

T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KOORDİNASYON BİRİMİ

**FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ SANDVIÇ PLAKALARIN
BALİSTİK DARBE ETKİSİ ALTINDA LİNEER OLMAYAN MEKANİK
ANALİZLERİ**

Proje No: FDA-2013-4599

Dış Kaynaklı Projeler İçin Acil İhtiyaç Projesi

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:

Doç. Dr. Recep