esasına dayanır. Lazer kaplama yönteminde, kademelendirilmiş yapıyı oluşturan her bir katman, yüzeye püskürtülür veya serilir, sonrasında, lazer nozul ile sinterleme işlemi yapılır. Tablo 2.1’de fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin üretim yöntemleri ve özellikleri genel olarak değerlendirilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında üretilen, farklı malzeme kompozisyonlarına sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar, toz istifleme sıcak presleme (powder stacking-hot pressing) tekniği kullanılarak Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kompozit Laboratuvarında üretilmiştir. Üç farklı kompozisyonda (metal

Tablo 2.1. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin üretim teknikleri [2].

Üretim tekniği	Geçiş fonksiyonu değişkenliği	Katman kalınlığı ^a	Faz içeriği değişkenlik kabiliyeti	Malzeme tipi	Komponent geometri değişkenliği
Toz istifleme	Çok iyi	M, L	Çok iyi	Yığın	Orta
Levha katmanlama	Çok iyi	T,M ^b	Çok iyi	Yığın	Orta
Islak toz püskürtme	Çok iyi	UT, T ^b	Çok iyi	Yığın ^c	Orta
Daldırma	Çok iyi	UT, T ^b	Çok iyi	Kaplama	İyi
Ani katılaştırma	Çok iyi	M, L	Çok iyi	Yığın	Çok iyi
Santrifüj	İyi	C	Çok iyi	Yığın	Zayıf
Döküm	Çok iyi	C	Çok iyi	Yığın ^c	İyi
Lazer kaplama	Çok iyi	M	Çok iyi	Yığın kaplama	Çok iyi
Isıl püskürtme	Çok iyi	T	Çok iyi	Yığın kaplama	İyi
Difüzyon	Orta	C	Çok iyi	Müşterek kaplama	İyi
Yönlendirilmiş katılaştırma	Orta	C	Orta	Yığın	Zayıf
Elektrokimyasal kademelendirme	Orta	C	İyi	Yığın ^c	İyi
Polimer köpüklendirme	Orta	C	İyi	Yığın	İyi
PVD*, CVD**	Çok iyi	C	Çok iyi	Kaplama	Orta
GMFC***	Çok iyi	M,L,C	Orta	Yığın	İyi

^a L:büyük ($> 1mm$), M:orta ($100 - 1000\mu m$), T:ince ($10 - 100\mu m$)

UT:çok ince ($< 10\mu m$), C:sürekli

^b Toz boyutuna bağlıdır.

^c Maksimum kalınlık ile sınırlıdır.

* PVD: Fiziksel buharlı depozisyon

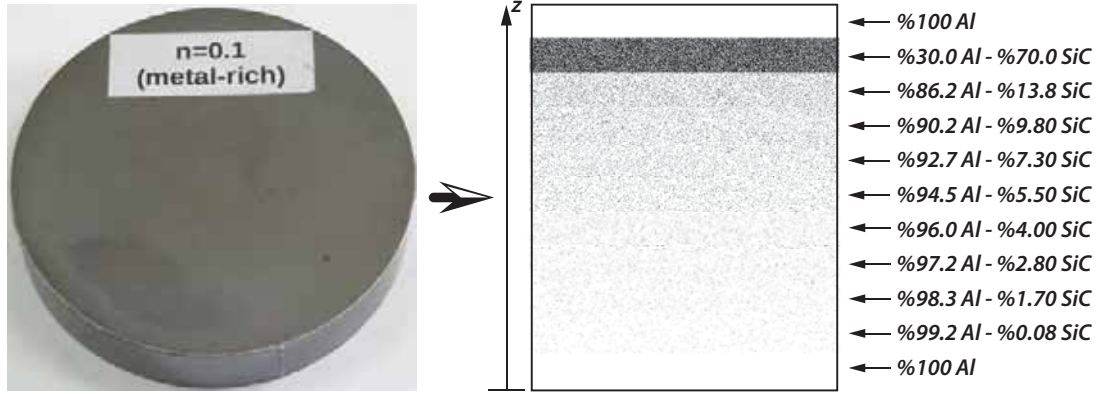
** CVD: Kimyasal buharlı depozisyon

*** GMFC: Köpük sıkıştırma ile kademelendirme

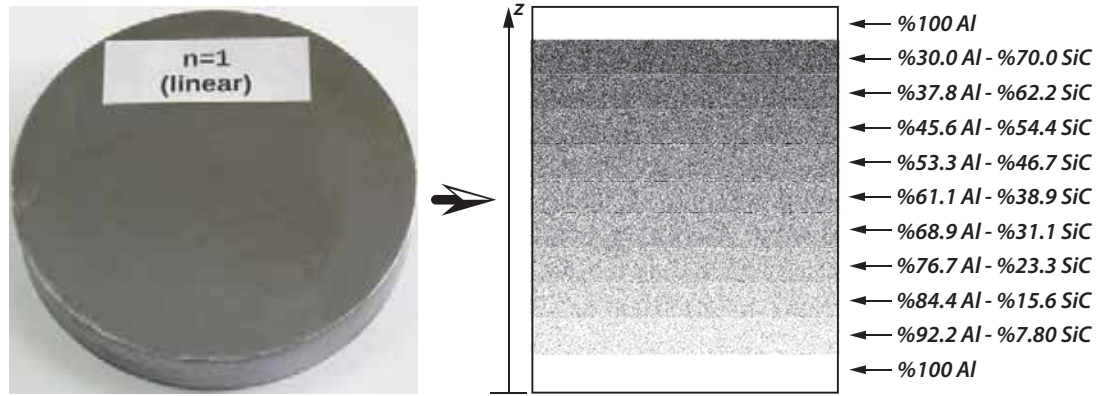
yoğun, lineer karışım ve seramik yoğun) üretilen plakaların, her bir katmanı için gerekli olan metal ve seramik miktarları, karışım teorisi kullanılarak, hesaplanmış olup, her bir plakaya ait hacimsel oranlar ve plaka kalınlığı boyunca bileşenlerin değişimini gösteren makro görüntüler sırasıyla Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da verilmiştir.

2.4.1. Plaka Üretiminde Kullanılan Tozlar

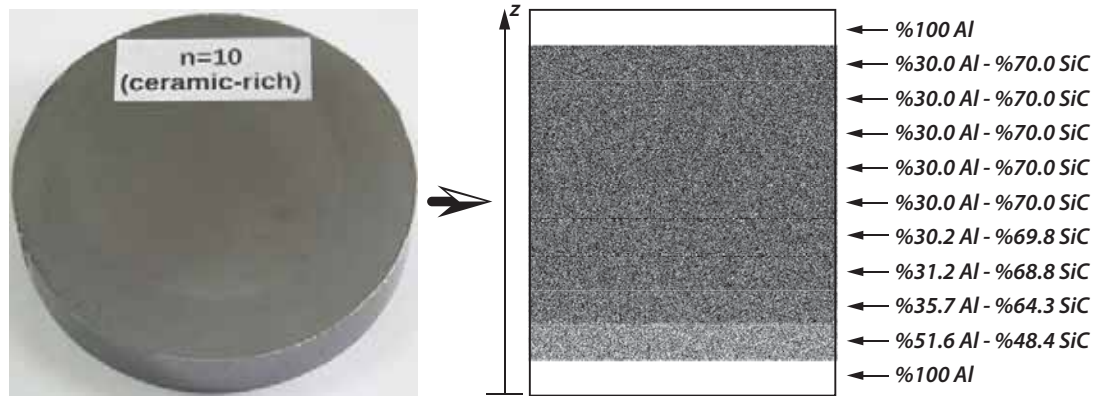
Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, genel olarak metal ve seramik bileşenlerden oluşur. Plakayı oluşturan bileşenlerin, plaka yatay ve dikey



$n=0.1$ (Metal zengin plaka)



$n=1$ (Lineer karışimli plaka)



$n=10$ (Seramik yoğun plaka)

Şekil 2.8. Farklı malzeme kompozisyonlarında ($n=0.1$, 1.0 , ve 10.0) üretilmiş Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar.

düzlemlerinde konumlandırılması ile iki ve üç boyutta fonksiyonel yapının elde edilmesi mümkün olabilir. Yapılan bu çalışmada, silindirik geometriye sahip plakalarda, plaka kalınlığı boyunca malzeme kompozisyonu değişmekte, yatay



Şekil 2.9. Farklı malzeme kompozisyonlarında ($n=0.1$, 1.0 , ve 10.0) üretilmiş Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalarda kalınlık boyunca bileşenlerin değişimi.

düzlemde kompozisyon aynı kalmaktadır. Üretilen plakalarda, mevcut sıcak sinterleme ünitesinin kapasitesi de dikkate alınarak metal bileşen olarak alüminyum ve seramik bileşen olarak silisyum karbür kullanılmıştır. Seramik bileşen olarak alüminyum oksit (Al_2O_3) kullanılabilirliği, fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların, düşük hızda darbe davranışlarının incelendiği çalışmalarla tecrübe edilmiştir [44, 45]. Bu çalışmalar kapsamında üretilen Al- Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş silindirik plakalarda, alüminyum oksit yoğun olduğu tabakalar arasında, delaminasyon oluşmuş ve silisyum karbüre kıyasla, alüminyum oksit alüminyum ile oluşturduğu bağ kuvvetlerinin iyi olmadığı görülmüştür.

Balistik sistemlerde yüksek sertlik ve dayanım gerekliliği sebebiyle, seramik malzemeler tercih sebebi olmuştur, fakat yüksek kırılabilirliğe sahip olmaları sebebiyle, seramik malzemeler bu amaç için tek başına kullanılmazlar. Bu sebeple seramikler, balistik uygulamalarda ön yüz malzemesi yada matris malzemesi olarak karşımıza çıkar. Balistik yük altında zırh sistemleri yapısında bulunan seramik katman, mermi enerjisinin sönmeler ve yüksek sertliğe sahip olması sebebiyle, mermi uçuşunu kalınlaştırarak merminin nüfuziyet kabiliyetini önemli ölçüde düşürür. Alüminyum oksit, bor karbür, silisyum karbür ve titanyum diborür, balistik sistemlerde kullanılan önemli seramik malzemeler arasında yer alırlar. Bu seramiklerden hafiflik ve yüksek dayanım arandığı durumlarda bor karbür, yüksek ısıl dayanım arandığı durumlarda ise titanyum diborür ön plana çıkmaktadır. Tablo 2.2’de yukarıda bahsi geçen seramiklere ait özellikler verilmiştir.

Tablo 2.2. Zirh yapımında kullanılan seramik malzeme özellikleri [3].

Seramik Malzeme	Yoğunluk (kg/m^3)	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik (VH)	Ergime Noktası ($^{\circ}C$)
Silisyum Karbür (SiC)	3200	390	2600	2100
Alüminyum Oksit (Al_2O_3)	3900	350	2000	1800
Bor Karbür (B_4C)	2500	450	3700	2450
Titanyum Diborür (TiB_2)	4500	575	2600	2980

2.4.1.1. Alüminyum (Al)

Tez kapsamında üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda, metal bileşen olarak, kimyasal bileşimi Tablo 2.3’de verilen, ortalama toz boyutu 10 mikron olan

alüminyum 6061 tozu tercih edilmiştir. Temel alaşım elementleri magnezyum ve silisyum olan alüminyum 6061, yüksek korozyon dayanımı, iyi kaynak edilebilirlik ve yüksek sertlik özelliklerine sahip olması sebebiyle savunma sanayi, uçak sanayi, gemi inşa sektörü, uzay uygulamaları, helikopter pervane kaplaması gibi kullanım alanlarına sahiptir.

Tablo 2.3. Al6061 Kimyasal Bileşimi.

Alaşım	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Cr	% Zn	% Ti
Al6061	0.40-0.8	0.7	0.15-0.4	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25	0.15

2.4.1.2. Silisyum Karbür (SiC)

Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların üretiminde seramik bileşen olarak, ortalama toz boyutu 50 mikron (-325 mesh) olan silisyum karbür tozu tercih edilmiştir. SiC toz boyutu, üretimler için önemli bir parametredir. Yapılan ön üretim çalışmalarında, alüminyum toz boyutu sabit tutularak, 2 mikron, 50 mikron ve 150 mikron silisyum karbür tozları kullanılarak üretilen plakalarda, 2 mikron ve 150 mikron toz boyutları için seramik bileşenin yoğun olduğu tabakaların birbirine bağlanmadığı ve ara yüzeyden ayrıldığı gözlenmiştir.

2.4.2. Toz Karıştırma Ünitesi

Toz istifleme sıcak presleme yöntemi ile üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş plaka, katman katman oluşturulmakta ve her bir katman, farklı oranlarda metal ve seramik içermektedir. Plaka kalınlığı boyunca, malzeme özelliklerindeki ani değişimler, katmanlar arasında ayrılmalara yol açacağından, metal bileşenden seramik bileşene geçişte mümkün olduğunca fazla katman kullanılmalı ve her bir katman karışımlarının homojen olması sağlanmalıdır. Bu bilgiler paralelinde, sinterlenme işlemi öncesi, her bir katmanın ihtiva ettiği Al ve SiC miktarları, karıştırma kaplarına konularak, seramik ve metal tozların homojen olarak karışabilmeleri için Şekil 2.10'da gösterilen Tubular marka karıştırıcı ile 5 saat süreyle karıştırılmıştır.



Şekil 2.10. Toz karıştırma ünitesi.

2.4.3. Üretim Kalıpları

Tozların soğuk olarak istiflenmesi ve basınç altında sinterlenme işlemlerinde kullanılmak üzere, Şekil 2.11’de gösterilen üretim kalıpları, sıcak iş çeliğinden (AISI2344) ürettirilmiş ve ısıtım işlemiyle sertleştirilmiştir. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların üretiminde karşılaşılan en önemli problemlerden biri, üretim sonrası plakaların kalıptan çıkarılma işlemidir. Sinterleme sıcaklığında ergiyen alüminyumun, kalıba yapışmasını önlemek amacıyla plaka ile kalıp arasına grafit püskürtülmüş ve kalıp ile plakanın rahat bir şekilde ayrılması için üretim kalıpları iki parça olarak tasarlanmıştır.

2.4.4. Plaka Sinterleme Ünitesi

90 mm çapındaki kalıp içerisinde, düşük basınç altında soğuk presleme ile belirli hacimsel oranlardaki toz karışımlarından, katman katman hazırlanan numuneler, Şekil 2.12’de gösterilen fırın içerisine yerleştirilerek, 600°C sıcaklığa yaklaşık olarak 90 dakika, düşük basınç altında preslenmiştir. Sinterleme işlemi sonrası, kalıp içinde kontrollü olarak basınç altında soğutulan numuneler, kalıp içerisinden çıkarılarak,



Şekil 2.11. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka üretimi için sıcak iş çeliğinden (AISI2344) imal edilmiş kalıplar.

balistik testlerde çarpma yüzeyinin karıştırılmaması amacıyla, çarpma yüzeyi (seramik tabakanın yakın olduğu yüzey) boyanmıştır.

2.5. Balistik Test Sistemi

Üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların, balistik performansının belirlenmesi amacıyla, Kayseri II. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı tesislerinde bulunan, balistik test atölyesinde (Şekil 2.13), farklı mermi tipi ve farklı hızlarda atışlar yapılmıştır. Balistik testlerde hedef plaka ve namlu arasındaki standart test mesafeleri dikkate alınarak, 9 mm mermi için 5 m, 7.62 mm mermi atışlarında ise 15 m mesafeden atışlar yapılmıştır.

2.5.1. Lançer

Balistik testlerde kullanılan lançer; namlusu değişebilen ve farklı tipte mermilerin atışlarını yapma kabiliyetine sahip, barutlu bir silah sistemidir (Şekil 2.14). Uzaktan elektrikli ateşleme mekanizmasına sahip silah sistemi ile yapılan testlerde, 9 mm

atışlar için kısa tip namlu, 7.62 mm mermiler için uzun tip namlu kullanılmıştır.

2.5.2. Mermi Hızı Ölçüm Cihazı

Mermi hızlarının ölçümü için Şekil 2.15’de görülen Oehler Research Model 55 optik hız ölçme sistemi kullanılmıştır. Patlamalı tip silah sistemlerinde, aynı tip mermi için her atışı aynı hızda yapabilmek mümkün olmamaktadır. Yapılan testlerde, 9 mm mermi hızı ortalama 360 m/s ve 7.62 mm mermi hızı ise 860 m/s olarak ölçülmüştür.

2.5.3. Hedef Plakaları Sabitleme Yöntemi

Dairesel kesitli sandviç plakalar Şekil 2.16’de gösterilen sabitleme plakaları ürettirilerek 13cm kalınlığında macun bloğun üzerine sıkıştırma halatları kullanılarak sabitlenmiştir. Macun blok insan vücudunu benzetim açısından en uygun malzeme olmasının yanında plakaların arka kısmında oluşacak çökme miktarının ölçülmesine



Şekil 2.12. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka üretimi için kullanılan sıcak pres ünitesi.



Şekil 2.13. Balistik test sistemi.

de olarak verecektir. Plakaların delinmesi halinde ise derinlik ölçümü yapılarak plakadan çıkan merminin enerjisi hakkında yorum yapılabilecektir.

2.5.4. Balistik Testlerde Kullanılan Mermiler

Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların balistik performansının belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmalarda MKEK (Makina Kimya Endüstrisi Kurumu) yapımı pirinç (CuZn36) ceket ve kurşun-antimon (%2 Antimon) çekirdekten oluşan 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi ve 7.62 mm x 51 (M80) olmak üzere iki tip mermi kullanılmıştır. Şekil 2.17’de ceket, çekirdek ve kesit



a) 9 mm namlu takılmış lançer



b) 7.62 mm namlu takılmış lançer

Şekil 2.14. Balistik atışların kullanılan silah sistemi.

resimleri verilen 9 mm x 19 ve 7.62 mm x 51 mermilere ait teknik özellikler Tablo 2.4 ve Tablo 2.5’de verilmiştir.

Tablo 2.4. 9 mm x 19 Parabellum Tabanca Fişegi Teknik Özellikler.

Mermi Tipi	FMJ, Mermi Yüksüğü (CuZn36) Mermi Çekirdeği (Kurşun Antimon alaşımı)
Fişek Boyu	29.69 mm
Fişek Ağırlığı	12.15 g
Mermi Ağırlığı	8 ± 0.075 g
Hız	370 ± 10 m/s



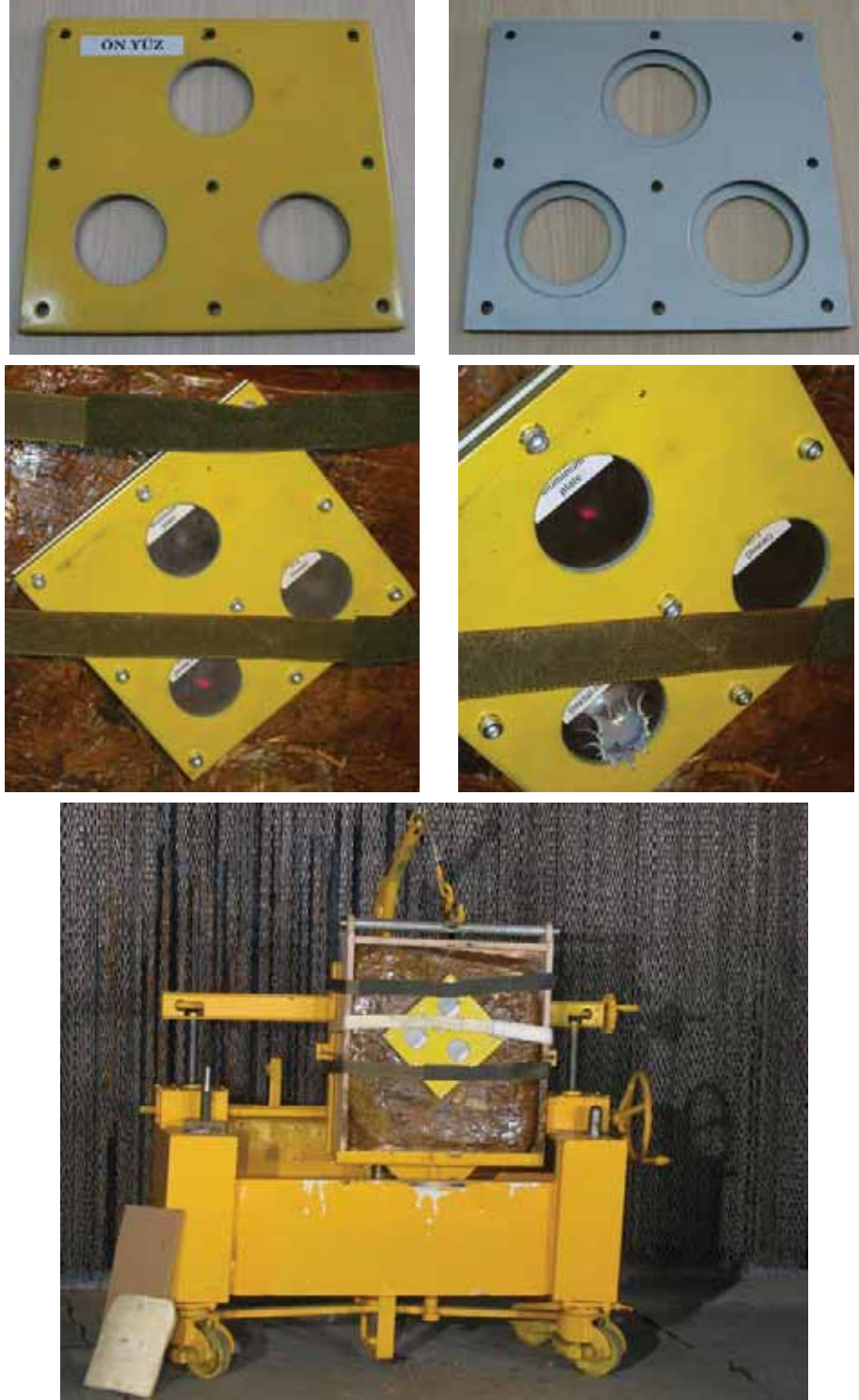
Şekil 2.15. Hız ölçüm sistemi.

Tablo 2.5. 7.62 mm x 51 (M80) Normal Fişek Teknik Özellikler.

Mermi Tipi	FMJ, Mermi Yüksüğü (CuZn28 veya CuZn30) Mermi Çekirdeği (Kurşun Antimon alaşımı)
Fişek Boyu	71.12 mm
Fişek Ağırlığı	24.5 g
Mermi Ağırlığı	9.5 g
Hız	838 ± 9.1 m/s

2.6. Balistik Testlerde Kullanılan Standartlar

Malzemelerin balistik performansının belirlenmesinde çeşitli standartlar mevcuttur. Bu standartların amacı, yüksek yoğunluklu aşındırıcı mermilere karşı geliştirilmiş zırh malzemelerinin sınıflandırılması ve balistik performans değerlendirmesinin geliştirilmesinde ihtiyaç duyulan test ekipmanı, prosedürler, hedefler ve terminoloji için bir genel metodoloji sağlamaktır. Önemli standartlardan sayılabilecek, MIL-PRF-46103E (United States Military Standard); hafif kompozit zırhların performans ve şartnamesi, STANAG 4569 (Standardization Agreement); lojistik ve hafif zırhlı araçlardaki personel için koruma seviyeleri, NIJ 0101.03; kurşun geçirmez yelek kompozit zırhların testleri ve MIL-STD-662; zırhlar için V_{50} balistik



Şekil 2.16. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların hedef noktasına sabitlenmesi.

testi ile ilgilidir. Tablo 2.6 ve Tablo 2.7’de sırasıyla NIJ ve STANAG standartlarında balistik koruma seviyeleri verilmiştir. Bu tez çalışmasında fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların yapılan atışlarda 1. sınıf tehditler



Şekil 2.17. Balistik testlerde kullanılan mermilere ait ceket ve kurşun resimleri.

ele alınmıştır.

Tablo 2.6. Balistik koruma seviyeleri (NIJ 0101.03) [4].

Seviye	Mermi Tipi	Mermi Hızı (m/s)	Mermi Ağırlığı (g)
I	38 Special RN Lead	259	10.2
	22 LRHV Lead	320	2.6
II-A	357 Magnum JSP	381	10.2
	9 mm FMJ	332	8.0
II	357 Magnum JSP	425	10.2
	9 mm FMJ	358	8.0
III-A	44 Magnum	426	15.55
	9 mm FMJ	426	8.0
III	7.62 mm FMJ	838	9.7
IV	30-06 AP	868	10.8

Zırh sistemlerinin balistik performansı belirlenirken kuşkusuz en önemli göstergelerden biriside balistik limitin belirlenmesidir. Balistik limit belirli bir merminin belirli bir geliş açısında verilen kalınlık ve fiziksel özellikli zırha tamamen

ve uygun bir şekilde nüfuz edemediği en büyük hız olarak tanımlanabilir. Ayrıca zırh malzemesinin nüfuziyet ihtimalinin yüzde 50 olduğu hız olarak kabul edilen V_{50} değeride balistik limit açısından diğer önemli bir parametredir. MIL-STD-662F standardı (V_{50} ballistic limit for armour) zırhlar için bu limitin nasıl belirleneceğini açıklamaktadır.

Tablo 2.7. Balistik koruma seviyeleri (STANAG-4569) [5].

Seviye	Mermi Tipi	Mermi Hızı (m/s)	Tehdit Tipi	Mesafe
5	25 mm x 137 APDS-T, PMB 073	1258	Otomatik Cannon APDS mühimmatı	500 m
4	14.5 mm x 114 API/B32	911	Ağır makineli tüfek AP mühimmatı	200 m
3	7.62 mm x 51 AP	930	Tüfek: AP tungsten karbür çekirdek	30 m
3	7.62 mm x 54R B32 API	854	Tüfek: AP tungsten karbür çekirdek	30 m
2	7.62 mm x 39 API BZ	695	Tüfek: zırh delici çelik çekirdek	30 m
1	7.62 mm x 51 NATO	833	Tüfek: Piring kaplamalı kurşun çekirdek	30 m
1	5.56 mm x 45 NATO	900	Tüfek: Piring kaplamalı kurşun çekirdek	30 m
1	5.56 mm x 45 M193	937	Tüfek: Piring kaplamalı kurşun çekirdek	30 m

3. BÖLÜM

FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ SANDVIÇ PLAKALARIN BALİSTİK DARBE DAVRANIŞLARI

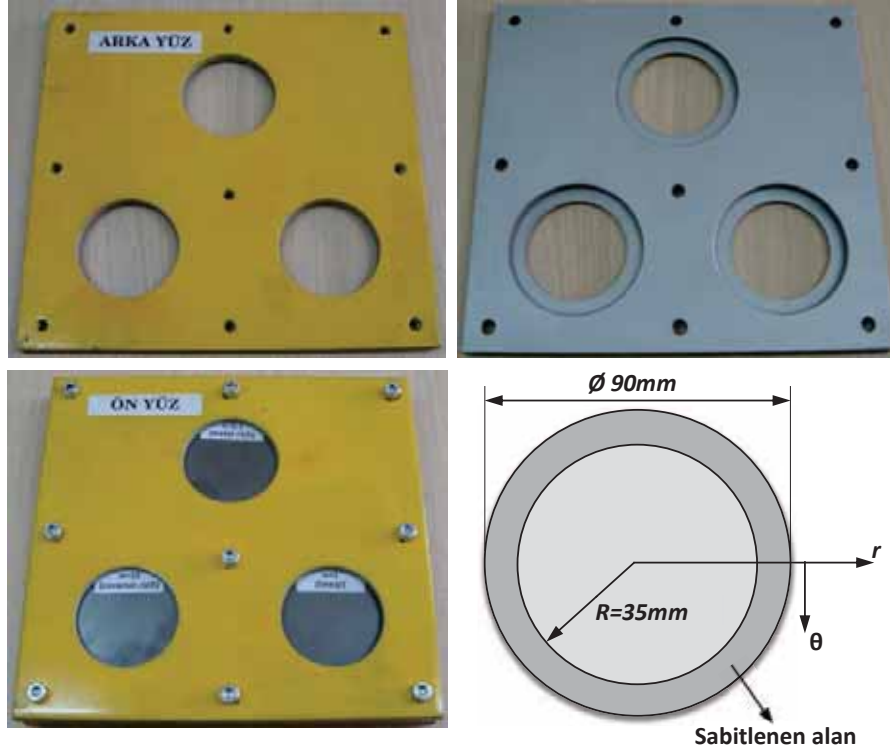
3.1. Giriş

Teorik ve deneysel olmak üzere iki bölümden oluşan bu çalışmanın teorik kısmında, alüminyum ve farklı malzeme kompozisyonlarına sahip (metal zengin, lineer karışım ve seramik zengin) fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların balistik çarpma yükleri altındaki davranışları, LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Bilindiği gibi, sonlu elemanlar metodu çözümü zor ve karmaşık olan problemlere yaklaşık bir çözüm sunabilmektedir. Bu bölümde fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların sonlu elemanlar modeli geliştirilerek, lineer olmayan davranışları dikkate alınarak gerilme ve deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir.

3.2. Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Modellenmesi

Mesnet dış çapı 90 mm ve mesnet iç çapı 70 mm olan dairesel plakalar Şekil 3.1'de gösterilen bölgeden ankastre olarak mesnetlenerek merkezi çarpma yüküne maruz bırakılmıştır. Gerçekleştirilen analizlerde mermi, mekanik özellikleri Tablo 3.1'de verilen pirinç ceket ve kurşun çekirdekten oluşmakta olup fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka ise kompozisyonu kalınlık boyunca değişen seramik (Silisyum Karbür-SiC) ve metal bileşenlerden (Alüminyum-Al) oluştuğu kabul edilmiştir. Seramik ve metal katmanlar arasında kalan fonksiyonel kademelendirilmiş bölgenin mekanik özelliklerinin plaka kalınlığı boyunca sürekli olarak bileşenlerin hacimsel oranlarındaki değişime bağlı olarak bir kuvvet kanununa göre değiştiği

varsayılmıştır. Plakayı oluşturan metal-seramik malzemelere ait mekanik özellikler ise Tablo 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların sabitlenmesi.

Tablo 3.1. Mermi bileşenlerin mekanik özellikleri.

Özellikler	Bileşenler	
	Pirinç (CuZn36)	Kurşun (Pb)
Elastiklik Modülü, (GPa)	110	19
Akma Gerilmesi, (MPa)	415	8
Poisson Oranı(ν)	0.31	0.4
Yoğunluk (ρ , kg/m^3)	8400	11340

Tablo 3.2. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakayı oluşturan bileşenlerin mekanik özellikleri.

Özellikler	Bileşenler	
	Alüminyum (Al)	Silisyum Karbür (SiC)
Elastiklik Modülü, (GPa)	67	302
Akma Gerilmesi, (MPa)	93	
Poisson Oranı(ν)	0.33	0.17
Yoğunluk (ρ , kg/m^3)	2702	3100

Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakanın balistik analizleri, açık dinamik analiz yapabilen LS-DYNA FEA yazılımı ile yapılmıştır [7]. Her bir analiz 8

işlemcili, 1.6 GHz CPU hızına sahip ve 16 GB RAM kapasiteli iş istasyonunda yaklaşık olarak 11 saatte tamamlanmıştır. Analizlerde 9 mm x 19 Parabellum ve 7.62 mm x 51 (M80) normal fişek olmak üzere farklı iki mermi tipi kullanılmıştır. Her iki mermi, pirinç ceket ve kurşun çekirdeğe sahip olmakla birlikte farklı geometri ve hızlara sahiptirler. Sonlu elemanlar modeli Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de gösterilen plaka ve mermiler 8 düğüm noktalı, her bir düğümde 9 serbestlik dereceli SOLID eleman ile modellenmiş ve "constant stress solid element" formülasyonu kullanılmıştır.

Plaka, kalınlığı boyunca 11 katman olarak modellenmiş olup, mermi ile fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka arasında sürtünmenin olmadığı, fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakanın sönmüleme etkisinin ihmal edildiği, çarpma boyunca yerçekimi ivmesinin olmadığı, katman ara yüzey bağlarının mükemmel olduğu, her bir katmanın kendi içerisinde homojen olduğu kabulleri yapılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Çarpma analizlerinde temas modelinin oluşturulması oldukça kritik bir adımdır. Sayısal analizlerde mermi ile fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka arasında, düğüm noktalarının temas ettiği yüzeye, temasla birlikte penetre olduğu durumlarda kullanılan CONTACT_ERODING_NODE_TO_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Bu temas tipi genellikle iki yüzey arasında meydana gelen genel temaslarda ve yüzeylerden biri ya da her ikinde de hasar oluşması durumlarında kullanılır. Bu temas tipi, temasın yüzey altındaki elemanlar üzerinde de etkili olmasına izin verildiği katı elamanlara penetrasyon problemlerinde ve diğer yüzey hasarına uğrayan problemlerde kullanılır. Ceket ile çekirdek arasında ise bir cismin yüzeyinin diğer cismin yüzeyine penetre olduğu problemlerde kullanılan CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE temas algoritması tanımlanmıştır. Bu temas tipi, çoğunlukla rastgele bir şekle ve nispeten büyük temas alanına sahip cisimler için kullanılır. Ayrıca mermi ve plakaya ait elemanlarda oluşacak bozulmaları engellemek için Flanagan-Belytschko rijitlik formunu [46] esas alan 5. tip HOURGLASS tanımlanmıştır.

Analizlerde 9 mm ve 7.62 mm mermiler sırasıyla sabit 360 m/s ve 860 m/s'lik hızlarda alüminyum, $n = 0.1, 1.0, ve 10.0$ ile tariflenen metal zengin yapıdan

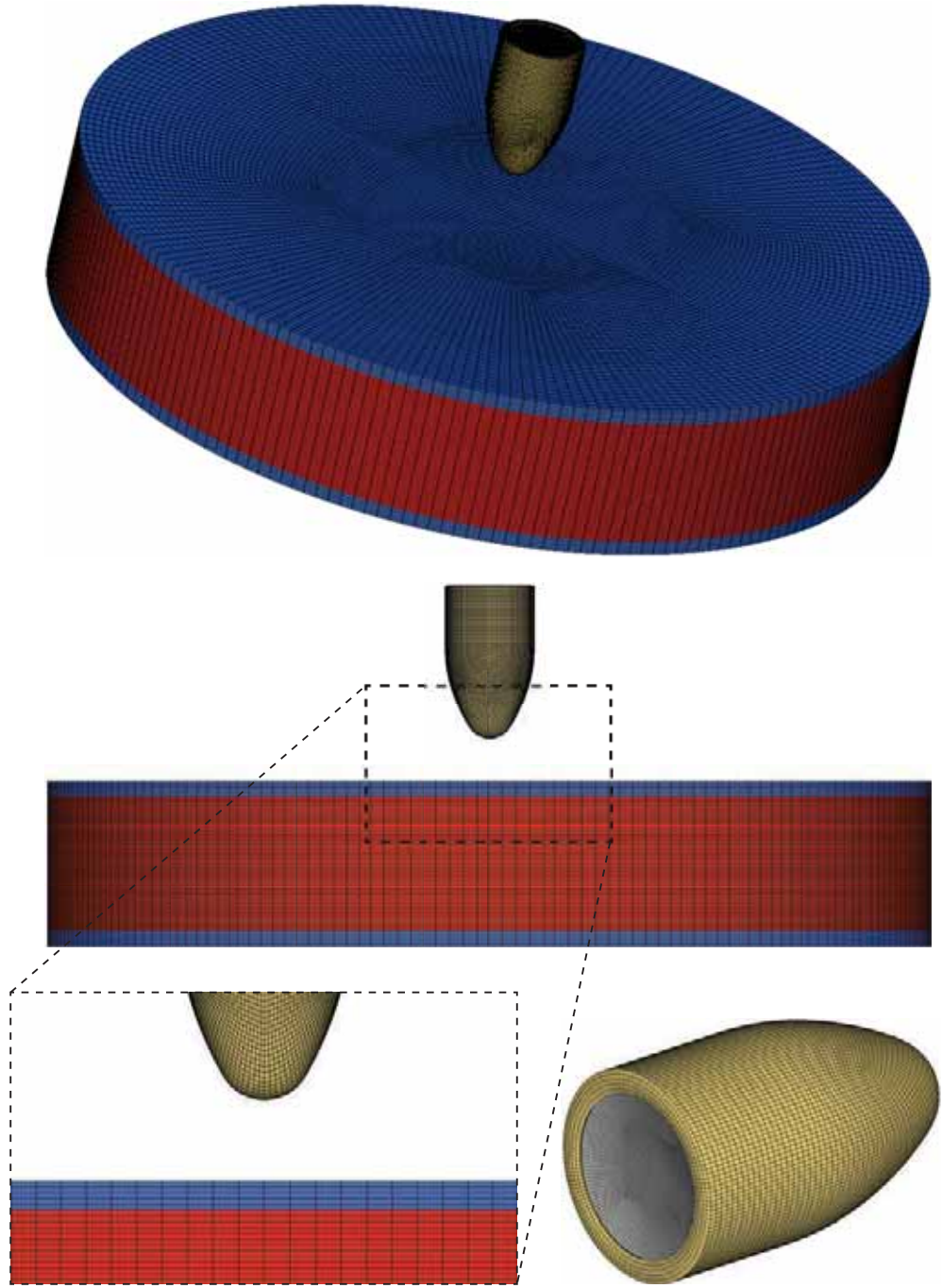
seramik zengin yapıya değişen malzeme kompozisyonlarına sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların üzerine çarptırılmıştır. Plakalar %70 silisyum karbür, %30 alüminyum karışıma sahip katman atış çarpma yüzeyine yakın olacak şekilde modellenmiştir. Söz konusu mermi hızları deneysel testlerden elde edilen yaklaşık olarak namlu çıkış hız değerleri olup aynı tip numune için yapılan tekrarlı atışlar sonucu ölçülen hızların aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Gerçekte merminin plakaya çarpmadan hemen önceki hızı, bu değerlerden hava direnci sebebiyle daha düşük olacaktır. Merminin plakaya çarpmadan önceki hız değeri, deneysel olarak ölçülemediği için bahsi geçen bu fark sayısal analizlerde ihmal edilmiştir.

3.3. Malzeme Modeli

Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların mikro yapısını esas alarak oluşturulan sayısal modelde malzeme modelinin sonuçlar üzerinde etkisi oldukça önemlidir. Mevcut sonlu elemanlar paket programları fonksiyonel kademelendirilmiş yapılar için geliştirilmiş bir malzeme modeline sahip değildir. Önceki bölümde izah edildiği üzere 11 katmandan oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada her bir katmanın farklı oranlarda alüminyum ve silisyum karbür içermesi sebebiyle plaka kalınlığı boyunca mekanik özellikler de değişmektedir.

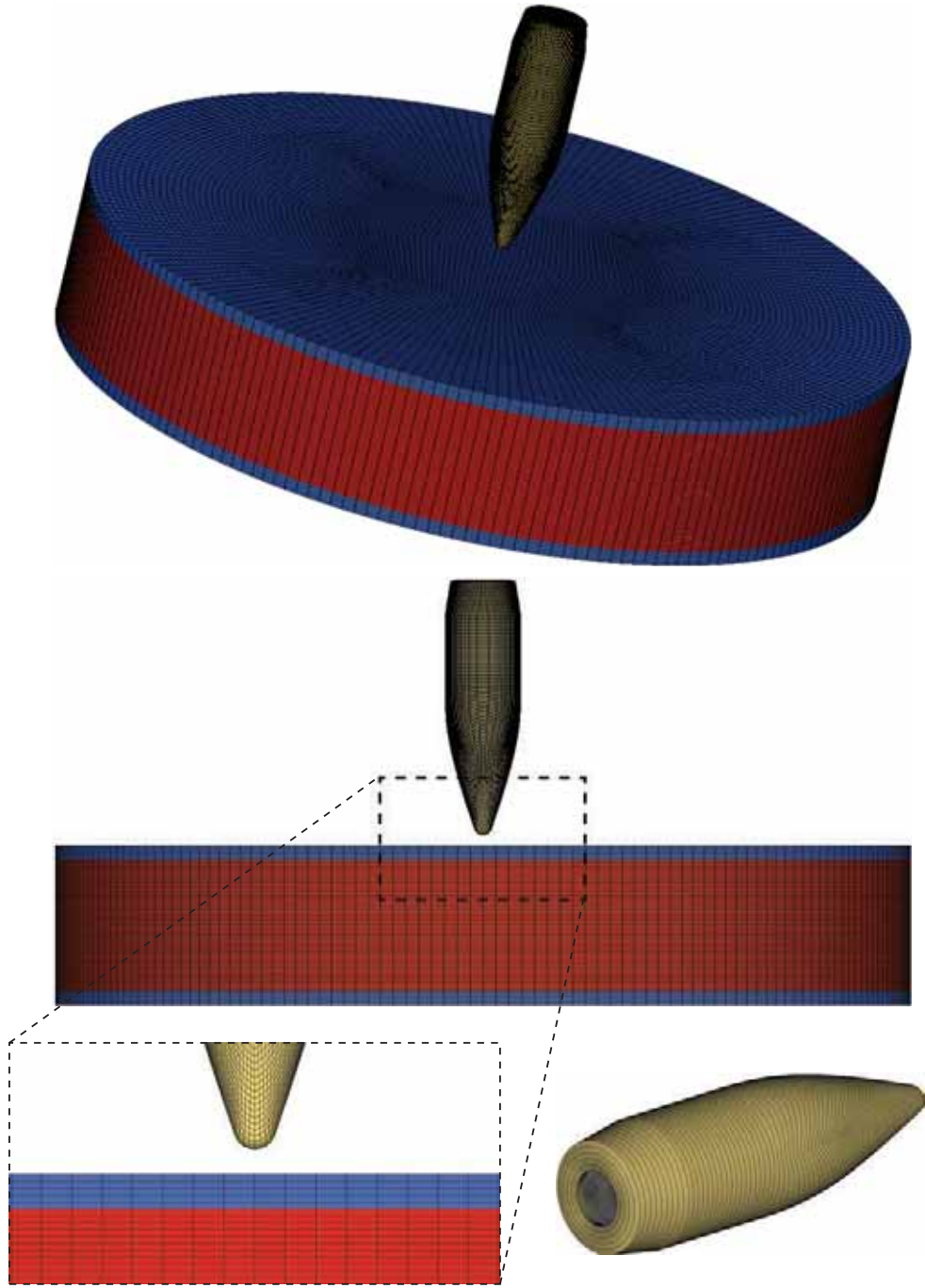
Sayısal modelin oluşturulmasında plaka kalınlığı boyunca değişen mekanik özelliklerin ve katmanlar arası bağ kuvvetlerinin tespit edilmesi modelin başarısı açısından önemlidir. Malzemeler statik ve dinamik yükleme altında farklı davranırlar. Deformasyon hızının artması ile malzemeler pekleşerek (strain rate hardening) daha gevrek davranış gösterirler. Bir malzemeye, iki farklı hızda çekme testi uygulandığında daha hızlı çekilen numunenin gerilme şekil değiştirme eğrisinin daha yukarıda olması, bu davranışın bir sonucudur. Literatürde malzemelerin mekanik davranışları üzerinde gerinim hızının etkisinin incelendiği bir çok çalışma bulmak mümkündür [47].

Bu çalışma açısından fonksiyonel kademelendirilmiş plakayı oluşturan her bir katmanın sahip olduğu karışım oranları dikkate alınarak üretilcek numunelerin



Şekil 3.2. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka ve 9 mm x 19 parabellum tabanca fişeginin sonlu elemanlar modeli.

Split Hopkinson bar testi ile yüksek gerinim değerlerinde gerilme şekil değiştirme eğrilerinin elde edilmesi en etkin yöntem olacaktır. Gerinim hızı (strain rate) bir malzemenin şeklinin ne kadar hızlı değişebildiğini ifade eder. Balistik testlerde deformasyon süresi 15 ns seviyelerinde olması sebebiyle plakada oluşacak deformasyonun benzetimi için söz konusu hızlardaki malzeme davranışının dikkate



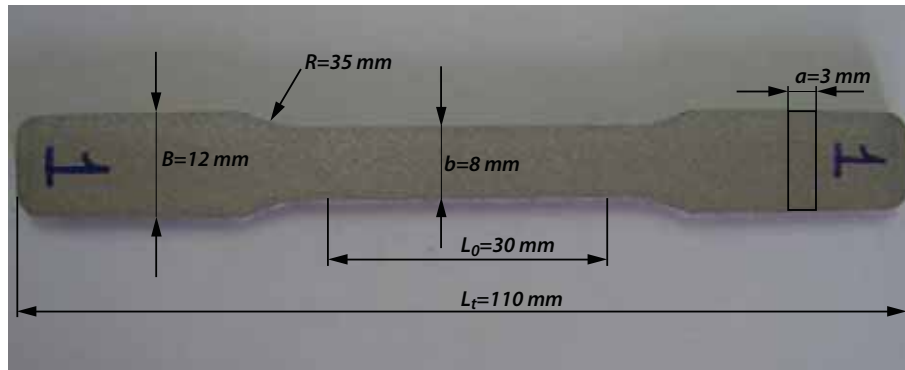
Şekil 3.3. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka ve 7.62 mm x 51 (M80) fişeginin sonlu elemanlar modeli.

alınması gerekliliği kaçınılmazdır. Bu tez çalışmasında, yapıyı oluşturan her bir katmanın yüksek deformasyon hızlarındaki gerilme şekil değiştirme eğrilerin elde edilmesi için Erciyes Üniversitesi Mekanik Laboratuvarına Split Hopkinson test cihazı kurulumu başlatılmış fakat sistemin tamamlanması planlanan takvimden daha uzun sürmesi sebebiyle testler yapılamamıştır. Bununla birlikte literatürde her bir

katmanın ihtiva ettiği silisyum karbür ve alüminyum değerlerine sahip plakaların yüksek gerinim değerlerindeki gerilme şekil değiştirme eğrileri mevcut değildir.

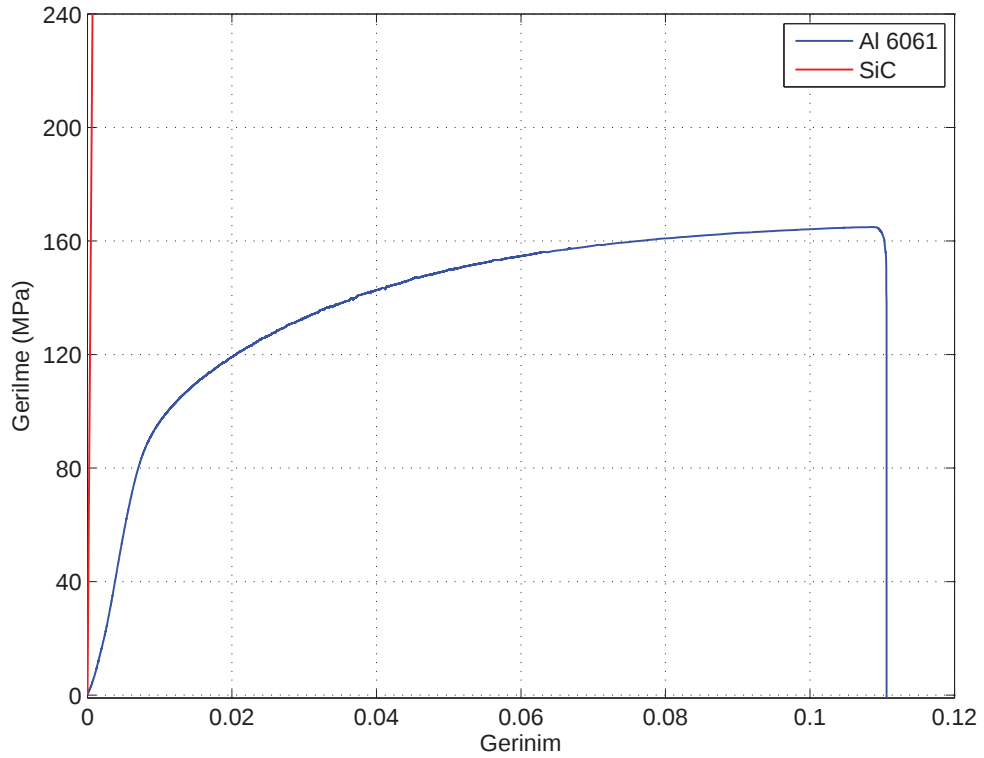
Sayısal modelin oluşturulması için mikro mekanik bir model kullanılarak, katmanların mekanik özelliklerinin belirlenmesi alternatif bir metot olabilir. Bu çerçevede oluşturulan sayısal modelde, her bir katmana ait mekanik özellikler ilgili katmanı oluşturan bileşenlerin hacimsel oranlarını esas alan TTO model kullanılarak hesaplanmıştır. Bu modelde alüminyum ve silisyum karbürün gerilme şekil değiştirme eğrileri kullanılarak, her bir katmana ait gerilme şekil değiştirme eğrileri hesaplanır.

Aynı yöntemlerle üretilmiş alüminyum plakanın gerilme şekil değiştirme eğrisinin elde edilmesi amacıyla bir sinterleme kalıbı ürettirilerek, fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar ile aynı sinterleme şartlarında üretilen (Şekil 3.4) çekme numunelerinin Erciyes Üniversitesi Teknoloji ve Araştırma Uygulama Merkezinde bulunan Shimadzu marka çekme cihazı ile 0.1 mm/dk hızında çekme testleri yapılarak Şekil 3.5'deki eğri elde edilmiştir.



Şekil 3.4. Toz sinterleme yöntemi ile üretilmiş çekme numunesi.

Sayısal analizlerde LS-DYNA kütüphanesinde bulunan "Kinematik/izotropik Elastik-Plastik" malzeme modeli kullanılmış olup model için gerekli olan elastiklik modülü, akma gerilmesi, tanjant modülü ve kopma gerinim değerleri TTO model kullanılarak tespit edilmiştir. Gerekli olan diğer parametreler ise Cowper-Symonds sabitleri [48] olarak bilinen, yüksek gerinim hızlarındaki malzeme davranışını probleme dahil edecek C ve P katsayılarıdır. Alüminyum için söz konusu parametreler literatürden sırasıyla 6500 ve 4 olarak alınmış, fonksiyonel



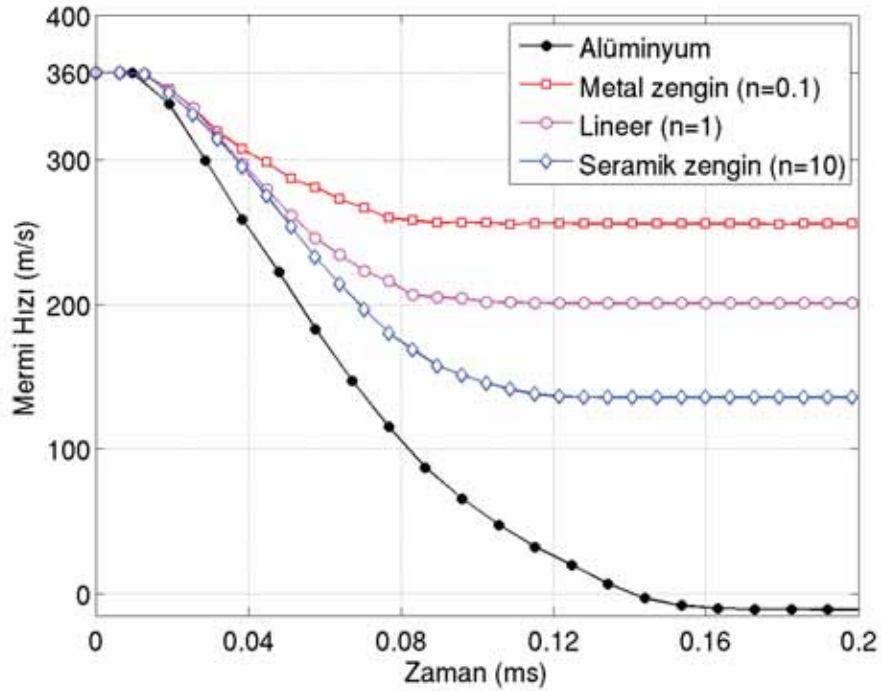
Şekil 3.5. Al 6061 gerilme şekil değişimi eğrisi.

kademelendirilmiş sandviç yapıyı oluşturan diğer dokuz katman için bu sabitler ihmal edilmiştir. Bu ihmal daha sonra izah edilecek olan sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında oluşan farkın da en önemli sebebi olacaktır. C ve P parametrelerinin balistik çarpma yükü altındaki plaka davranışları üzerindeki etkisini göstermek amacıyla, metal yoğun katmanlara alüminyumun C ve P değerleri ve seramik yoğun plakalara ise literatürden alınmış ilgili katmanların sabitlerini temsil edebileceğini düşündüğümüz yüksek karbonlu sertleştirilmiş çeliğe ait C=40 ve P=5 değerleri alınarak 9 mm x 19 Parabellum mermi tipi için analizler tekrarlanmıştır.

3.4. 9 mm x 19 Parabellum Mermi Sayısal Analiz Sonuçları

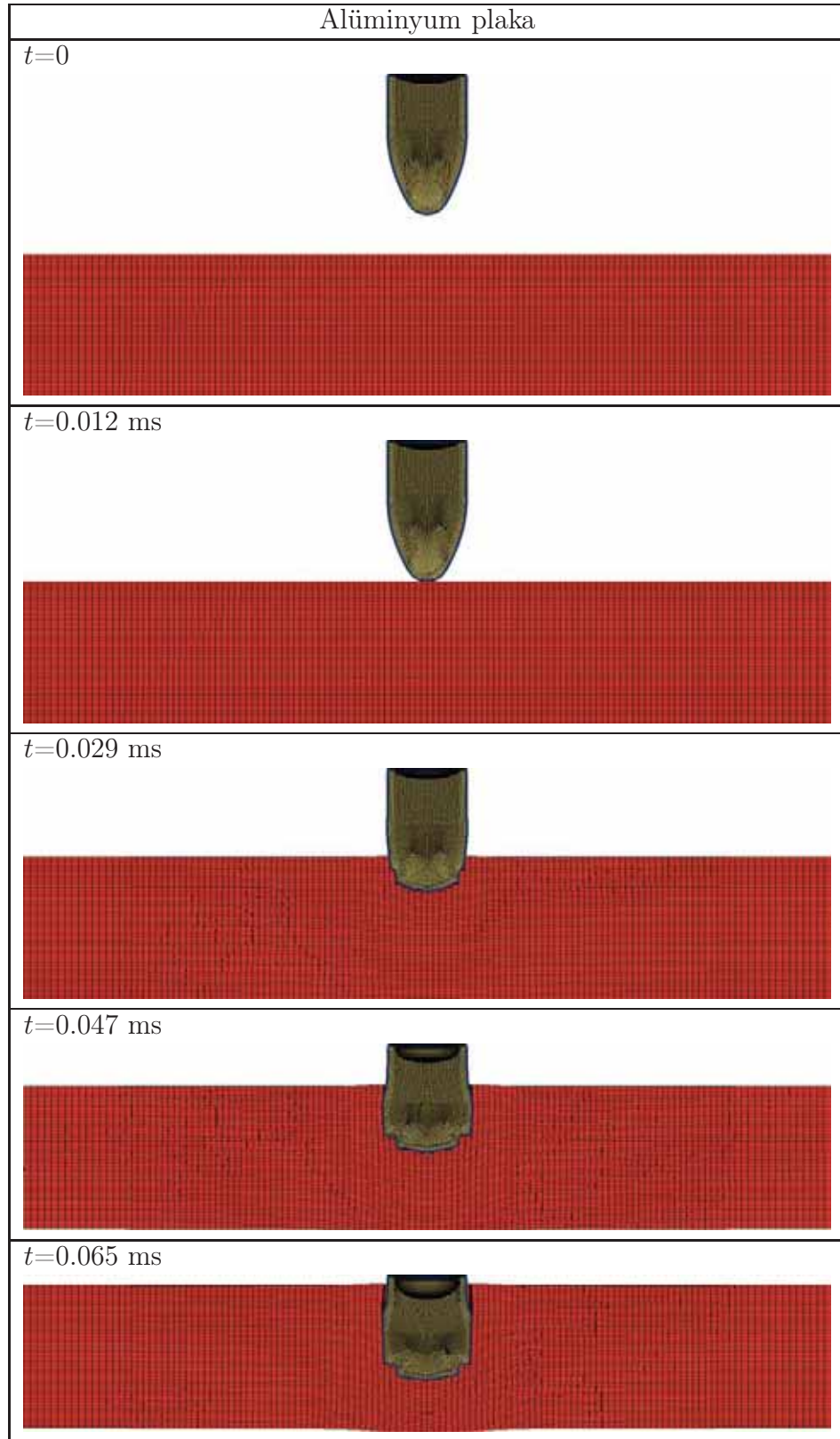
Analizlerde 8 gr ağırlığındaki 9 mm x 19 Parabellum mermi sabit 360 m/s'lik hızda sırasıyla alüminyum, metal zengin, lineer karışım ve seramik zengin plakalara çarpıtılmıştır. Alüminyum plaka ve sandviç plakaların alüminyum katmanlarının gerinim oranları dikkate alınıp diğer katmanların gerinim oranlarının ihmal edildiği analizlerde mermi hızının zamanla değişimi Şekil 3.6'da verilmiştir.

Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda gerinim oranının ihmal edilmesi sebebiyle tam nüfuziyet (perforasyon), alüminyum plaka da ise kısmi nüfuziyet (penetrasyon) gözlemlenmiştir. Artan seramik oranı ile merminin perforasyon sonrası sahip olduğu enerji seviyesi azalmıştır. Bunun sebebi seramik oranının artması ile plaka rijitliğinin de artmasıdır.

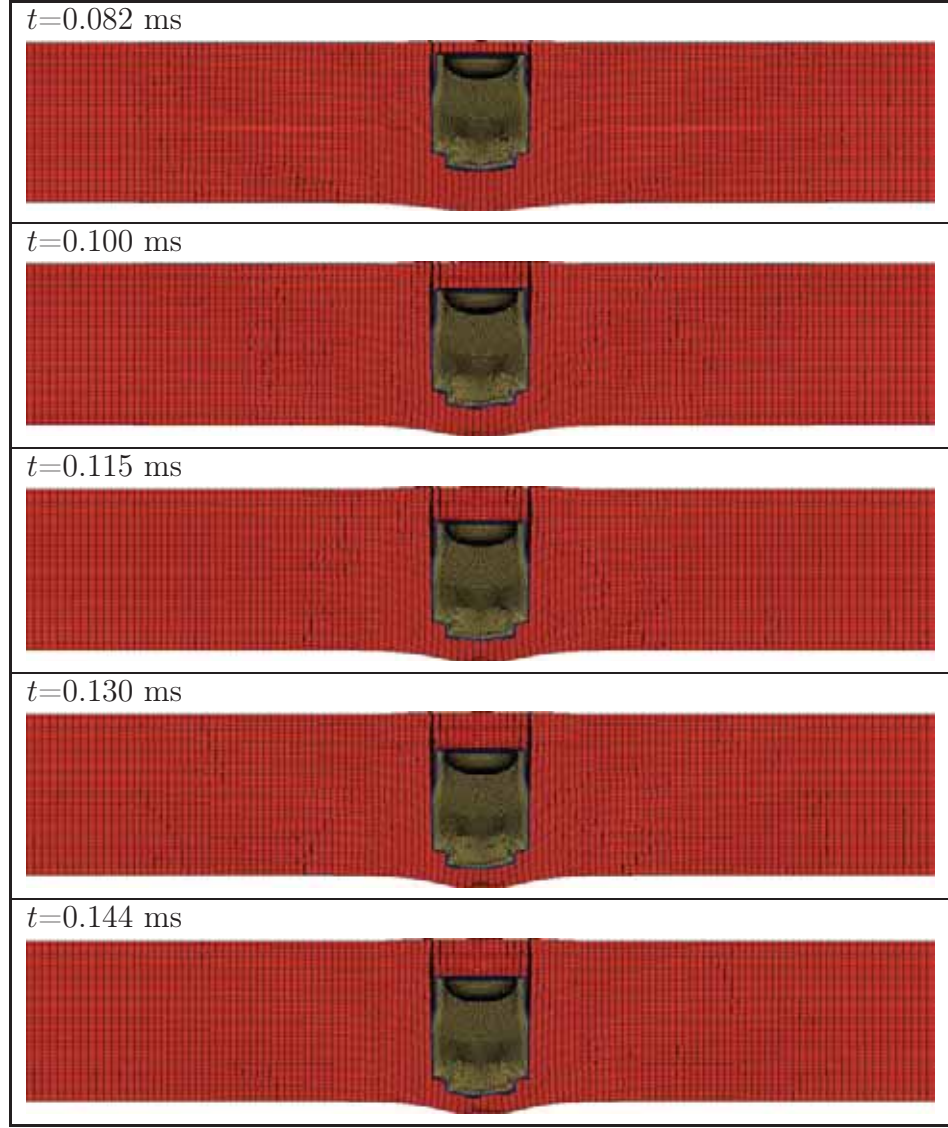


Şekil 3.6. 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişek hızının zamana göre değişimi.

Şekil 3.7'de 9 mm x 19 Parabellum tabanca mermisinin çarpması sonrasında alüminyum plakada oluşan deformasyon görülmektedir. Analizde mermi plaka içerisine nüfuz etmiştir fakat plakayı delememiştir. Şekil 3.8 - 3.10'da sırasıyla metal yoğun karışım, lineer karışım ve seramik yoğun karışımlara sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalarda 9 mm x 19 Parabellum tabanca mermisinin çarpması sonrasında oluşan deformasyon kesit görüntüleri verilmiştir. Gerinim oranı ihmal edilerek gerçekleştirilen analizlerde üç farklı plakada perforasyon gerçekleşmiş olup seramik oranının artması ile perforasyon hızında azalma görülmüştür. Aynı zamanda metal yoğun plaka kompozisyonuna sahip plaka arka yüzeyinde fazla bir şişme varken seramik yoğun plakada bu şişme azalmıştır. Bu durum artan kompozisyonel gradyant ile plakalardaki plastik deformasyonun azaldığını ortaya koymuştur.

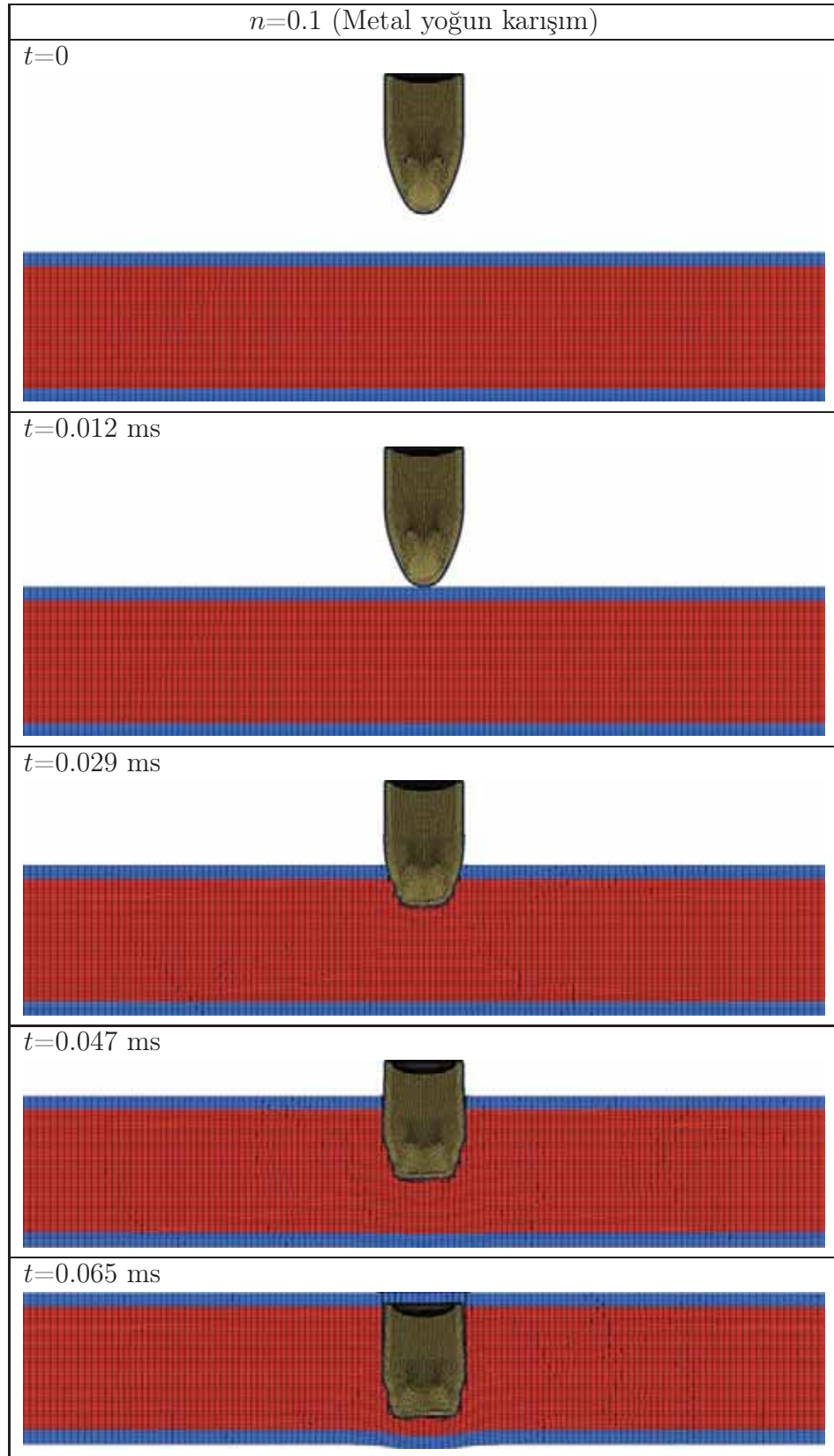


(a)

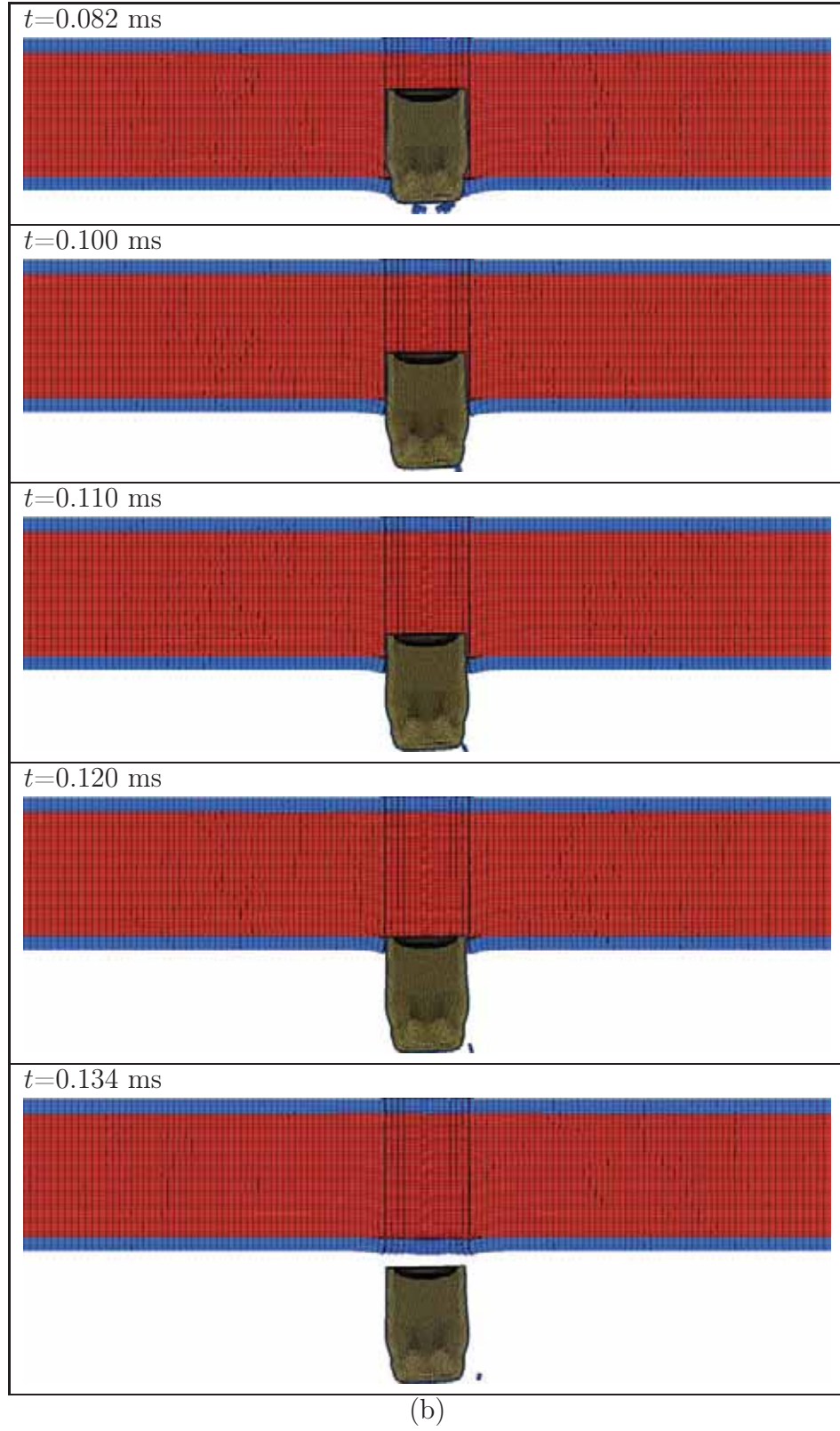


(b)

Şekil 3.7. 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi ($v = 360m/s$) çarpması sonrasında alüminyum plakada oluşan deformasyon.

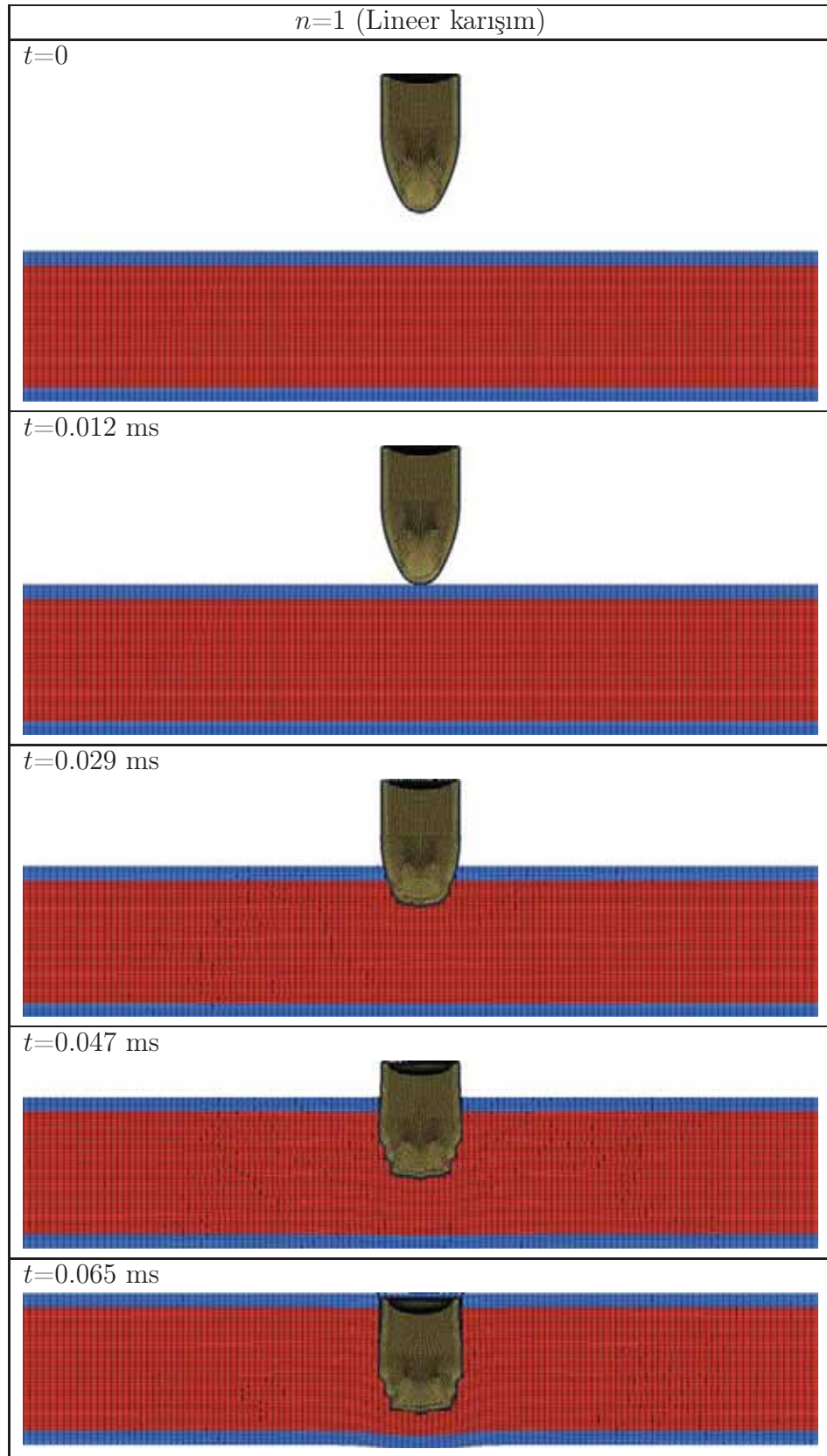


(a)

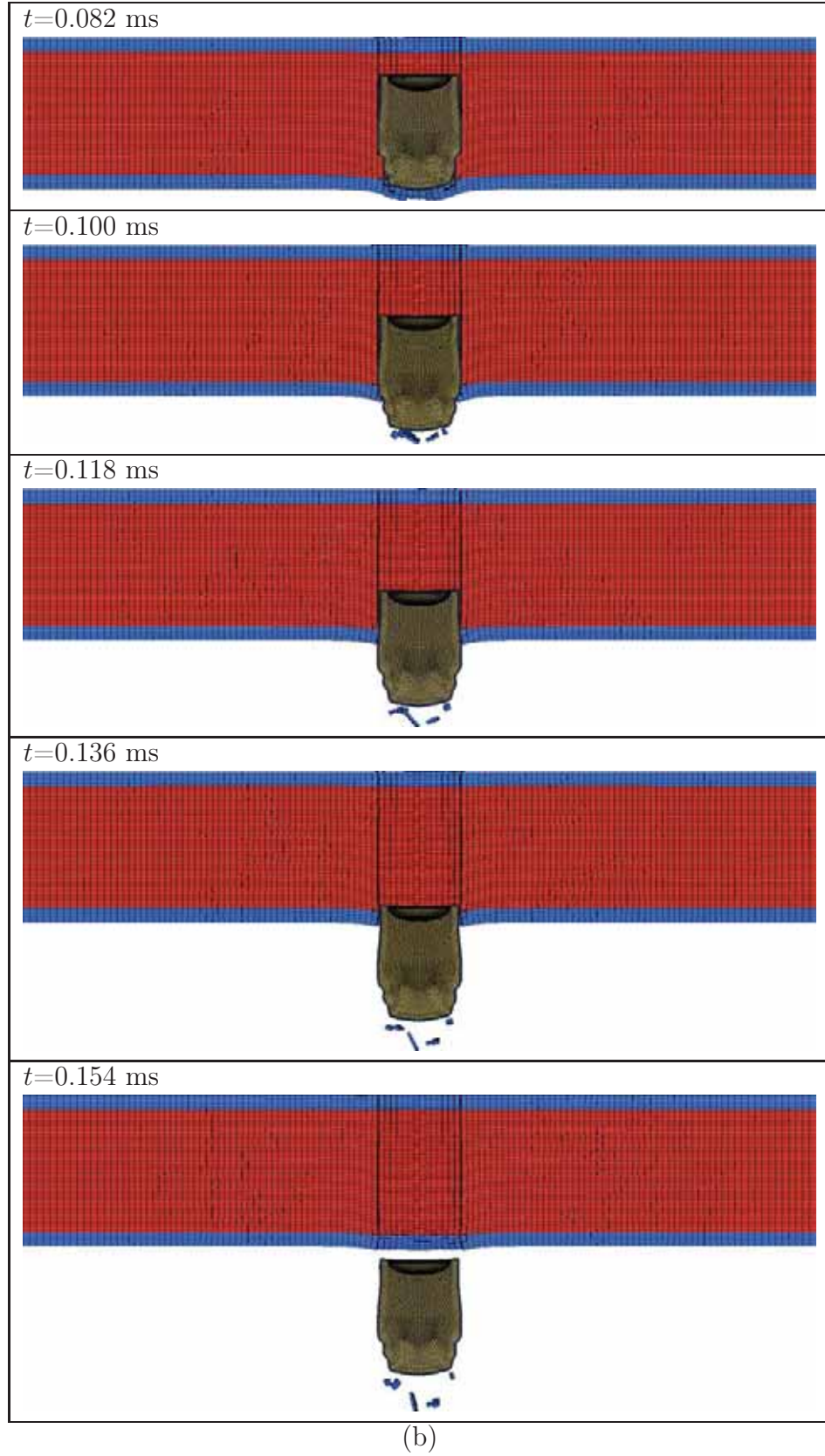


(b)

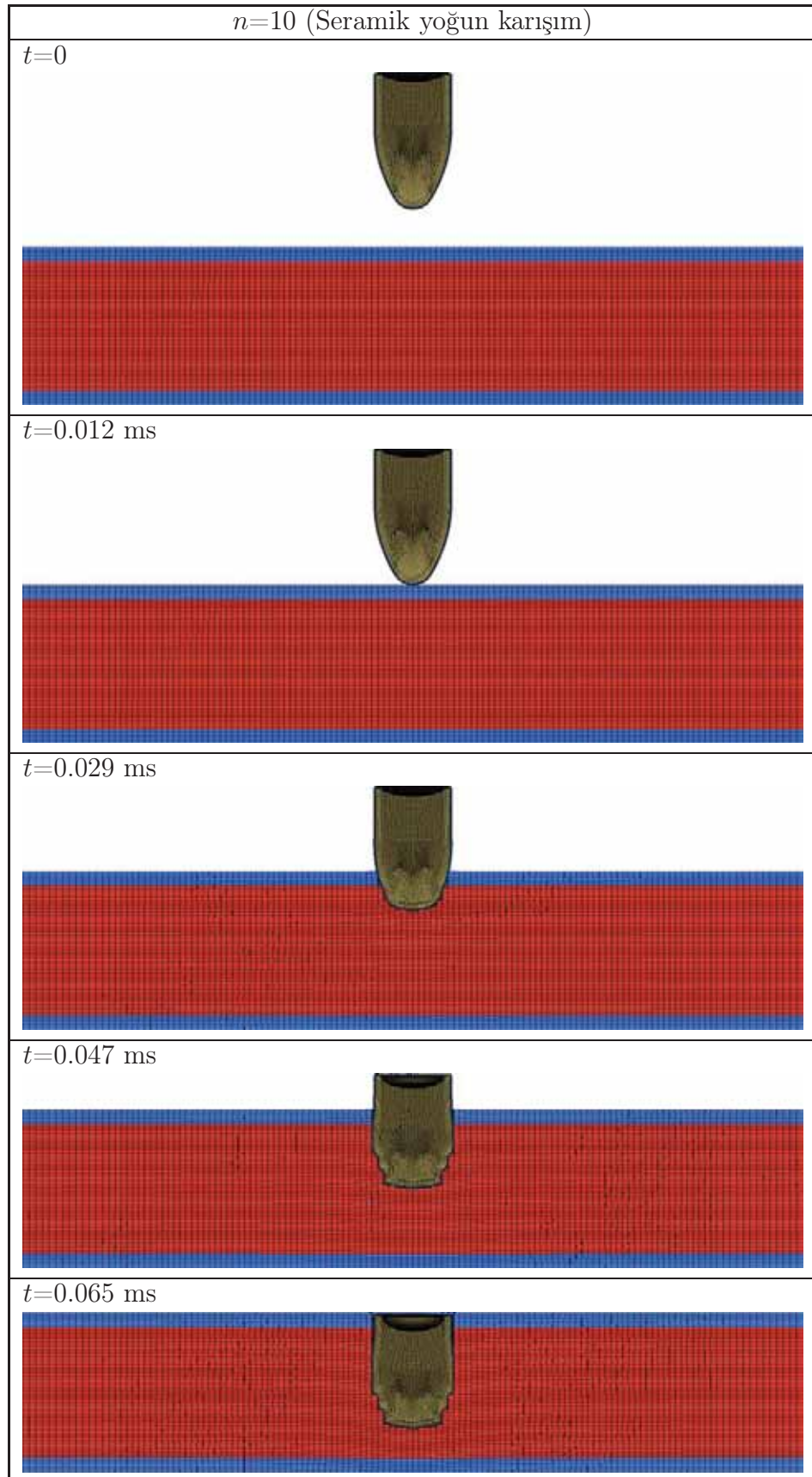
Şekil 3.8. Gerinim hızı parametrelerinin ihmal edildiği durum için 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi ($v = 360m/s$) çarpması sonrasında metal yoğun karışıma ($n = 0.1$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.



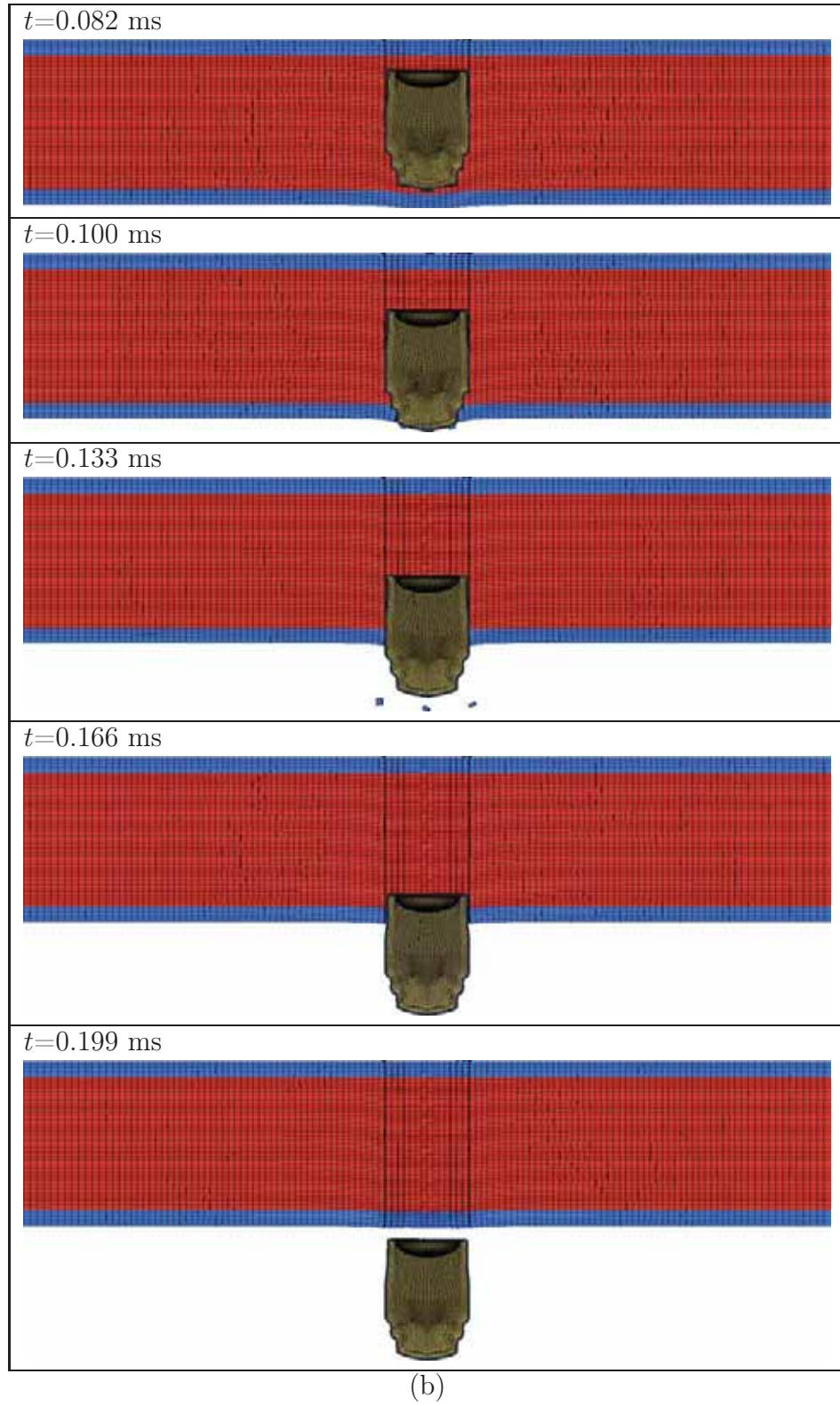
(a)



Şekil 3.9. Gerinim hızı parametrelerinin ihmal edildiği durum için 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi ($v = 360m/s$) çarpması sonrasında lineer karışıma ($n = 1$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.



(a)



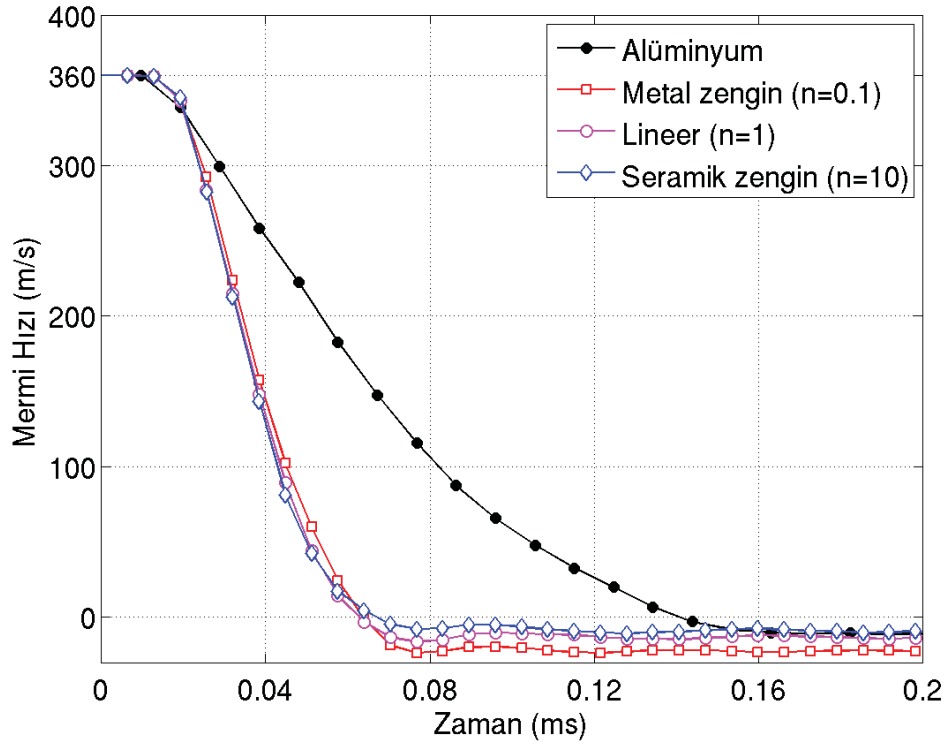
Şekil 3.10. Gerinim hızı parametrelerinin ihmal edildiği durum için 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi ($v = 360m/s$) çarpması sonrasında seramik yoğun karışıma ($n = 10$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.

Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların balistik yükleme şartları altındaki davranışları üzerinde gerinim oranı parametrelerinin etkisini göstermek için yapılan analizlerde mermi hızının zamanla değişimi Şekil 3.11’de verilmiştir. Grafik, Şekil 3.6 ile kıyaslandığında fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda gerinim oranının ihmal edilmesi ile tam nüfuziyet (perforasyon) gözlenen plakalarda gerinim oranının modele dahil edilmesi ile plakalar, üç farklı kompozisyonda da mermiyi durdurmuş, nüfuziyet olmamıştır. Fonksiyonel kademelendirilmiş yapıyı oluşturan her bir katmanın farklı malzeme kompozisyonlarına sahip olması sebebiyle her bir katman farklı gerinim oranı parametrelerine sahip olacaktır. Söz konusu katmanlara ait deformasyon hızına bağlı malzeme davranışının sayısal analizlere dahil edilmesi için C ve P parametrelerinin ilgili katman için deneysel olarak Split Hopkinson test sistemi ile farklı hızlarda bir çok test yapılarak belirlenmesi önemlidir. Yüksek deformasyon hızlarında malzemelerde gerinim sertleşmesinin olduğu ve malzemelerin süper plastik davranış sergilediği bilinmektedir Şekil 3.11 ve Şekil 3.6’de deformasyon hızının sayısal benzetim açısından önemini açık olarak ortaya koymaktadır.

Şekil 3.12 - 3.14’de sırasıyla metal yoğun karışım, lineer karışım ve seramik yoğun karışımlara sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalarda 9 mm x 19 Parabellum tabanca mermisinin çarpması sonrasında oluşan deformasyon görüntüleri verilmiştir. Üç farklı malzeme kompozisyonunda mermi, çarpma yüzeyinde bulunan alüminyum katman içerisine nüfuz etmiş fakat seramik yoğun katmana ulaştığında mantarlaşmaya başlamış ve nüfuziyet kabiliyetini kaybetmiştir. Artan seramik oranı ile de mermide meydana gelen kalınlaşmanın arttığı ve düzleşmenin daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Ayrıca plaka ön yüzeyinde oluşan çökme miktarı ile arka yüzeyde oluşan şişmenin zamana göre değişimi incelendiğinde, oluşan çökme miktarı ile şişme miktarlarının paralel olarak ilerlemediği görülmektedir.

3.5. 7.62 mm x 51 Mermi Sayısal Analiz Sonuçları

Analizlerde 9.5 gr ağırlığındaki 7.62 mm x 51 mermi sabit 860 m/s’lik hızda alüminyum, metal zengin, lineer karışım ve seramik zengin plakalara çarptırılmıştır. Alüminyum plaka ve sandviç plakaların alüminyum katmanlarının

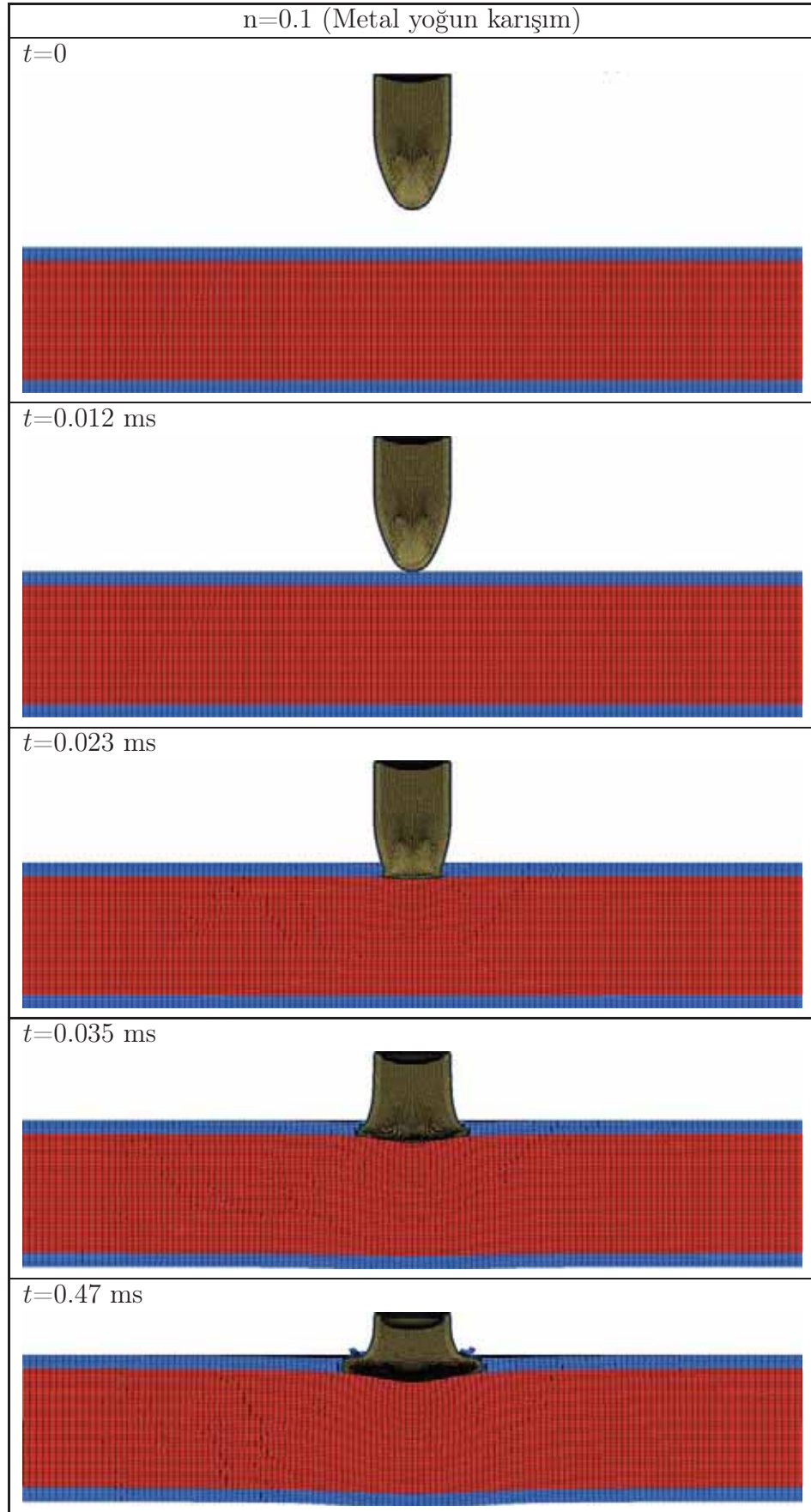


Şekil 3.11. 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişek hızının zamana göre değişimi.

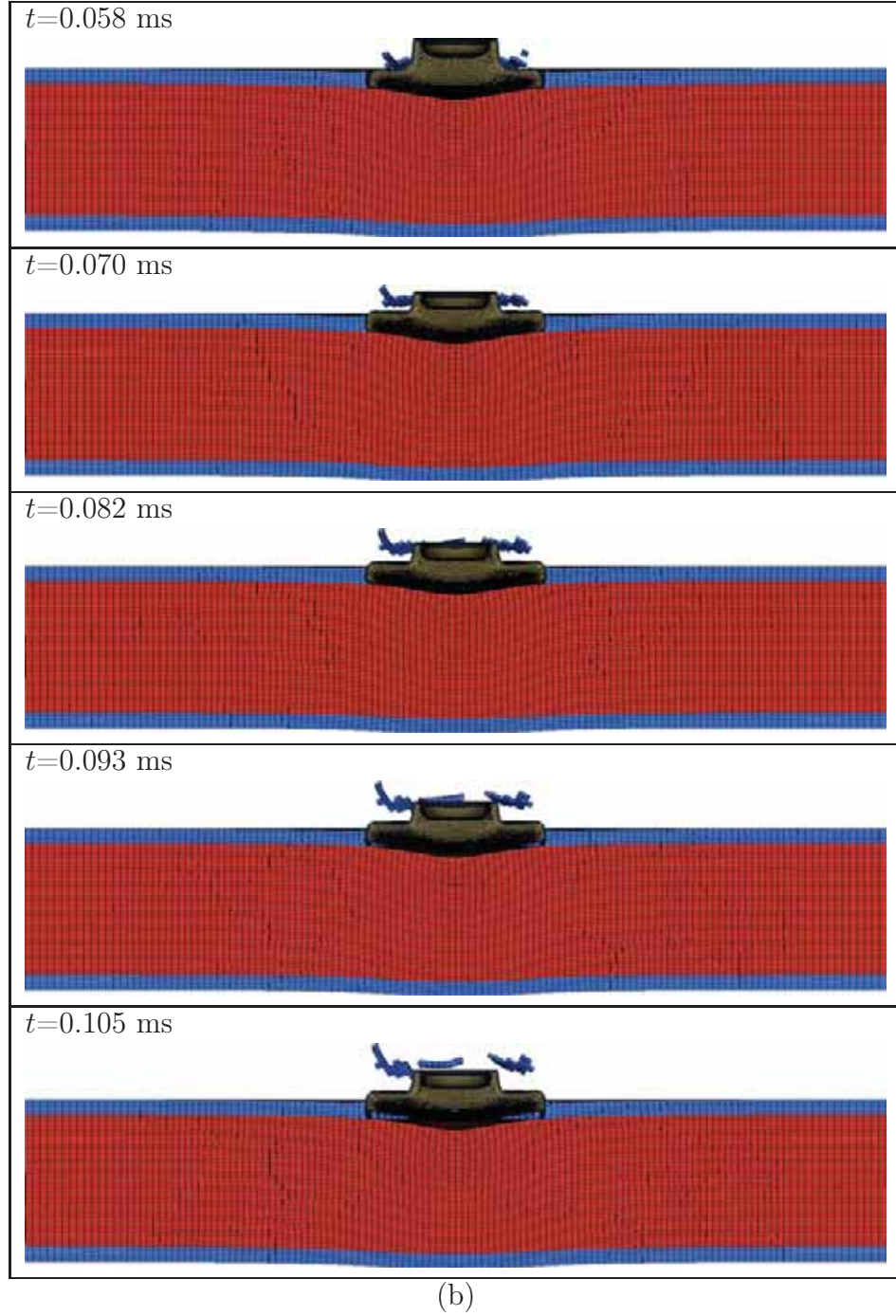
gerinim oranları dikkate alınıp diğer katmanların gerinim oranlarının ihmal edildiği analizlerde, mermi hızının zamanla değişimi Şekil 3.15’de verilmiştir. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda gerinim oranının ihmal edilmesi sebebiyle tam nüfuziyet (perforasyon) gözlemlenmiştir. Artan seramik oranı ile merminin perforasyon sonrası sahip olduğu enerji seviyesi azalmıştır. Bunun sebebi seramik oranının artması ile plaka rijitliğinin de artmasıdır.

Balistik darbe analizlerinde kontrol edilmesi gereken parametrelerden bir tanesi de enerji korunumudur. Merminin başlangıçta sahip olduğu enerjinin bir kısmı, çarpma sonrasında mermi ve plakada deformasyon enerjisine, bir kısmı ısıya dönüşür. Başlangıçta 860 m/s lik hızı sebebiyle mermi, 3513J kinetik enerjiye sahiptir. Çarpma sonrası plakada oluşan yer değiştirme sebebiyle plakanın kinetik enerji değeri artmakta, doğal olarak merminin enerjiside azalmaktadır. Mermi enerjisindeki bu azalma metal yoğun plakadan seramik yoğun plakaya doğru gidildikçe azalmaktadır.

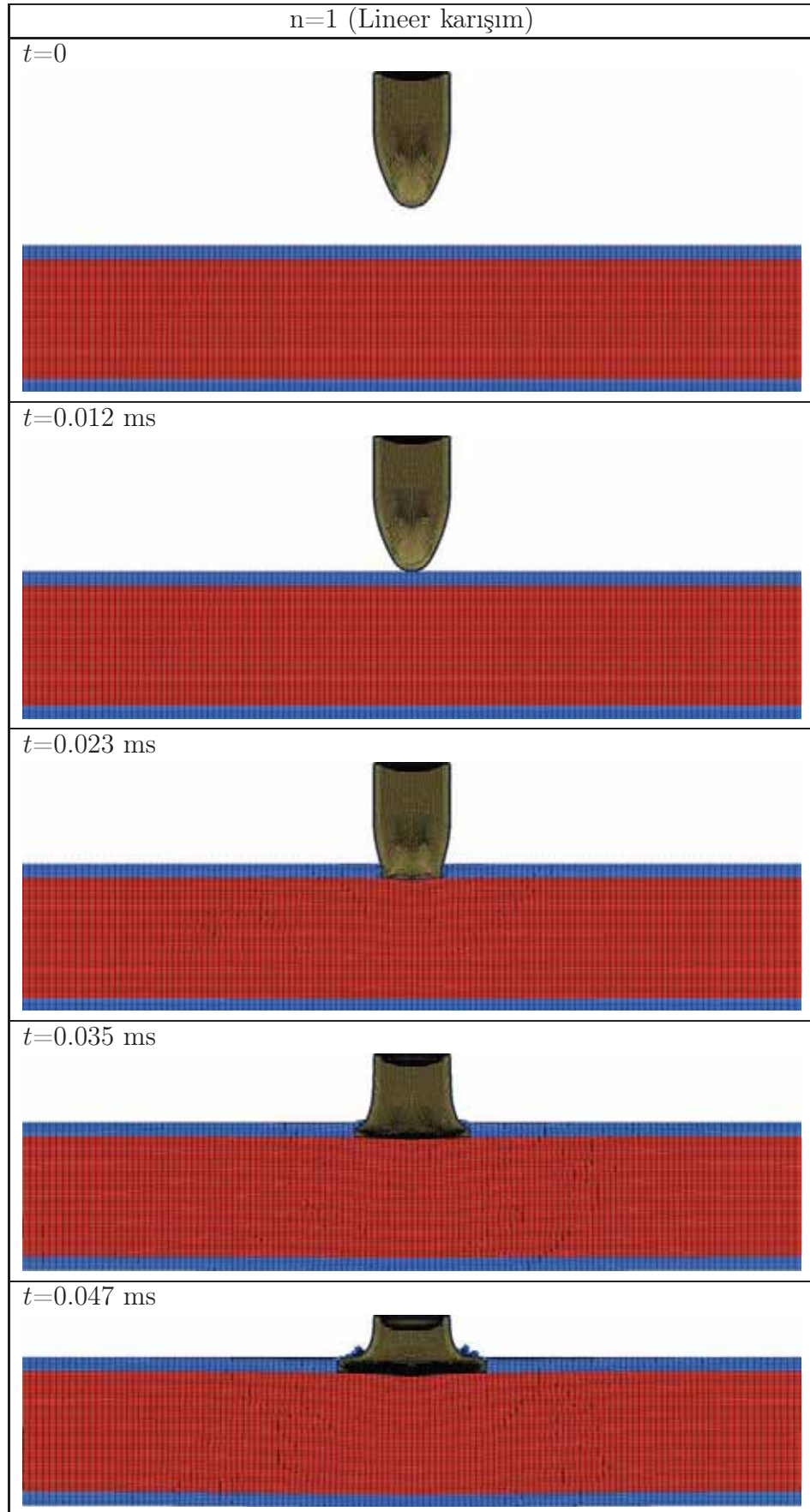
Şekil 3.16’da 7.62 mm x 51 mermisinin çarpması sonrasında alüminyum plakada



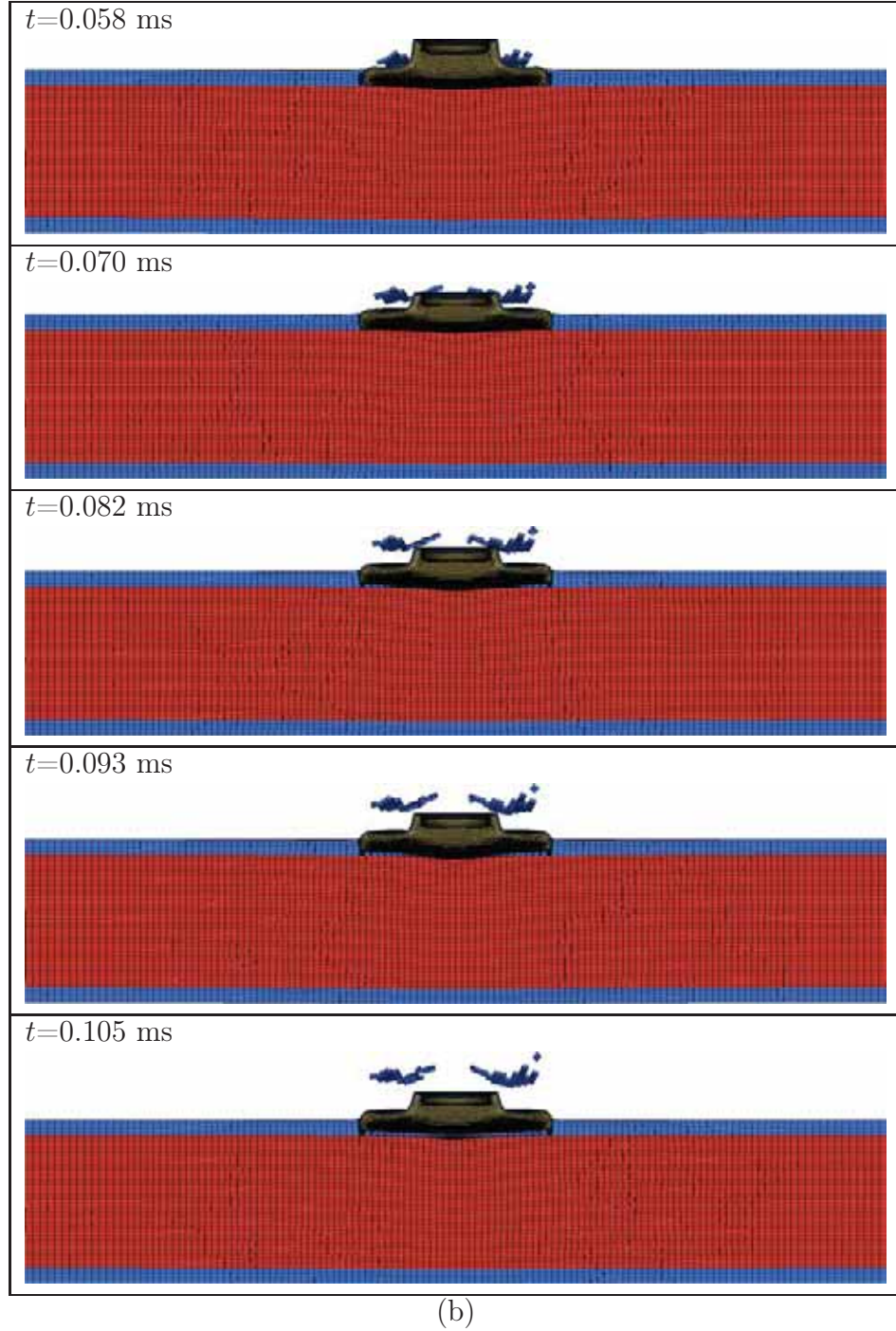
(a)



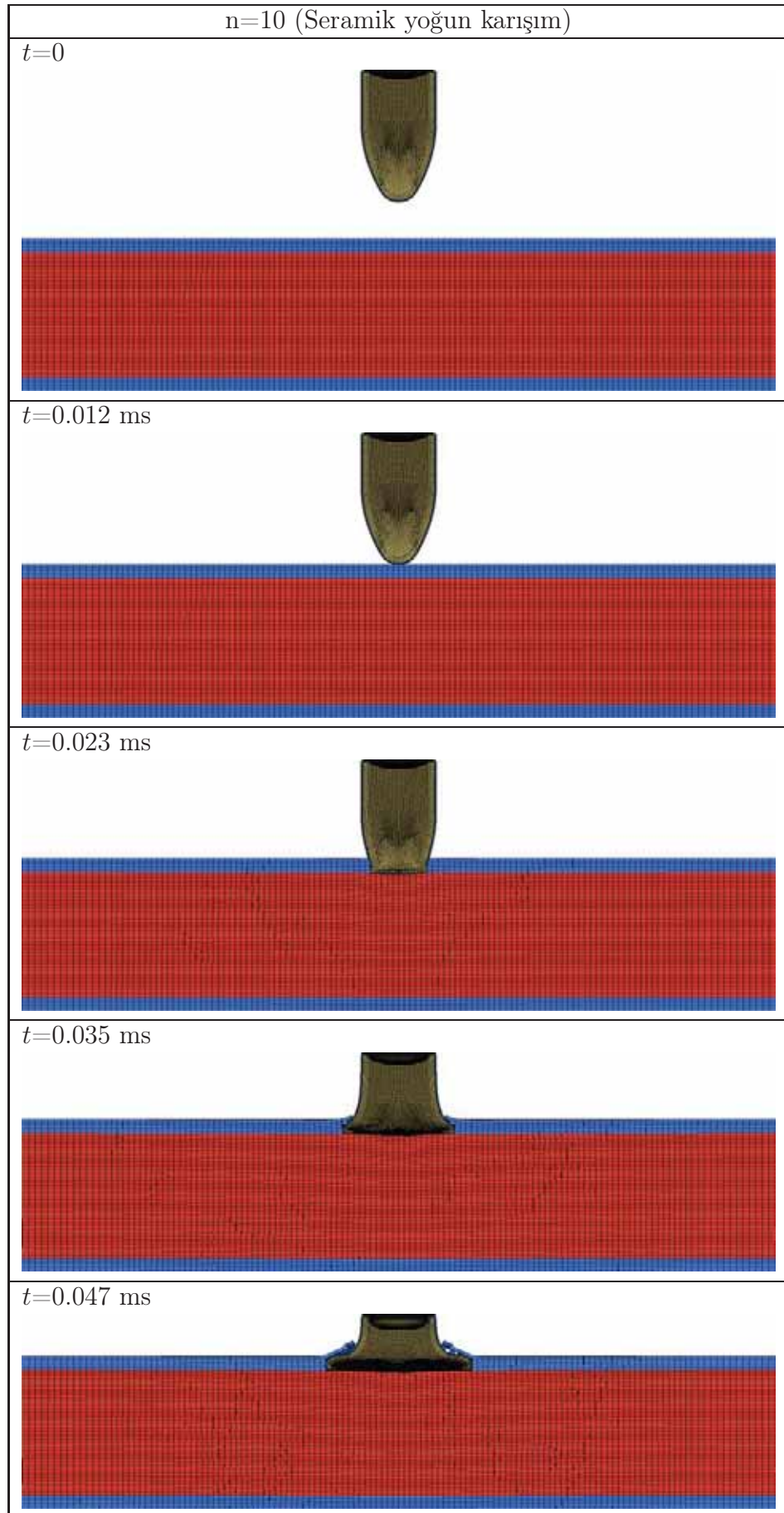
Şekil 3.12. Temsili gerinim hızı parametrelerinin kullanıldığı durum için 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi ($v = 360m/s$) çarpması sonrasında metal yoğun karışıma ($n = 0.1$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.



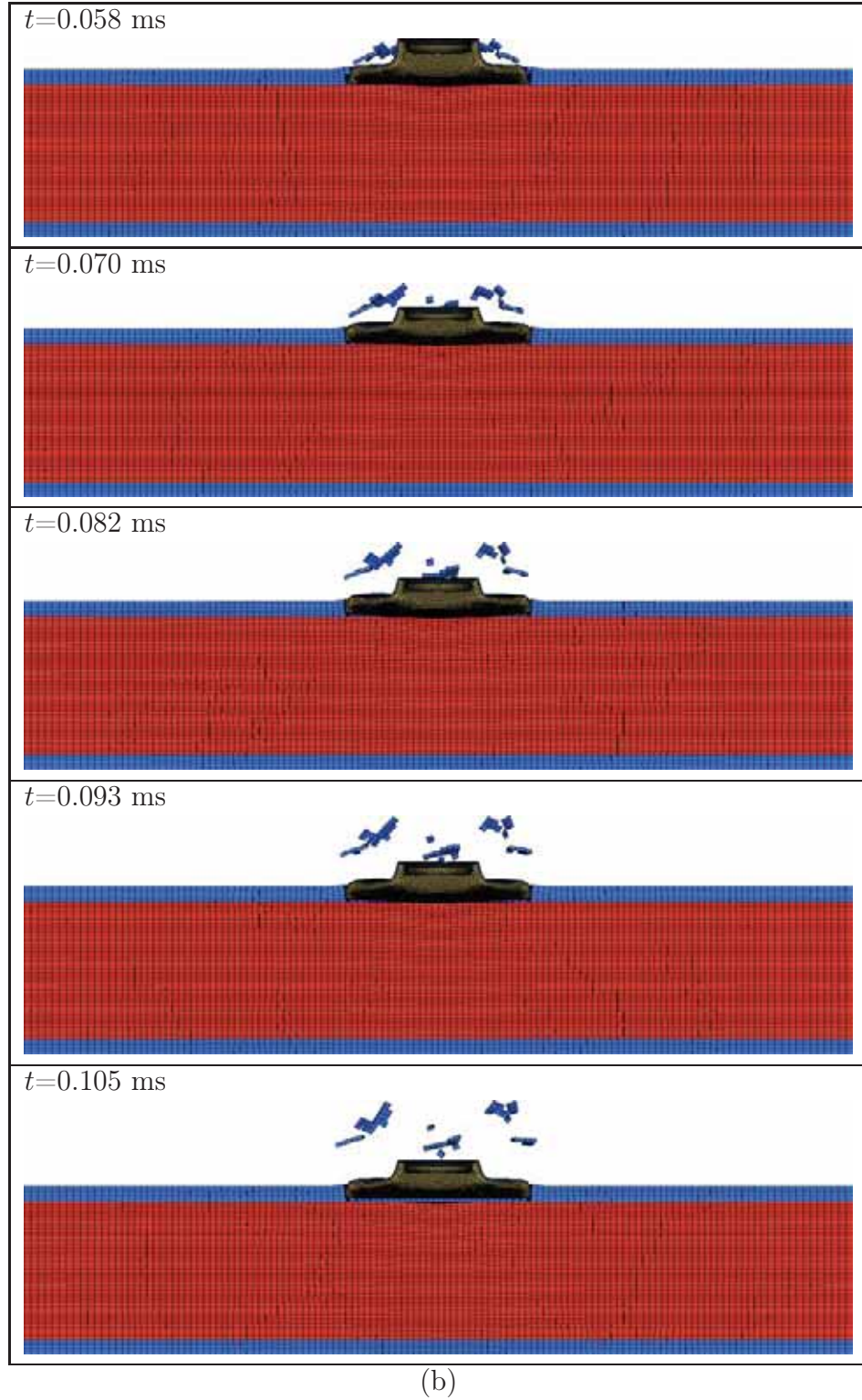
(a)



Şekil 3.13. Temsili gerinim hızı parametrelerinin kullanıldığı durum için 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi ($v = 360m/s$) çarpması sonrasında lineer karışıma ($n = 1$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.

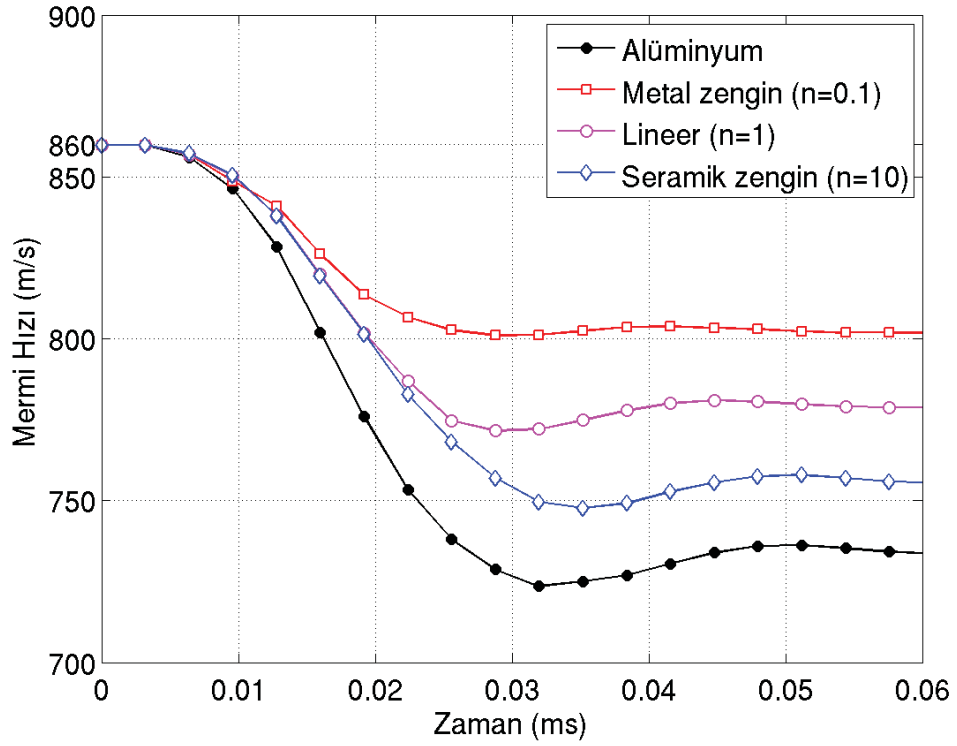


(a)



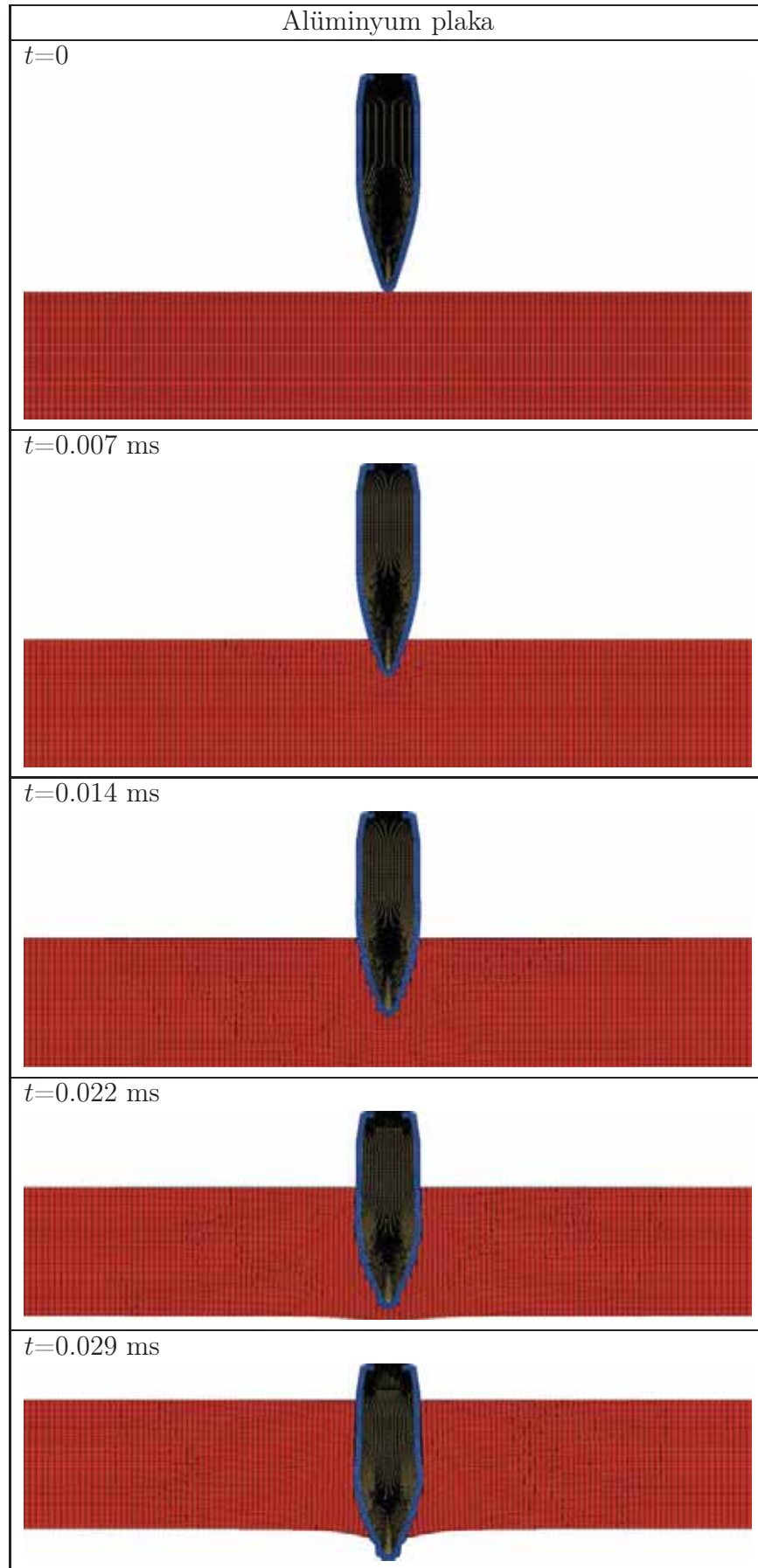
(b)

Şekil 3.14. Temsili gerinim hızı parametrelerinin kullanıldığı durum için 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi ($v = 360m/s$) çarpması sonrasında seramik yoğun karışıma ($n = 10$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.

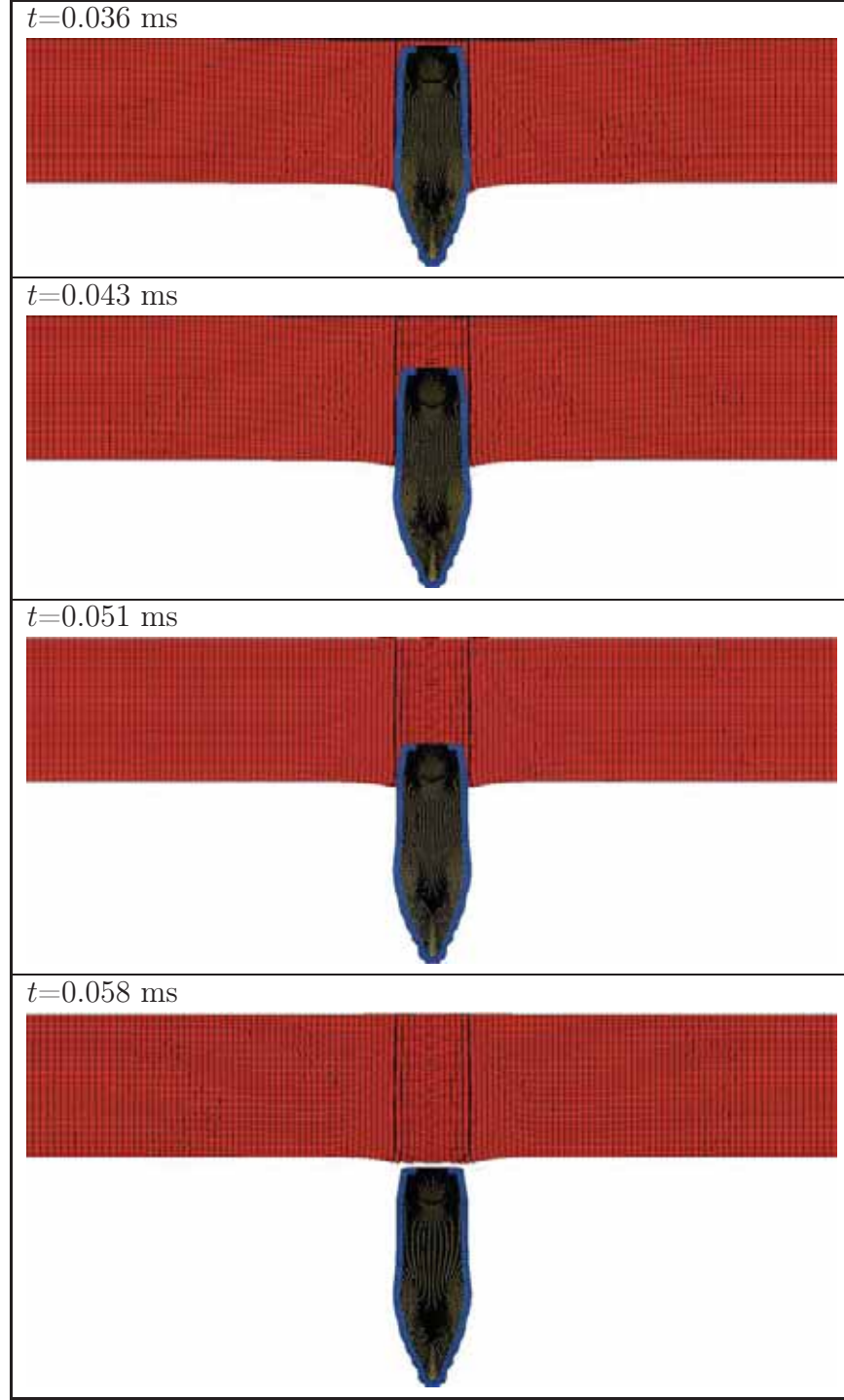


Şekil 3.15. 7.62 mm x 51 fişek hızının zamana göre değişimi.

oluşan deformasyon görülmektedir. Şekil 3.17 - 3.19'de sırasıyla metal yoğun karışım, lineer karışım ve seramik yoğun karışımlara sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalarda 7.62 mm x 51 mermisinin çarpması sonrasında oluşan deformasyon görüntüleri verilmiştir. Gerinim oranı ihmal edilerek gerçekleştirilen analizlerde üç farklı plakada perforasyon gerçekleşmiş olup seramik oranının artması ile perforasyon hızında azalma gözlemlenmiştir. Aynı zamanda metal yoğun plaka kompozisyonuna sahip plaka arka yüzeyinde fazla bir şişme varken seramik yoğun plakada bu şişme azalmıştır. Bu durum artan kompozisyonel gradyant ile plakalardaki plastik deformasyonun azaldığını ortaya koymuştur.

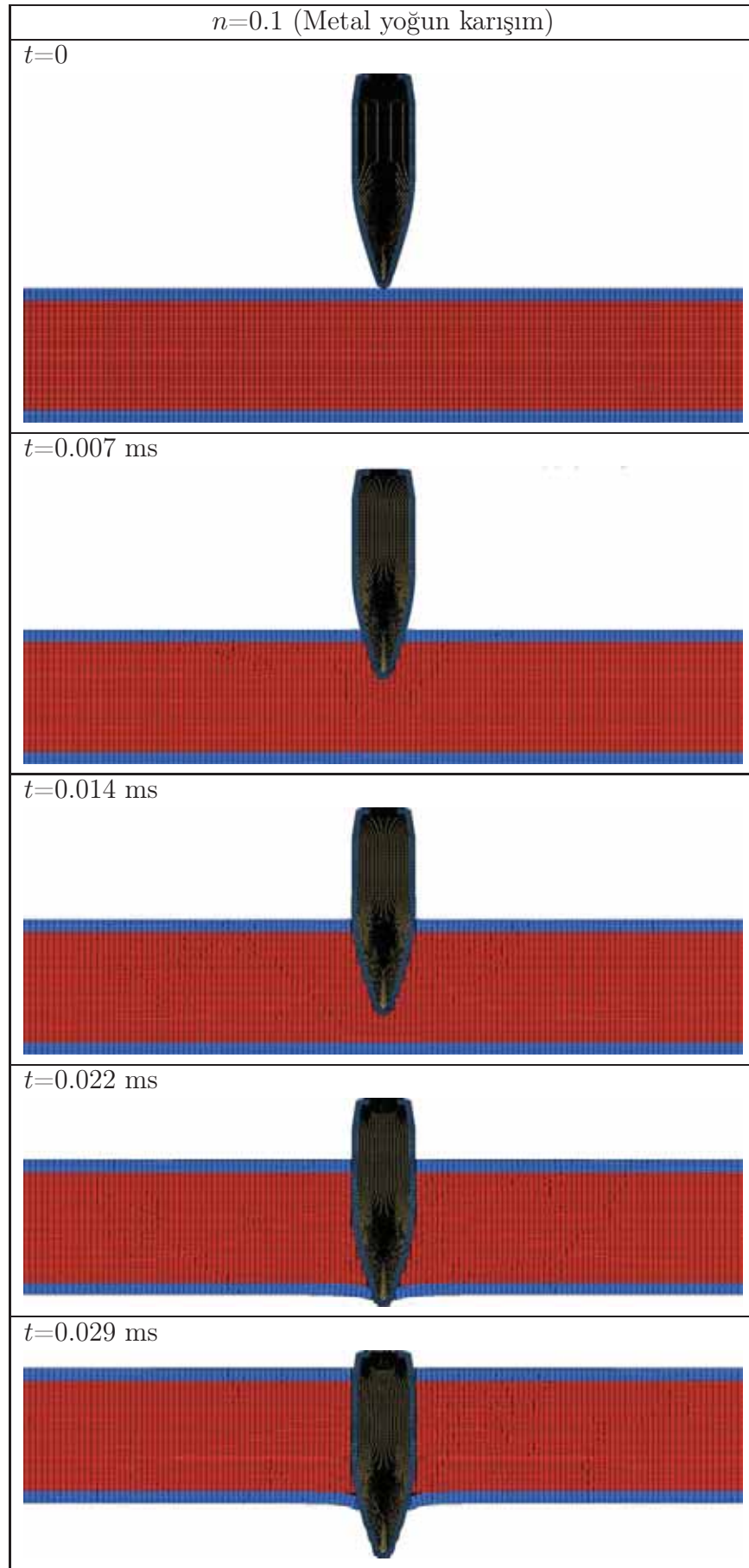


(a)

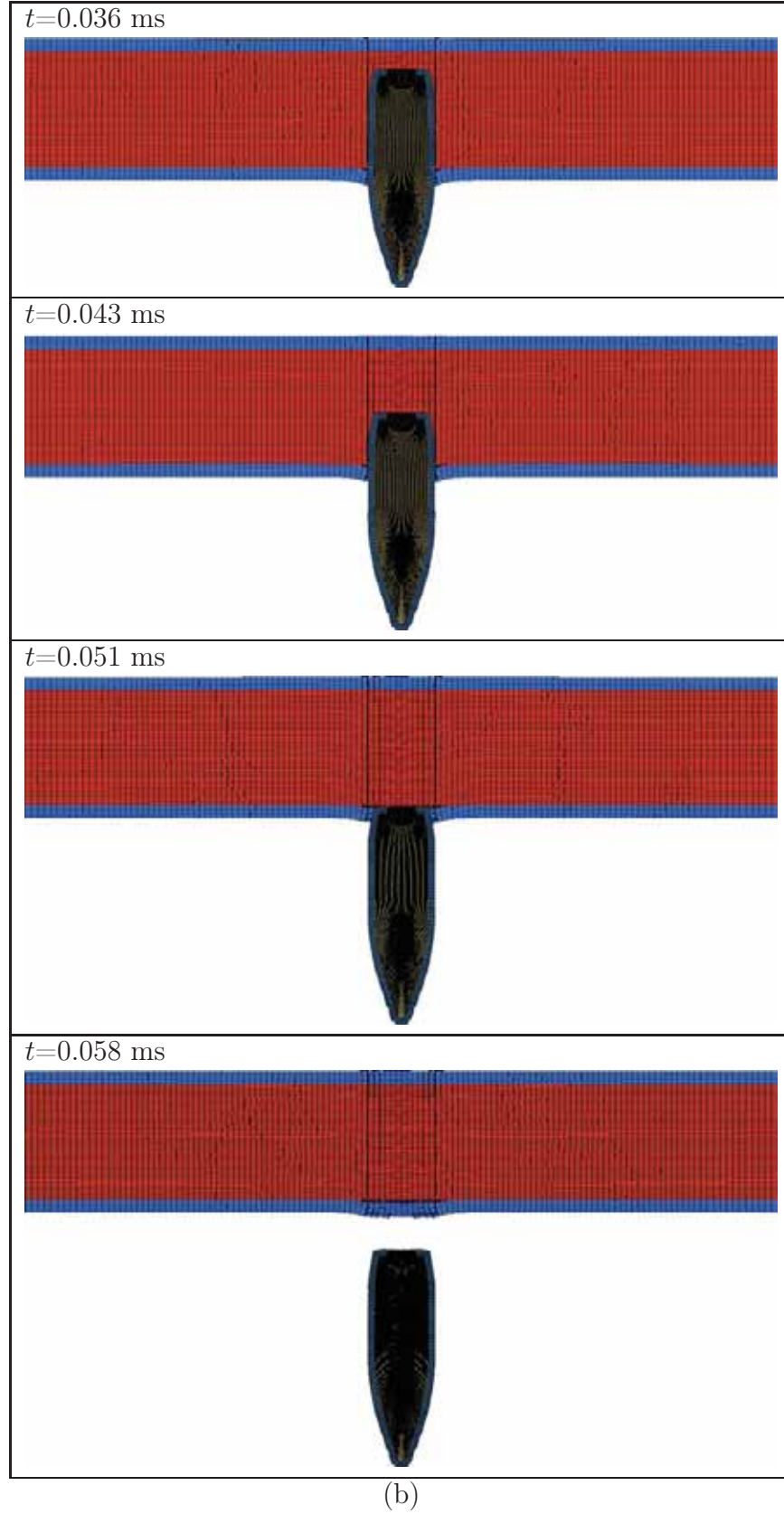


(b)

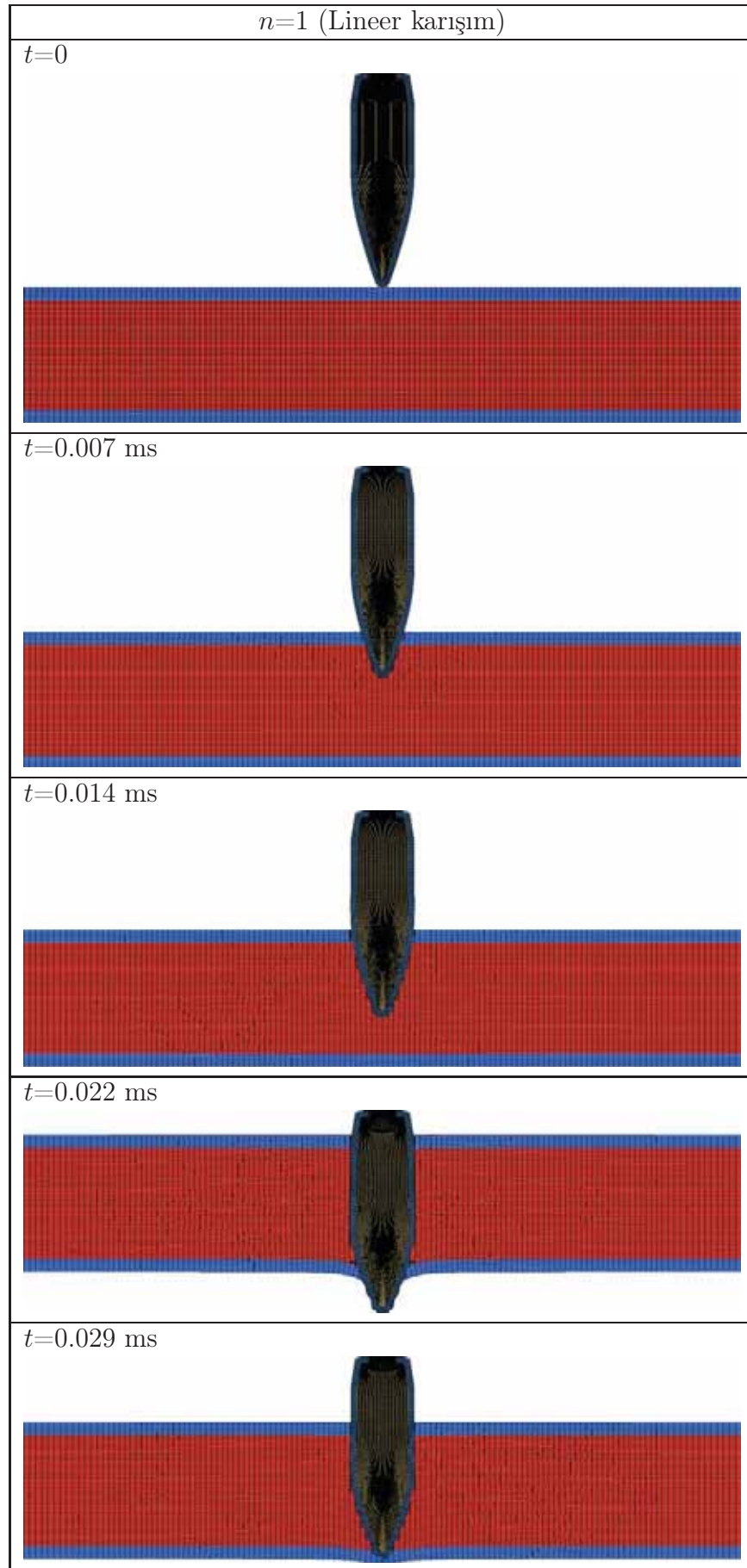
Şekil 3.16. 7.62 mm x 51 fişek ($v = 860m/s$) çarpması sonrasında alüminyum plakada oluşan deformasyon.



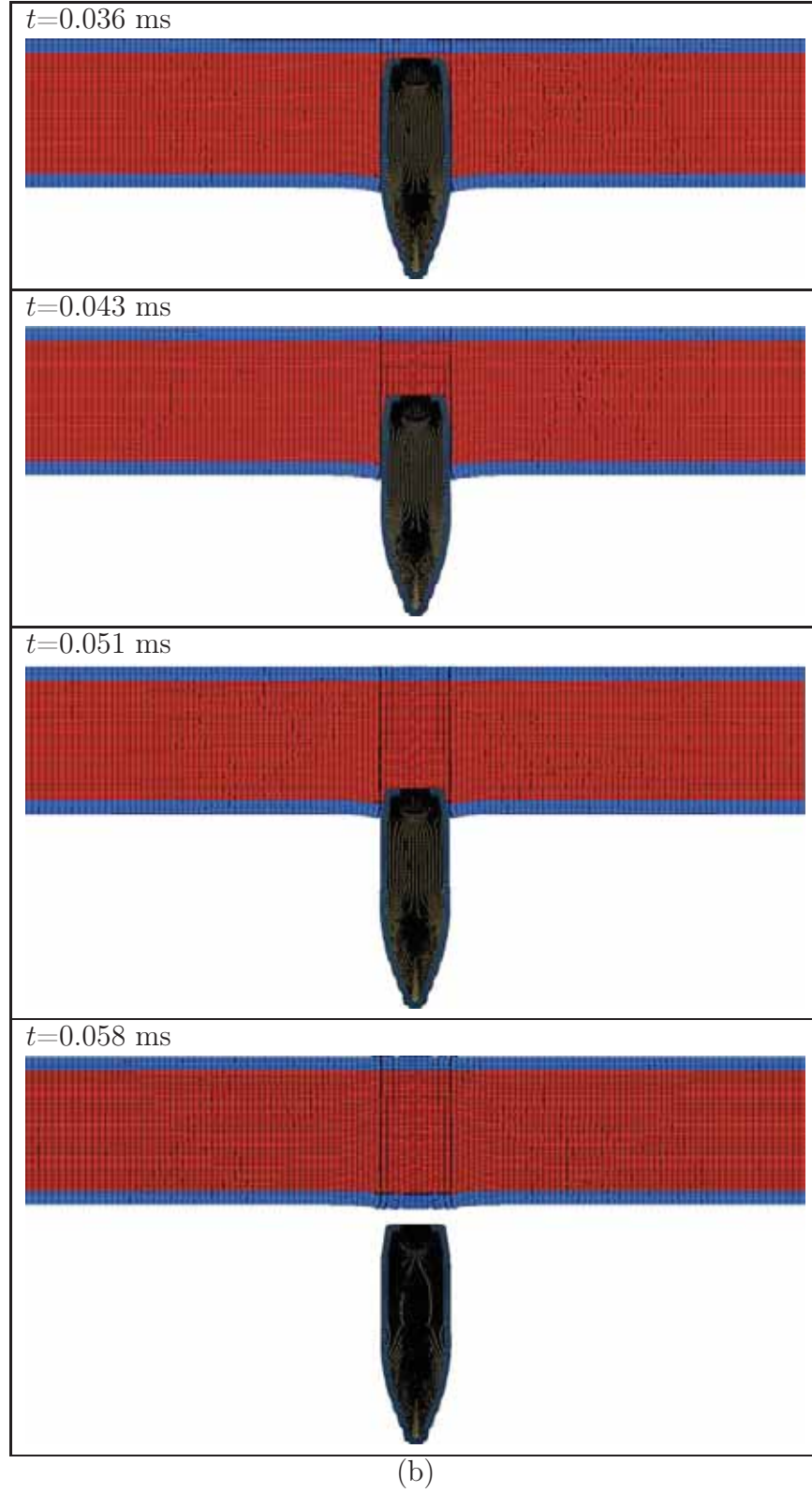
(a)



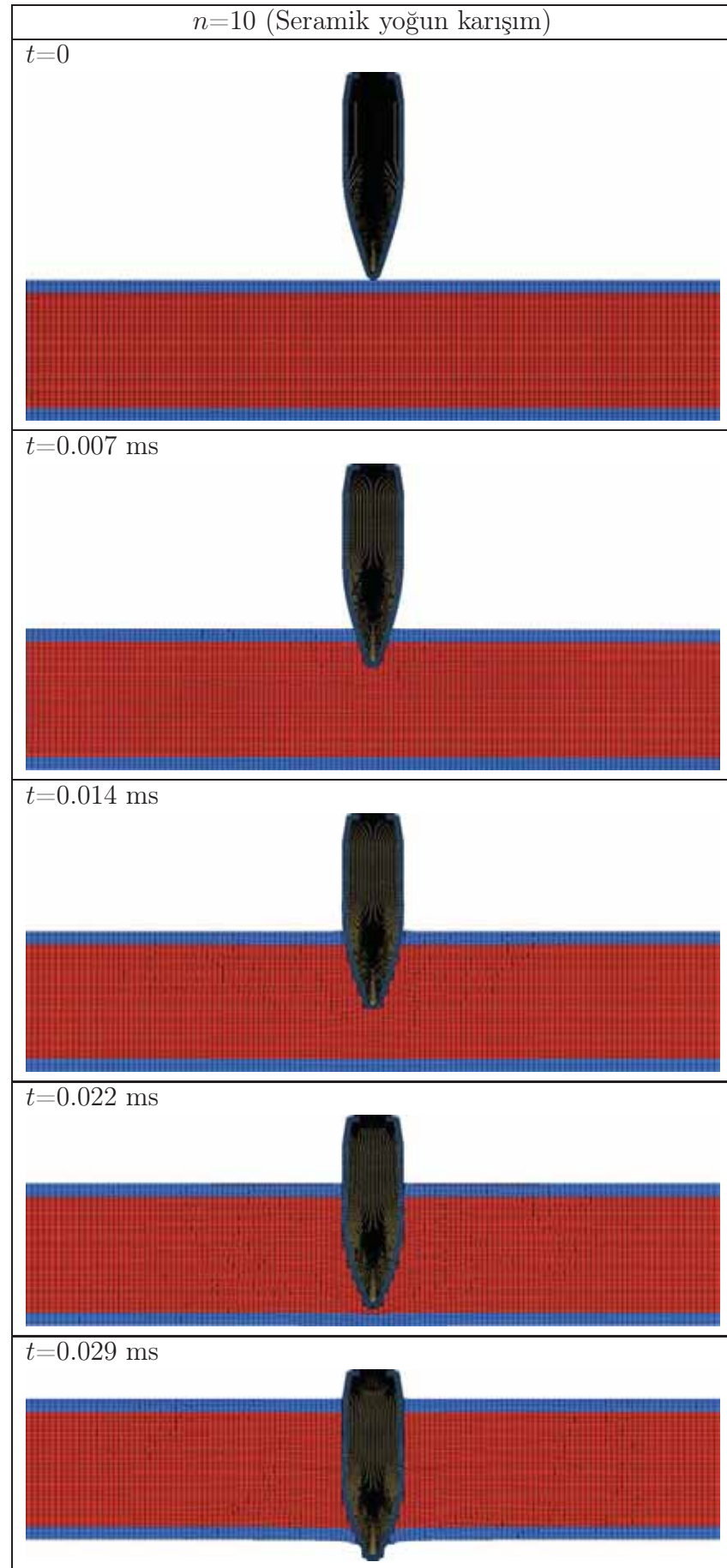
Şekil 3.17. 7.62 mm x 51 fişek ($v = 860m/s$) çarpması sonrasında metal yoğun karışıma ($n = 0.1$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.



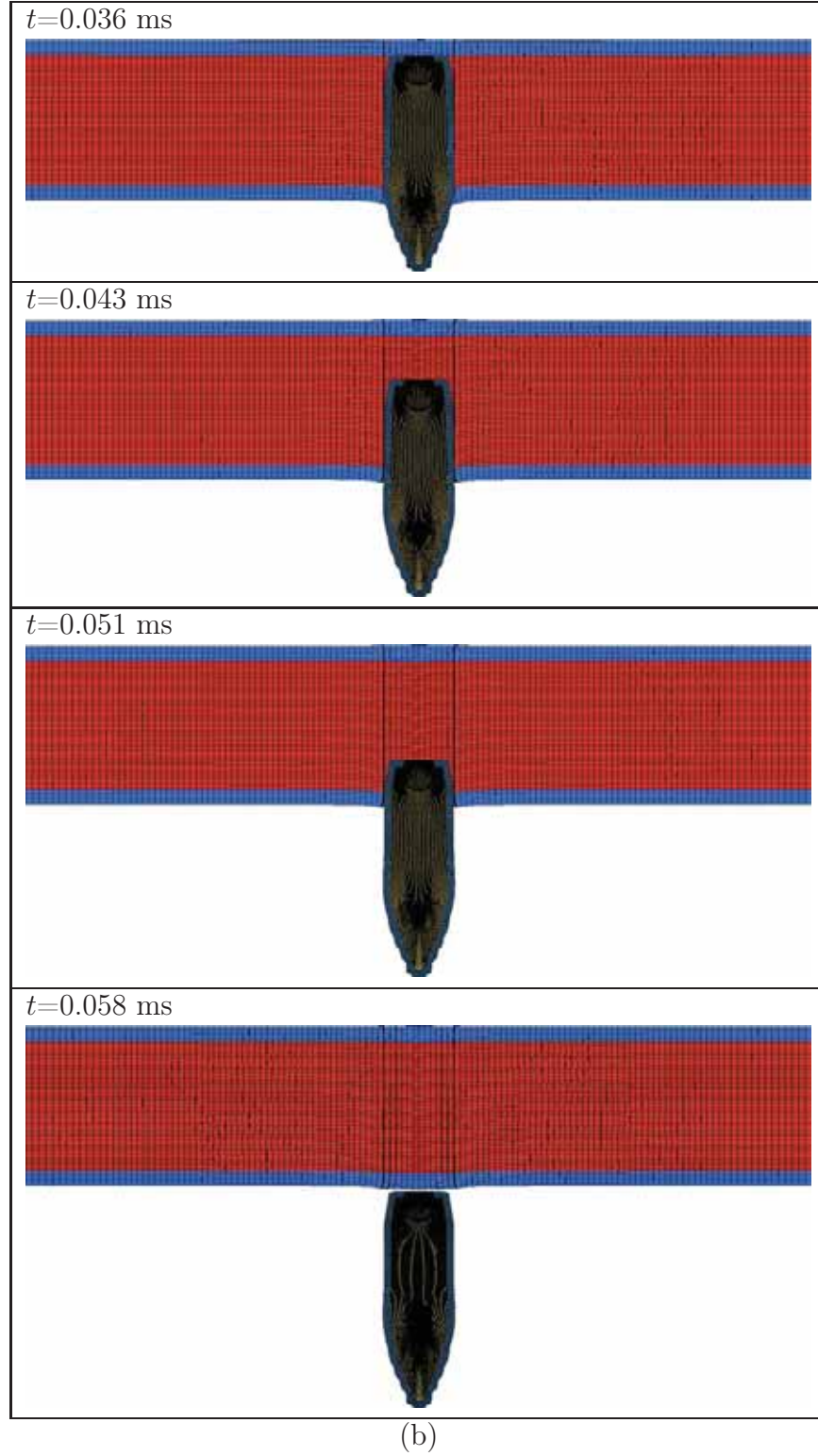
(a)



Şekil 3.18. 7.62 mm x 51 fişek ($v = 860m/s$) çarpması sonrasında lineer karışıma ($n = 1$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.



(a)



Şekil 3.19. 7.62 mm x 51 fişek ($v = 860m/s$) çarpması sonrasında seramik yoğun karışıma ($n = 10$) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada oluşan deformasyon.

4. BÖLÜM

FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ SANDVİÇ PLAKALARIN BALİSTİK TEST SONUÇLARI

4.1. Giriş

Bu bölümde, fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların balistik yükleme atlındaki darbe davranışları, deneysel olarak incelenmiş ve sonuçlar sayısal analizlerle mukayese edilmiştir. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar, Kayseri II. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı tesislerinde bulunan balistik test atölyesinde yapılmıştır. Ateşli silahlar sınıfında olan söz konusu sistem ile farklı geometri ve namlu çıkış hızına sahip 9 mm x 19 Parabellum ve 7.62 mm x 51 normal mermi kullanılarak atışlar yapılmıştır. 9 mm x 19 Parabellum ve 7.62 mm x 51 normal mermi hızları optik hız ölçme sistemi ile ölçülmüş olup sırasıyla 360 m/s ve 860 m/s'dir. Balistik performans çalışmalarında, plakanın balistik limitinin tespit edilmesi önemli bir husustur. Balistik limit ışıık geçecek oranda kısmi nüfuziyetin meydana geldiği durum olarak tariflenebilir. Çalışmada kullanılan silah sistemi barutlu bir sistem olup standart mermi atışları yapabilmektedir. Bu sebeple geniş bir hız aralığının temini mümkün değildir. Her ne kadar mermi kovani içerisinde bulunan barut miktarı değiştirilerek hız değiştirilebilse de bu hız değişimi dar bir aralıkla olmakta ve tekrarlı atışlar için aynı hız değerinin yakalanması da oldukça zordur. Balistik limit tespiti çalışmaları için gaz silah sistemleri (gas-gun) çok daha uygun sistemlerdir. Bu tip test sistemlerinin gaz basıncını istenilen değerde ayarlayabilme ve istenilen hız değerlerinde tekrarlı atış yapılabilme gibi üstünlükleri vardır. Netice itibari ile test sisteminin geniş hız aralığında atış yapabilme kabiliyetinin olmaması sebebiyle fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların balistik limitinin tespit edilmesi mümkün olmamıştır.

Testler %40 nem oranı ve 17°C sıcaklık değerinde gerçekleştirilmiş olup hedef plaka ile lançer arasındaki mesafe zırh dayanım test standartlarına uygun olarak 9 mm x 19 Parabellum mermisi için 5 metre, 7.62 mm x 51 normal mermi için ise 15 metre olarak ayarlanmıştır. Toz istifleme sıcak presleme yöntemi ile üretilen 90 mm çap ve 17 mm kalınlığa sahip alüminyum ve farklı malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar hedef noktasında sabitleme plakaları arasına yerleştirildikten sonra 13cm kalınlığındaki macun bloğun üzerine sabitlenmiş ve lazer işaretçi kullanılarak plaka orta noktalarına atışlar yapılmıştır.

Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda, seramik yoğun tabakaların çarpma yüzeyine yakın olarak yerleştirilmesi sonucu merminin sahip olduğu enerjinin bir kısmı ön yüzeyde bulunan seramiği kırmak için harcanacak ve sert bir yüzeyle karşılaşan mermi kalınlaşarak nüfuziyet gücünü kaybedecektir. Metal oranının arttığı plaka arka yüzeyi ise mermi enerjisinin büyük bir kısmını sönümleyecektir. Bu mekanizma göz önünde bulunarak yapılan balistik testlerde %70 silisyum karbür, %30 alüminyum karışıma sahip katman atış yönünde olacak şekilde konumlandırılmıştır. Güneş ve Özkeş [49], fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların çarpma yükleri altındaki davranışlarını incelemiş ve çarpma yüzeyinin seramikten metale doğru olarak kademelendiği durumda daha yüksek darbe dayanımının elde edildiğini göstermişlerdir. Literatürdeki zırh balistiği üzerinde yapılan diğer çalışmalarda da seramik katmanın ön yüz malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir [41, 50–53].

4.2. 9 mm x 19 Parabellum Mermi Balistik Test Sonuçları

9 mm x 19 Parabellum mermi ile yapılan balistik testlerde ($v = 360m/s$) plakalarda perforasyon gerçekleşmemiş olup alüminyum ve seramik zengin karışıma sahip plakalarda mermi plaka içerisine nüfuz etmiştir. Şekil 4.1’de 9 mm x 19 Parabellum mermi isabeti altında plaka ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyon görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde mermi alüminyum plaka içerisine nüfuz etmiş ve plaka içerisinde kalmıştır. Alüminyum plaka arka yüzeyinde ise şişme vardır. Çarpma yüküne maruz plakalarda kalınlık boyunca bir şok dalgası oluşur. Bu şok dalgası plaka ön yüzeyinde basma gerilmesi oluştururken arka yüzeye ulaşan

bu dalgalar çekme gerilmesine sebebiyet verirler. Eğer plaka arka yüzeyinde oluşan çekme gerilmeleri plakanın akma dayanımından daha yüksek değerlere ulaşırsa malzemenin kırılmasına sebep olurlar. Alüminyum ve metal yoğun karışıma sahip plaka arka yüzeyinde oluşan radyal çatlaklarda bu duruma örnektir.

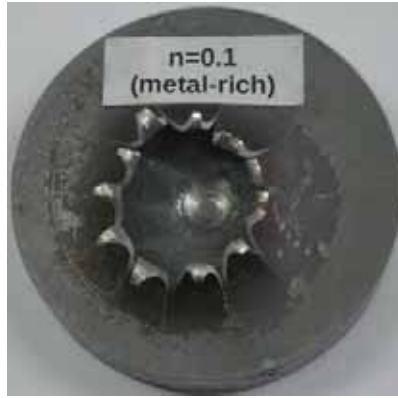
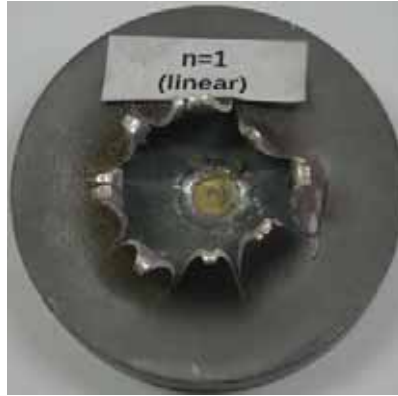
Metal zengin karışıma sahip plakada mermi, çarpma yüzeyinde bulunan alüminyum katmanını delmiş ancak %70 silisyum karbür, %30 alüminyum karışıma sahip katman merminin nüfuziyetini engellemiştir. Plaka arka yüzeyinde oluşan şişme alüminyum plakaya oranla daha az olmuştur. Lineer karışıma sahip plakada da metal zengin karışıma sahip plakaya benzer davranış olup plaka arka yüzeyinde oluşan şişme en düşük seviyededir ve plaka arka yüzeyinde çatlak oluşmamıştır. Lineer karışıma sahip plakanın diğer plakalara göre daha yüksek balistik dayanım gösterdiği söylenebilir. Seramik zengin karışıma sahip plaka da isabet sonrası delinmiş fakat mermi hedef plaka içerisinde kalmıştır. Bu kompozisyon için balistik limit değeri 360 m/s olarak kabul edilebilir.

Balistik testler sonrası katmanlar arası yapıyı görmek amacıyla plakalar epoksi kalıba alınarak çarpma yüzeyine dik doğrultuda kesilmiş ve parlatılmıştır. Şekil 4.2 - Şekil 4.5’de sırasıyla alüminyum, metal yoğun karışım, lineer karışım ve seramik yoğun karışımlara sahip plakalarda 9 mm x 19 Parabellum tabanca mermisinin çarpması sonrasında oluşan deformasyon kesit resimleri ve makro görüntüleri verilmiştir. Alüminyum plakada (Şekil 4.2) mermi plaka kalınlığının yarısına kadar nüfuz etmiş ve plaka arka yüzeyinde radyal çatlaklar oluşmuştur. Metal yoğun plakada (Şekil 4.3) mermi alüminyum katmanı delmiş ve oluşan şok dalgası alüminyum katmanı, altında bulunan katmandan sıyırmıştır. Plakada çarpma yüzeyi altında başlayan çatlak plaka arka yüzeyine kadar ilerlemekte ve arka yüzeye açılmaktadır (d,h). Ayrıca metal yoğun karışım için seramik oranının ani olarak azaldığı %70 silisyum karbür %30 alüminyum karışıma sahip katman ile altındaki katman arasında delaminasyon olduğu görülmektedir (a,b,c,e,f,g). Lineer karışıma sahip plakada (Şekil 4.4) metal yoğun plakada olduğu gibi mermi alüminyum katmanı delmiş ve oluşan şok dalgası alüminyum katmanı altında bulunan katmandan sıyırmıştır. Bu plakada da %70 silisyum karbür, %30 alüminyum karışıma sahip katman ile altındaki katman arasında delaminasyon

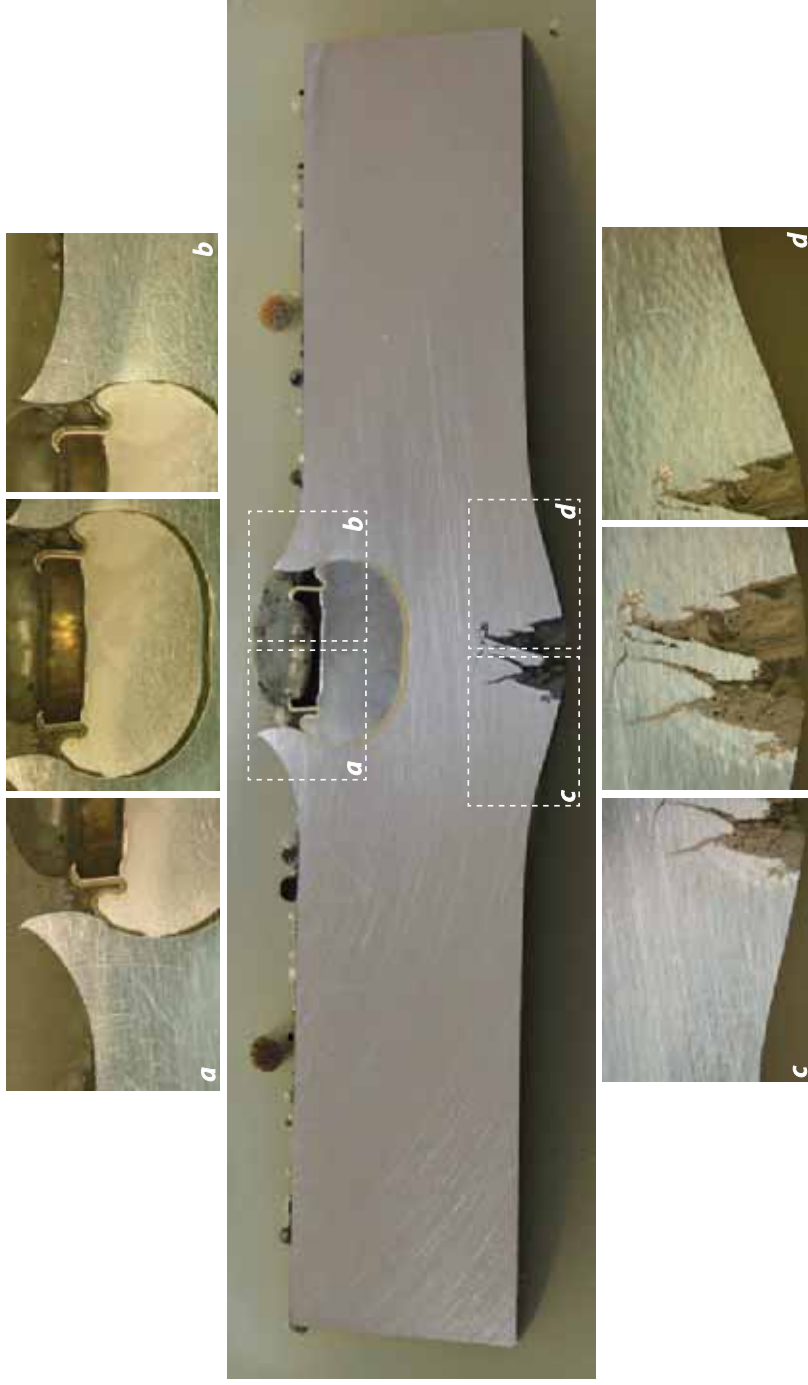
oluştugu gör÷lmekte (a,b,c,d,e,f) olup plaka arka yüzeyinde çatlak oluşmamıştır (g). Alüminyum katman altındaki seramik yoğun katman konik bir şekilde deforme olarak arkasında bulunan katmana gelecek olan basma kuvvetini daha geniş bir alana yaymış, buda deformasyonu azaltmıştır. Seramik yoğun plakada (Şekil 4.5) mermi plakayı delmiş fakat perforasyon oluşmamıştır. Bu durum plakada alüminyum oranının az olması sebebiyle yapının daha kırılğan davranması ve silisyum karbür tozları ile alüminyum tozları arasındaki bağ kuvvetinin azalması şeklinde açıklanabilir. Alüminyum katmanın, altında bulunan katmandan sıyrılması diğer plakalara göre daha az olmasına karşın (b,c) katmanlar arası delaminasyon bölgeleri daha fazladır (f,g,i,j,k).

ÖN YÜZ

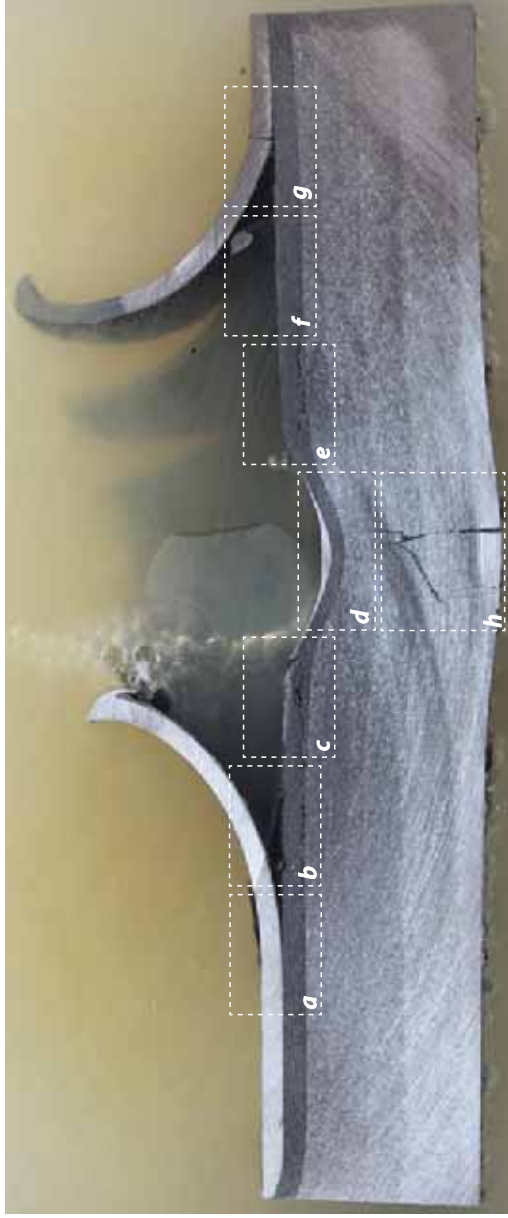
ARKA YÜZ

a) n =Alüminyum plakab) $n=0.1$ (Metal zengin plaka)c) $n=1$ (Lineer karışımli plaka)c) $n=10$ (Seramik yoğun plaka)

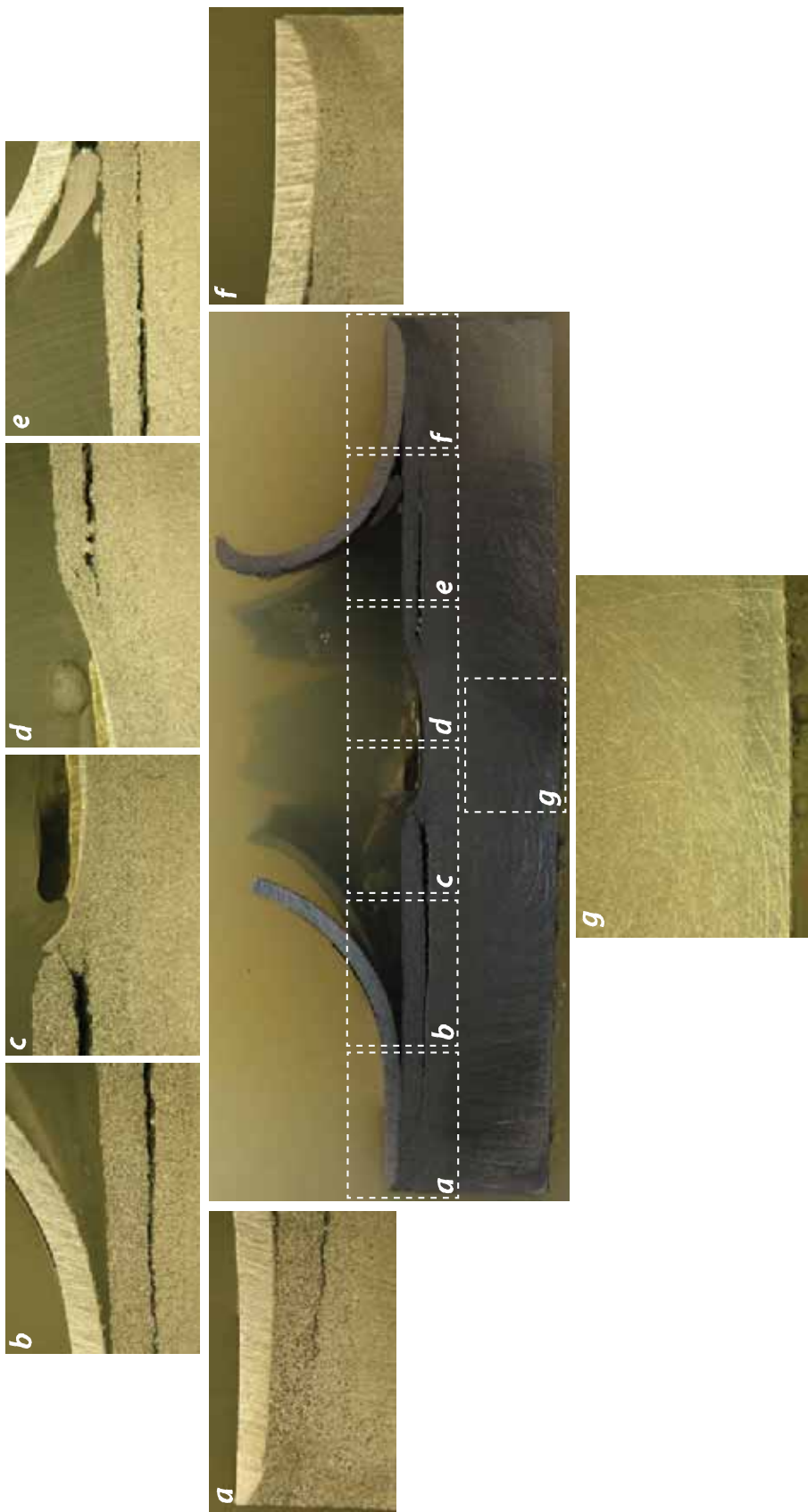
Şekil 4.1. 9 mm x 19 Parabellum mermi isabeti altında plaka ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyon.



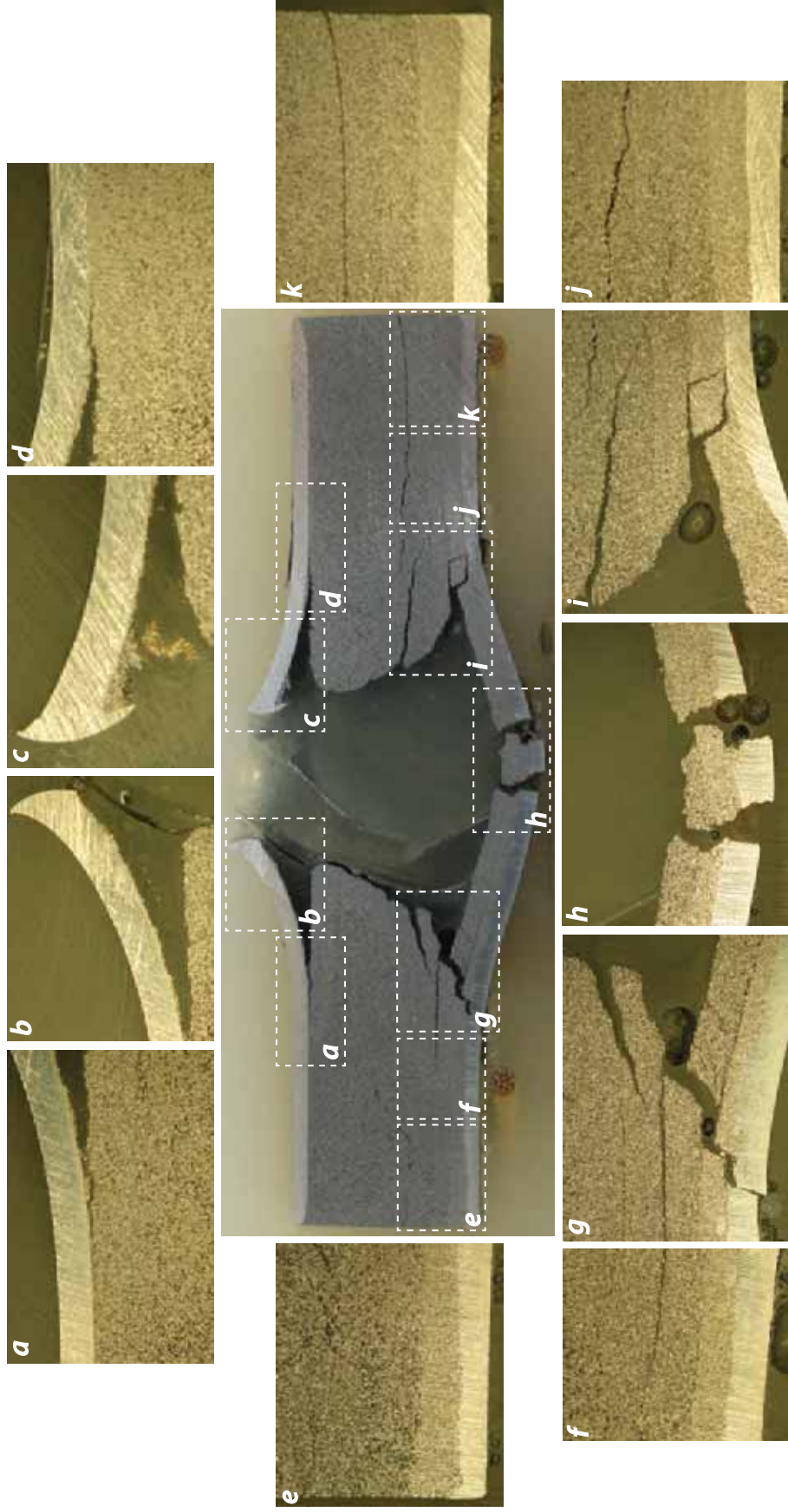
Şekil 4.2. 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi çarpması sonrası alüminyum plaka deformasyonu makro görüntüleri.



Şekil 4.3. 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişegi çarpması sonrası metal zengin (n=0.1) fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka deformasyonu makro görüntüleri.



Şekil 4.4. 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişği çarpması sonrası lineer karışım ($n=1.0$) fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka deformasyonu makro görüntüleri.



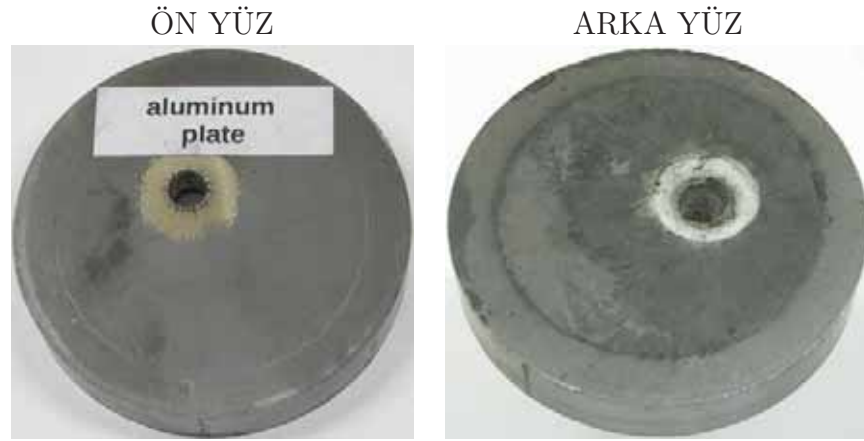
Şekil 4.5. 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişği çarpması sonrası seramik zengin ($n=10$) fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka deformasyonu makro görüntüleri.

4.3. 7.62 mm x 51 Mermi Balistik Test Sonuçları

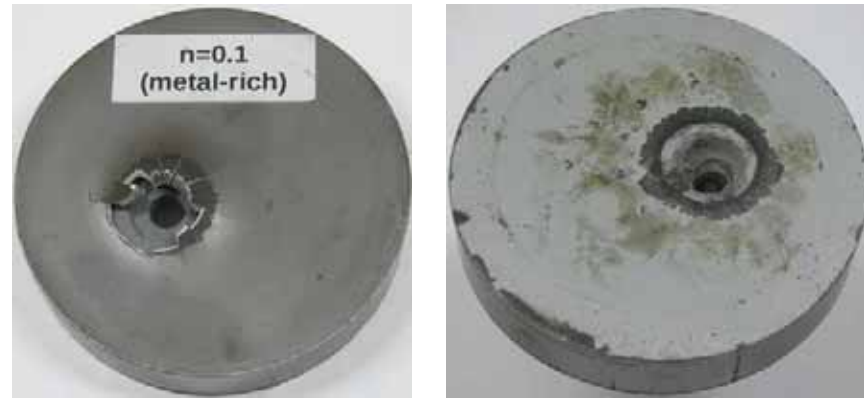
MIL-STD-662F standardında tam nüfuziyet, merminin hedefe çarpma sonrasında, merminin, mermiye ait bir parçacığın veya hedef malzemesine ait bir parçacığın şahit plakayı delmesi olarak tanımlanır. 7.62 mm x 51 mermi ile yapılan balistik testlerde ($v = 860m/s$) bütün plakalarda delinme gerçekleşmiş ve mermi macun bloğu da delerek ortamı terk etmiştir. Yine aynı standartta, adyabatik kayma şeklinde meydana gelen hasar sonucunda, merminin yaklaşık olarak kendi çapına yakın bir hedef parçasını hedeften kopararak ayırması "plug oluşumu" olarak tanımlanır. Şekil 4.6'da 7.62 mm x 51 mermi isabeti altında plaka ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyon görüntülerinden de anlaşıldığı üzere bütün plakalarda mermi plaka üzerinden plaka arka yüzeyine doğru genişleyen konik bir parçayı koparmıştır.

Balistik testler sonrası katmanlar arası yapıyı görmek amacıyla plakalar epoksi kalıba alınarak çarpma yüzeyine dik doğrultuda kesilmiş ve parlatılmıştır. Şekil 4.7 - 4.10'da sırasıyla alüminyum, metal yoğun karışım, lineer karışım ve seramik yoğun karışımlara sahip plakalarda 7.62 mm x 51 mermi çarpması sonrasında oluşan deformasyon kesit resimleri ve makro görüntüleri verilmiştir. Bütün plakalarda tam delinmenin olduğu testlerde plakaların ihtiva ettiği seramik oranının artmasıyla katmanlar arası delaminasyon ve arka yüz deformasyon çapının arttığı görülmektedir.

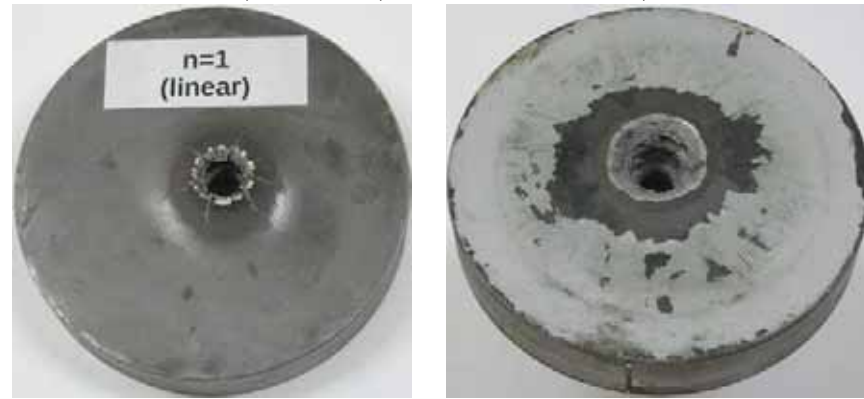
Her ne kadar plaka arka yüzeyinden çıkan mermi hızı tespit edilememiş olsa da sayısal analizlerden faydalanarak, artan seramik oranı ile plaka kalınlığı boyunca mermi hızı düşüşünün arttığı söylenebilir. Yapılan balistik testlerde de artan seramik oranı ile yapıyı oluşturan katmanlar arası oluşan delaminasyon bölgelerinin artması, azalan mermi hızı ile hasar mekanizmasının yatay doğrultuda genişlemek için zaman bulduğunun bir sonucu olarak yorumlanabilir.



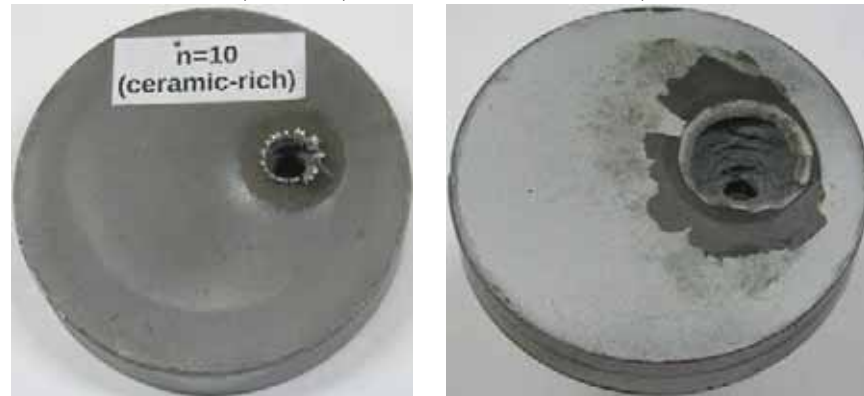
a) n =Alüminyum plaka



b) $n= 0.1$ (Metal zengin plaka)

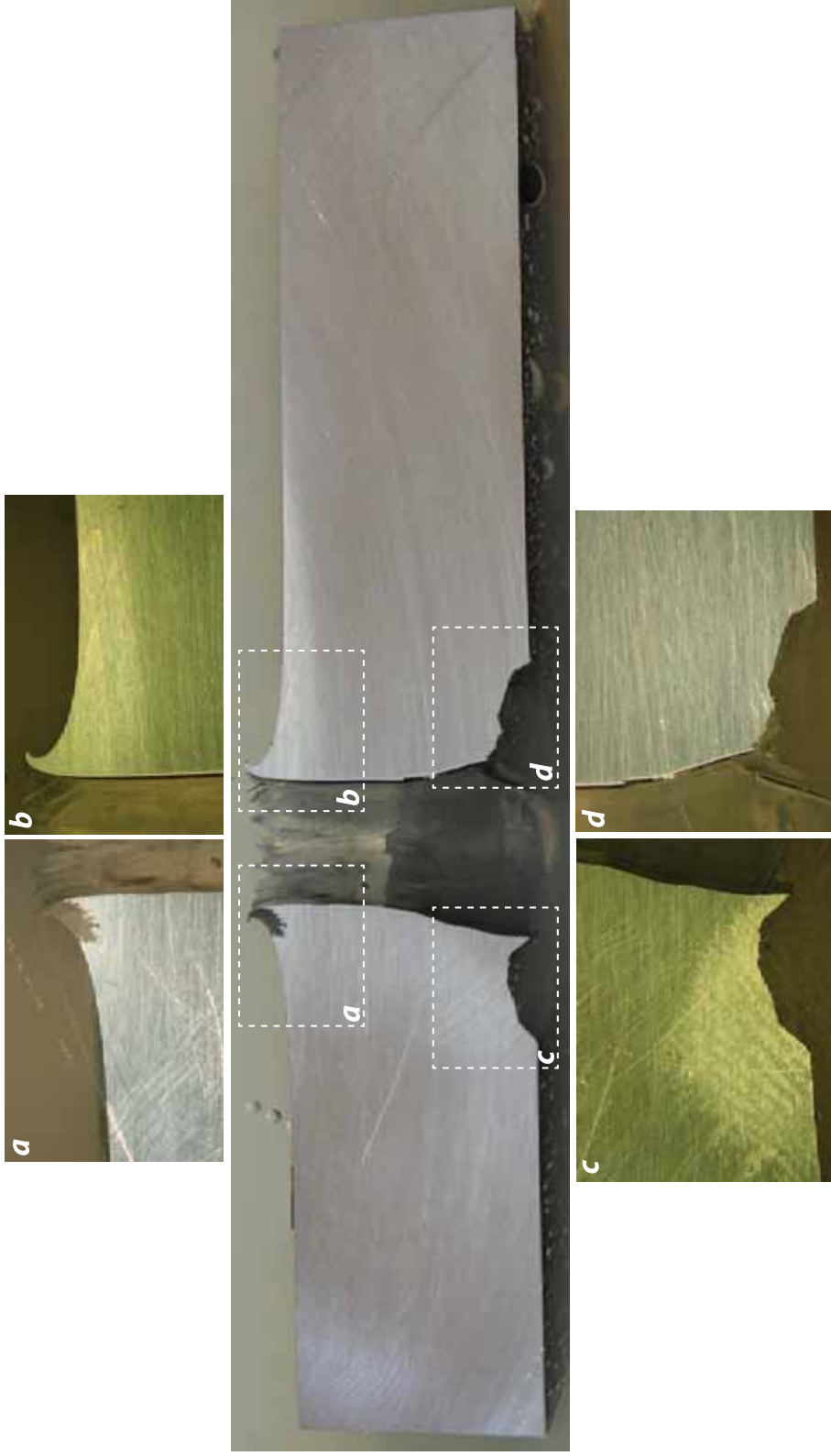


c) $n=1$ (Lineer karışımli plaka)

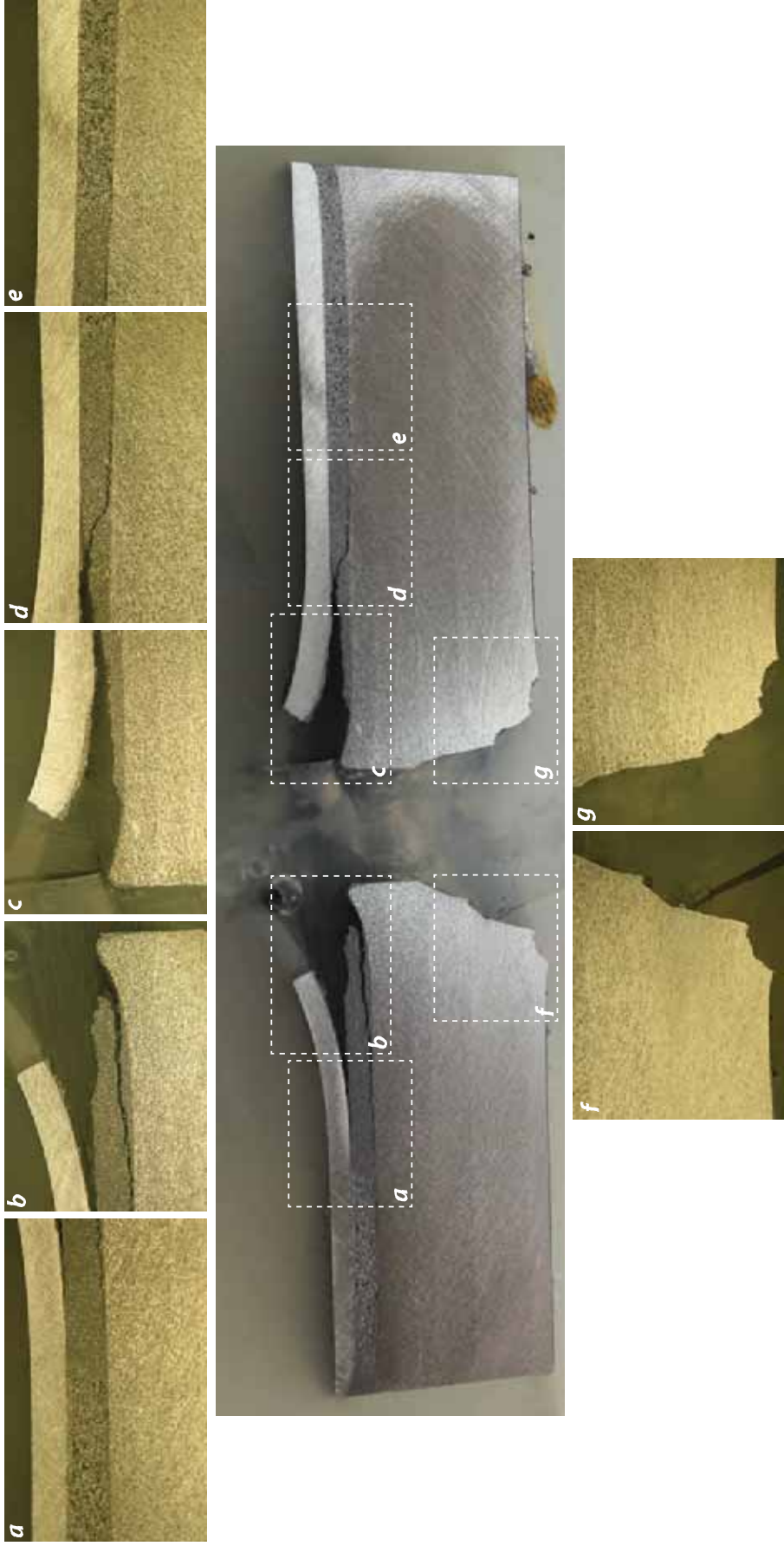


c) $n=10$ (Seramik yoğun plaka)

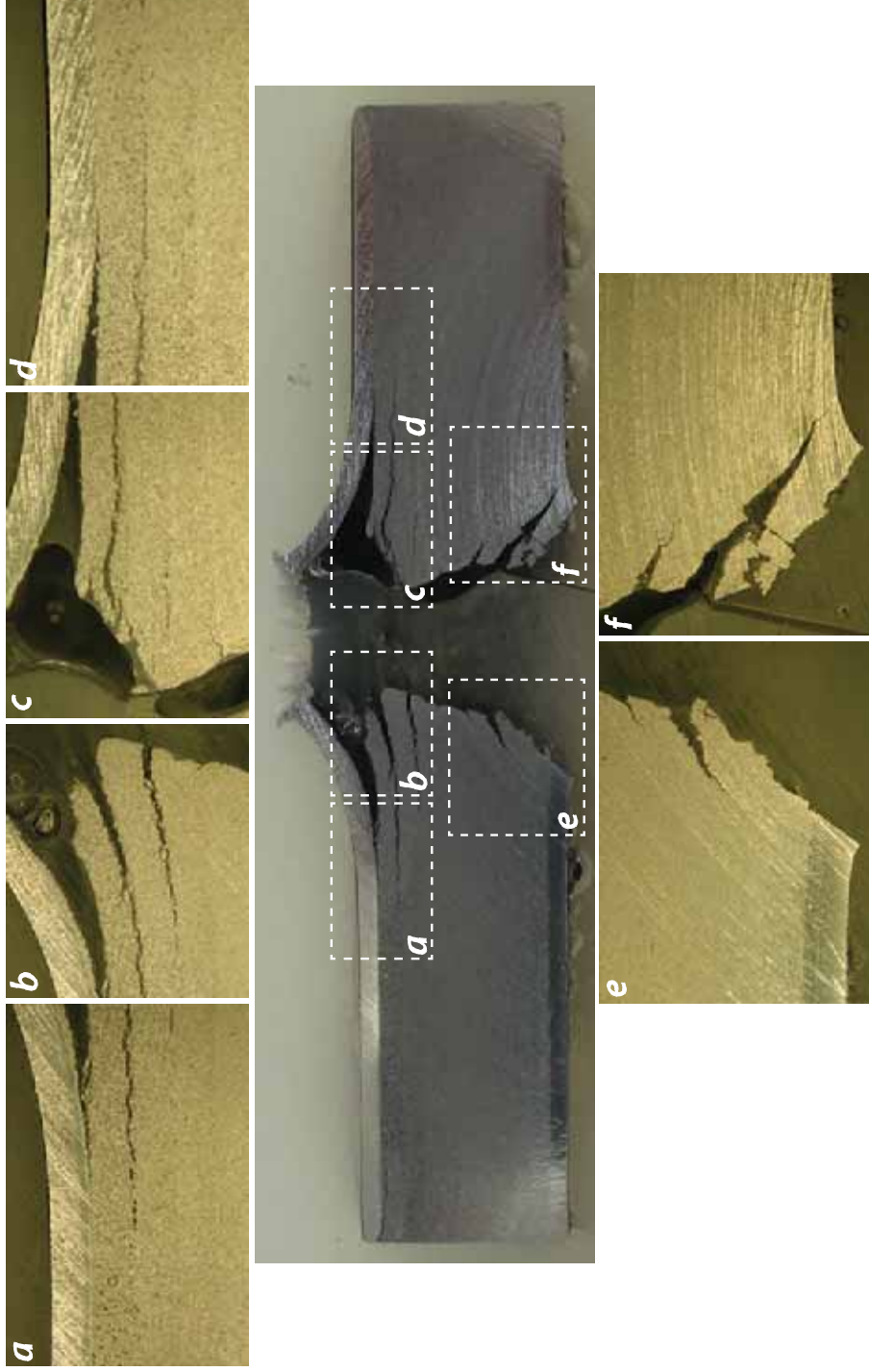
Şekil 4.6. 7.62 mm x 51 mermi isabeti altında plaka ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyon.



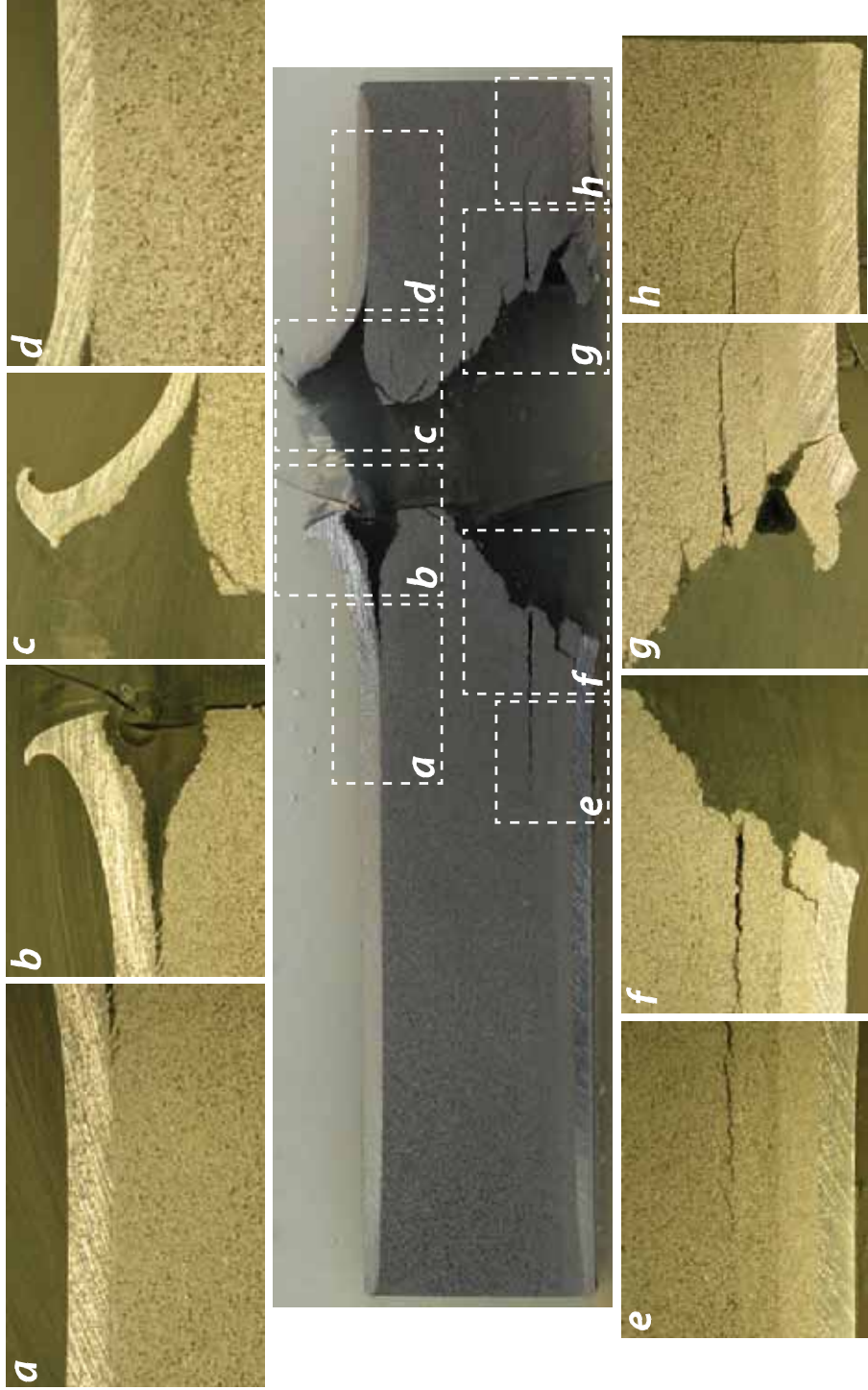
Şekil 4.7. 7.62 mm x 51 fışek çarpması sonrası alüminyum plaka deformasyonu makro görüntüleri.



Şekil 4.8. 7.62 mm x 51 fişek çarpması sonrası metal zengin ($n = 0.1$) fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka deformasyonu makro görüntüleri.



Şekil 4.9. 7.62 mm x 51 fişek çarpması sonrası linear karışım ($n = 1.0$) fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka deformasyonu makro görüntüleri.



Şekil 4.10. 7.62 mm x 51 fışek çarpması sonrası seramik zengin ($n = 10$) fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka deformasyonu makro görüntüleri.

4.4. Sayısal ve Deneysel Sonuçların Mukayesesi

Balistik testlerin yapıldığı Kayseri II. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı tesislerinde bulunan balistik test atölyesinde terminal balistik açısından kritik öneme sahip olan, merminin plakaya giriş ve çıkış enerji değerlerinin ölçülememesi sebebiyle sayısal çalışmalar ile deneysel çalışmaların mukayesesi ancak hasar yüzeyleri ve kesitleri değerlendirilerek yapılabilecektir. Ayrıca dinamik yükleme altında fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakayı oluşturan her bir katmana ait yüksek gerinim oranlarındaki davranışların Split-Hopkinson test cihazı ile tespit edilememiş olması da sayısal modelin başarısını kısmen olumsuz etkilemiştir.

Balistik test şartlarına benzer olarak geliştirilen sayısal modelin başarısı ilk olarak alüminyum plaka için test edilmiş ve sayısal sonuçların deneysel sonuçlar ile her iki mermi tipi için uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 4.2, 4.7). Söz konusu uyumluluğun en önemli sebebi alüminyumun malzeme modeli kartındaki C ve P parametrelerinin (Cowper-Symonds sabitleri) bilinmesidir. Bu parametreler ile alüminyumun yüksek gerinim oranlarındaki davranışının analize dahil edilmesi mümkün olmuştur.

9 mm x 19 Parabellum mermisi ile yapılan analizlerde (Şekil 4.1) mermi alüminyum plaka tarafından tutulurken üç farklı kompozisyona sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda tam delinme olmuştur. Halbuki deneysel testlerde fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar alüminyuma kıyasla oldukça yüksek balistik dayanım göstermiştir. Buradaki fark sayısal analizlerde gerinme oranı parametrelerinin ihmal edilmesinin bir sonucudur. Bu sonuç, analizlere temsili olarak dahil edilen gerinim oranı parametreleri kullanılarak yapılan analiz sonuçlarıyla da doğrulanmıştır (Şekil 3.12-3.14).

7.62 mm x 51 mermi ile yapılan analizler için de yukarıda bahsi geçen durum geçerlidir. Bu analizlerde mermi hızının oldukça yüksek bir değere sahip olması sebebiyle deformasyon çok hızlı gelişmekte ve plaka mevcut yüklemeye cevap verecek süre bulamamaktadır. Plakarda seramik oranının artması sonucu yapı kırılgan bir davranış sergilemekte ve tanecikler arası bağ enerjisinin aşılmasıyla plaka süneklik

göstermeyip tanecikler birbirinden ayrılarak saçılmalara neden olmaktadır. Sayısal analizlerde mermi enerjisinin seramik oranının artmasıyla azaldığı görülmektedir. Her ne kadar deneysel testlerde bu enerji azalmasının ölçülmesi mümkün olmamış olsa da plaka kesit görüntüleri incelendiğinde artan seramik oranı ile plakada oluşan delaminasyonların artması gerilme dalgalarının yanal yönde ilerlemesinin sonucudur. Bu da mermi enerji değerinin artan seramik oranı ile azaldığının bir göstergesidir.

5. BÖLÜM

TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER

"Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Balistik Davranışı" isimli bu tez çalışmasında, fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların, sayısal olarak analizleri yapılmış ve sonuçların deneysel olarak doğrulanması amaçlanmıştır. Sayısal analizlerde lineer olmayan davranışa neden olan geometri, malzeme ve temas sonrasındaki etkileşimin karakterleri dikkate alınmıştır.

Analizler farklı hız ve geometrilere sahip iki tip mermi ile modellenerek gerçekleştirilmiş, gerek sayısal gerekse deneysel analizler dört farklı malzeme kompozisyonu için (Alüminyum, metal yoğun ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik yoğun ($n = 10$)) tekrarlanmıştır. Sayısal analizler için bir sonlu elemanlar paket programı olan LS-DYNA kullanılmıştır. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar seramik yoğun yüzey, çarpma yüzeyine yakın olacak şekilde konumlandırılarak merkezi çarpma yüküne maruz bırakılmıştır.

Seramik (SiC) ve metal (Al) bileşenlerden oluşan sandviç plakaların kompozisyonu kalınlık boyunca değişmektedir. Seramik ve metal katmanlar arasında kalan, fonksiyonel kademelendirilmiş bölgenin mekanik özelliklerinin, plaka kalınlığı boyunca sürekli olarak bileşenlerin hacimsel oranlarındaki değişime bağlı olarak bir kuvvet kanununa göre değiştiği varsayılmıştır. Analizlerde iki farklı bileşene sahip yapılarda bileşenlerin, tek eksenli gerilme-şekil değiştirme değerlerini kullanarak nihai malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrisinin oluşturulması için geliştirilmiş TTO model kullanılarak elasto-plastik davranışlar modellenmiştir.

Sayısal analizlerde, deneysel test şartları dikkate alınarak geliştirilen sayısal modelde plastik kinematik malzeme modeli kullanılmıştır. Geliştirilen sayısal

modelin doğru çalıştığını test etmek amacıyla ilk olarak model alüminyum plaka için uygulanmıştır. Alüminyum plakaya ait malzeme özelliklerinin tespiti için fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar ile aynı üretim şartlarında toz sinterlemesi yöntemi ile üretilen alüminyum 6061 test numuneleri çekme testine tabi tutulmuş ve yüksek gerinim oranını probleme dahil edecek C ve P parametreleri ise (Cowper-Symonds sabitleri) literatürden alınmıştır. Analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla doğrulanması neticesinde sayısal modelin geçerliliği doğrulanmıştır. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar için kademelendirilmiş bölgedeki malzeme özellikleri TTO model kullanılarak hesaplanmıştır. Plakanın yüksek hızda dinamik davranışının modellenebilmesi için gerekli olan, her bir katmana ait yüksek gerinme oranlarında gerilme şekil değiştirme eğrilerinin deneysel olarak elde edilememesi sebebiyle C ve P parametreleri alüminyum harici katmanlar için ihmal edilmiş buda sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasındaki uyumsuzluğun en önemli sebebi olmuştur. Temsili C ve P parametreleri alınarak 9 mm x 19 mermi tipi için tekrarlanan analizlerde (Şekil 3.12-3.14), gerinim oranının plaka davranışı üzerinde oldukça etkili olduğu da gösterilmiştir.

Alüminyum, metal yoğun, lineer ve seramik yoğun malzeme kompozisyonlarına sahip plakalar için yapılan balistik testlerde, değişen mermi enerjisine bağlı olarak penetrasyon, perforasyon davranışları ve plakalarda meydana gelen hasar yapısı incelenmiştir. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalarda ön yüzeyde bulunan alüminyum, çarpma sonrası kırılğan bir yapıya sahip seramik katmanın parçalanmasını engellemiştir. Seramik yoğun katman merminin kinetik enerjisini azaltmakta ve arka yüzeydeki metal ise kalan enerjiyi sönmülemektedir.

Balistik testler Kayseri II. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı tesislerinde bulunan balistik test atölyesinde farklı mermi tipi ve farklı hızlarda yapılmıştır. 9 mm x 19 Parabellum ve 7.62 mm x 51 normal mermi kullanılarak yapılan atışlarda optik hız ölçme sistemi ile ölçülen mermi hızları sırasıyla 360 m/s ve 860 m/s'dir. Bu hız değerleri tekrarlı atışlarda ölçülen mermi hızlarının aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmış ve sayısal analizlerde de bu hız değeri kullanılmıştır.

Balistik testlerde 360 m/s hız değerine sahip 9 mm x 19 Parabellum mermisi,

üç farklı malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plaka tarafından durdurulmuş ancak 7.62 mm x 51 mermi tipi için üç plakada da tam delinme gerçekleşmiştir. Balistik performans testlerinde belirlenmesi gereken önemli parametrelerden biride balistik limit değeridir. Bu değerin tespit edilebilmesi için geniş bir hız aralığında atış yapabilme kabiliyetine sahip bir silah sistemi gerekmektedir. Testlerde kullanılan mermi hızları arasında 500 m/s'lik bir hız farkı bulunması sebebiyle her bir plaka için bu limit değerin hesaplanması mümkün olmamıştır. Balistik performans değerlendirmesinde bu tip patlamalı silahlarda barut haddi değiştirilerek ancak sınırlı sayıda farklı hızlar elde edilebilir dolayısıyla balistik limit net olarak belirlenemez. Test numunelerinden seramik zengin plaka için 9 mm x 19 mermi tipi ile yapılan atışlarda mermi plaka içerisine nüfuz etmiş ancak tam delinme gerçekleşmemiştir, dolayısıyla bu kompozisyona sahip bir plakanın balistik limit değeri 360 m/s kabul edilebilir. Metal yoğun ve lineer karışıma sahip plakalar için balistik limit değeri bu iki hız aralığında olacaktır.

Kademelendirilmiş yapı içerisinde malzeme özelliklerindeki değişimin yumuşak bir geçişe sahip olması katman kalınlıklarını ince olması ile mümkündür. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların üretim tekniklerinden toz istifleme sıcak presleme yöntemi ile katman kalınlıklarının gelişmiş yöntemlere kıyasla daha kalın olması sebebiyle (Tablo 2.1), katmanlar arası mekanik özelliklerin değişimi ani olmaktadır. Bu çalışma kapsamında 11 katman olarak üretilen plakaların ortalama katman kalınlıkları 1.5 mm'dir. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda balistik testler sonucu oluşan delaminasyon bölgelerinin genelde katman geçiş sınırlarında oluşması katman kalınlığı ile doğrudan ilişkilidir. Bu üretim tekniğinde katman kalınlığının düşürülmesi ise ancak plaka çapının düşürülmesi ile mümkündür, çünkü üretilecek plakanın çapının artmasıyla, katmanı oluşturacak toz karışımın eşit kalınlıkta serilmesi zorlaşmaktadır. Plaka çapının küçültülmesinin ise balistik test standartları gereği uygun olmayacağından söz konusu plakaların üretim yöntemi değiştirilebilir.

Sonuç olarak bu tez çalışması, değişen malzeme kompozisyonu ile plakaların balistik darbe yüküne karşı vermiş oldukları cevap ve hasar mekanizmalarının değiştiğini açık bir şekilde ortaya koymuştur. Bu nedenle doğru fonksiyonel yapının tasarlanması ve optimum kalınlığın tespiti fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların balistik amaçlar

için kullanılabilirliği açısından en önemli faktördür.

Bu çalışmadan ilham alınarak, farklı seramik ve metal bileşenlerin kullanarak üretilecek plakaların performans değerlendirmesi, fonksiyonel kademelendirilmiş yapılar için bir hasar modelinin geliştirilmesi, kademelendirilmiş bölgenin yüksek gerinim oranlarında mekanik özelliklerinin tespiti ve gaz silah sistemi gibi geniş hız aralıklarında atış yapabilen bir silah ile plakaların balistik limitinin belirlenmesi yapılabilecek ileri çalışmalar olarak değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Suresh, S. and Mortensen, A., 1998. Fundamentals of functionally graded materials: processing and thermomechanical behaviour of graded metals and metal-ceramic composites, Matsci Series, IOM Communications Ltd.
2. Kieback, B., Neubrand, A., and Riedel, H., 2003. Processing techniques for functionally graded materials, **Materials Science and Engineering: A**, **362**(1-2):81 – 106.
3. Evci, C., 2009. Seramik kompozit zırh sistemlerinin darbe ve balistik özelliklerinin belirlenmesi, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi.
4. NIJ Standard 0101.03, Ballistic Resistance of Personal Body Armor, 1987.
5. NATO STANAG 4569, Protection levels for occupants of logistic and light armoured vehicles, 2004.
6. Rosenberg, Z. and Dekel, E., 2012. Terminal Ballistics, Springer.
7. Hallquist, J.O., 2006. LS-DYNA Theory Manual, California.
8. Cihangiroğlu, B., 2011. Adli Bilimler I, Jandarma Kriminal Daire Başkanlığı Yayınları.
9. Üner, B. and İsmail Çakır, 2007. Adli Balistik, Arıkan Basım Yayın Dağıtım.
10. Alper, İ. and Çoruhlu, A., 2006. Silah Sistemleri ve Balistik Ders Kitabı, Kara Kuvvetleri Komutanlığı Kara Harp Okulu Komutanlığı.
11. Gooch, W.A., 2002. An Overview Of Ceramic Armor Applications, The American Ceramic Society.
12. Charles, A., 2001. Developing an ultra-lightweight armor concept, in IV. International Conference on Advanced Ceramics and Glass, 485–498.
13. Orlovskaya, N., 2003. Design and manufacturing B4C-SiC layered ceramics for armor applications, in 105th Annual Meeting of The American Ceramic Society, 59–70.

14. Backman, M.E. and Goldsmith, W., 1978. The mechanics of penetration of projectiles into targets, **International Journal of Engineering Science**, **16**(1):1 – 99.
15. Cheeseman, Jensen, B.A., Hoppel, R., and Christopher, 2004. Protecting the future force: advanced materials and analysis enable robust composite armor, **AMPTIAC Quarterly**, **8**:37–46.
16. Ceyhun, V. and Turan, M., 2003. Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı, **Mühendis ve Makina**, **516**:1–11.
17. Tiberkak, R., Bachene, M., Rechak, S., and Necib, B., 2008. Damage prediction in composite plates subjected to low velocity impact, **Composite Structures**, **83**(1):73 – 82.
18. Lam, K. and Sathiyamoorthy, T., 1999. Response of composite beam under low-velocity impact of multiple masses, **Composite Structures**, **44**(2–3):205 – 220.
19. Gonçalves, D., de Melo, F., Klein, A., and Al-Qureshi, H., 2004. Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **44**(2–3):307 – 316.
20. Liu, D., Raju, B.B., and Dang, X., 2000. Impact perforation resistance of laminated and assembled composite plates, **International Journal of Impact Engineering**, **24**(6–7):733 – 746.
21. Wang, B. and Chou, S., 1997. The behaviour of laminated composite plates as armour, **Journal of Materials Processing Technology**, **68**(3):279 – 287.
22. Karamis, M., Nair, F., and Tasdemirci, A., 2004. Analyses of metallurgical behavior of Al-SiCp composites after ballistic impacts, **Composite Structures**, **64**(2):219 – 226.

23. Babaei, B., Shokrieh, M.M., and Daneshjou, K., 2011. The ballistic resistance of multi-layered targets impacted by rigid projectiles, **Materials Science and Engineering: A**, **530**(0):208 – 217.
24. Feli, S. and Asgari, M., 2011. Finite element simulation of ceramic/composite armor under ballistic impact, **Composites Part B: Engineering**, **42**(4):771 – 780.
25. Tasdemirci, A., Tunusoglu, G., and Güden, M., 2012. The effect of the interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armors: Experimental and numerical study, **International Journal of Impact Engineering**, **44**(0):1 – 9.
26. Yang, Y., 2000. Time-dependent stress analysis in functionally graded materials, **International Journal of Solids and Structures**, **37**(51):7593 – 7608.
27. Matsunaga, H., 2009. Stress analysis of functionally graded plates subjected to thermal and mechanical loadings, **Composite Structures**, **87**(4):344 – 357.
28. Han, X., Xu, D., and Liu, G.R., 2002. Transient responses in a functionally graded cylindrical shell to a point load, **Journal of Sound and Vibration**, **251**:783–805.
29. Jr., L.L.M., 2006. Functionally gradient metal matrix composites: Numerical analysis of the microstructure–strength relationships, **Composites Science and Technology**, **66**(11–12):1873 – 1887.
30. Bruck, H.A., 2000. A one-dimensional model for designing functionally graded materials to manage stress waves, **International Journal of Solids and Structures**, **37**(44):6383 – 6395.
31. Chin, E.S., 1999. Army focused research team on functionally graded armor composites, **Materials Science and Engineering: A**, **259**(2):155 – 161.
32. Kleponis, D.S., Mihalcin, A.L., and Filbey, G.L., 2000. Material design paradigms for optimal functional gradient armors, in 14th Engineering Mechanics Conference, University of Texas at Austin, Austin, TX.

33. Gooch, W.A. and Burkins, M.S., 2001. Development and ballistic testing of a functionally gradient ceramic/metal applique, **Cost Effective Application of Titanium Alloys in Military Platforms**.
34. McCauley, W., J., D'Andrea, G., Cho, K., Burkins, M.S., Dowding, R.J., Gooch, J., and A., W., 2004. Status report on SPS TiB₂/TiB/Ti functionally graded materials (FGMs) for armor, in 28th International Cocoa Beach Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites.
35. Templeton, D.W., Gorsich, T.J., and Holmquist, T.J., 2007. Computational study of a functionally graded ceramic-metallic armor, in 23rd International Symposium on Ballistics,.
36. Mori, T. and Tanaka, K., 1973. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions, **Acta Metallurgica**, **21**(5):571 – 574.
37. Benveniste, Y., 1987. A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite materials, **Mechanics of Materials**, **6**(2):147 – 157.
38. Tamura, I., Tomota, Y., and Ozawa, H., 1973. Strength and ductility of Fe-Ni-C alloys composed of austenite and martensite with various strength, in Proceedings of the Third Conference on Strength of Metals and Alloys, volume 1, 611–615.
39. Krieg, R.D. and Key, S., 1976. Implementation of a time dependent plasticity theory into structural computer programs, **Constitutive Equations in Viscoplasticity: Computational and Engineering Aspects**, **20**:125–137.
40. Wu, A., Cao, W., Ge, C., Li, J., and Kawasaki, A., 2005. Fabrication and characteristics of plasma facing SiC/C functionally graded composite material, **Materials Chemistry and Physics**, **91**(2–3):545 – 550.
41. Zhou, M., Xi, J., and Yan, J., 2004. Modeling and processing of functionally graded materials for rapid prototyping, **Journal of Materials Processing Technology**, **146**(3):396 – 402.

42. Muller, P., Mognol, P., and Hascoet, J.Y., 2013. Modeling and control of a direct laser powder deposition process for functionally graded materials (FGM) parts manufacturing, **Journal of Materials Processing Technology**, **213**(5):685 – 692.
43. El-Desouky, A., Kassegne, S.K., Moon, K.S., McKittrick, J., and Morsi, K., 2013. Rapid processing; characterization of micro-scale functionally graded porous materials, **Journal of Materials Processing Technology**, **213**(8):1251 – 1257.
44. Aydın, M., 2009. Düşük hızlı çarpma yükleri altında fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların mekanik davranışlarının incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi.
45. Apalak, M.K., Güneş, R., Aydın, M., and Reddy, J., 2011. Impact performance of Al/Sic functionally graded circular plates, **International Journal of Materials and Product Technology**, **42**:56–65.
46. Belytschko, T., Flanagan, D., and Kennedy, J., 1982. Finite element methods with user-controlled meshes for fluid-structure interaction, **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, **33**(1–3):669 – 688.
47. Campbell, J., 1953. An investigation of the plastic behaviour of metal rods subjected to longitudinal impact, **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, **1**(2):113 – 123.
48. Cowper, G. and Symonds, P.S., 1958. Strain hardening and strain rate effect in the impact loading of cantilever beams, **Brown University, Applied Mathematics Report**.
49. İsmail Özkeş, 2013. Çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların düşük hızlı çarpma yükleri altında mekanik davranışlarının incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi.
50. Krishnan, K., Sockalingam, S., Bansal, S., and Rajan, S., 2010. Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact, **Composites Part B: Engineering**, **41**(8):583 – 593.

51. Ravid, M., Bodner, S.R., and Chocron, S., 2003. Penetration analysis of ceramic armor backed by composite materials, **Ceramic Transactions**, **151**:145–153.
52. Adams, M.A., 2001. Theory and experimental test methods for evaluating ceramic armor components, **Ceramic Transactions**, **134**:139–151.
53. Shockey, D.A. and Marchand, A.H., 2001. Failure phenomenology of confined ceramic targets and impact rods, **Ceramic Transactions**, **134**:385–402.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Murat AYDIN
 Uyruğu : Türkiye
 Doğum Tarihi ve Yeri : 21 Mart 1984 - Kırşehir
 Telefon : 0 352 207 66 66 - 41103
 Belgegeçer : 0 352 437 57 44
 E-posta : aydin@erciyes.edu.tr
 Yazışma Adresi : Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksek Okulu
 Uçak Gövde Motor Bölümü
 38039 - KAYSERİ

EĞİTİM BİLGİLERİ

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı	2009
Lisans	Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü	2007
Lise	Kırşehir Lisesi	2000

MESLEKİ DENEYİM

Yıl	Kurum	Görev
2010 -	Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksek Okulu Uçak Gövde Motor Bölümü	Öğretim Görevlisi
2009 - 2010	Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksek Okulu Uçak Gövde Motor Bölümü	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Güneş R., Aydın M., Apalak M., Reddy J., "Experimental And Numerical Investigations Of Low Velocity Impact On Functionally Graded Circular Plates", Composites: Part B, vol.59, pp.21-32, 2013
2. Güneş R., Aydın M., Apalak M., Reddy J., "The Elasto-Plastic Impact Analysis Of Functionally Graded Circular Plates Under Low Velocities", COMPOSITE STRUCTURES, vol.93, no.2, pp.860-869, 2011
3. Apalak M., Güneş R., Aydın M., Reddy J., "Impact Performance Of Al/Sic Functionally Graded Circular Plates", International Journal of Materials and Product Technology, vol.42, no.1/2, pp.56-65, 2011
4. Güneş R., Aydın M., "Elastic Response Of Functionally Graded Circular Plates Under A Drop-Weight", COMPOSITE STRUCTURES, vol.92, no.10, pp.2445-2456, 2010
5. Güneş R., Apalak M., Aydın M., Reddy J., "Low-Velocity Impact Behaviour Of Functionally Graded Circular Plates", 11. International Symposium on Multiscale, Multifunctional and Functionally Graded Materials, PORTEKİZ, 26-29 Eylül 2010
6. Apalak M., Güneş R., Aydın M., Reddy J., "Impact Performance Of Al/Sic Functionally Graded Circular Plates", 11. International Symposium on Multiscale, Multifunctional and Functionally Graded Materials, PORTEKİZ, 26-29 Eylül 2010
7. Güneş R., Apalak M., Aydın M., "Fonksiyonel Kademelendirilmiş Dairesel Plakaların Düşük Hızlı Darbe Analizi", 16.Ulusal Mekanik Kongresi, KAYSERİ, TÜRKİYE, 22-26 Haziran 2009
8. Güneş R., Apalak M., Aydın M., "Alüminyum Plakaların Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının Deneysel Ve Sayısal Olarak İncelenmesi", 16.Ulusal Mekanik Kongresi, KAYSERİ, TÜRKİYE, 22-26 Haziran 2009
9. Güneş R., Apalak M., Aydın M., "Fonksiyonel Kademelendirilmiş Tek Bindirme Bağlantılı Silindirik Plakaların Burkulma Sonrası Davranışları", Kayseri VII. Havacılık Sempozyumu, KAYSERİ, TÜRKİYE, 15-16 Mayıs 2008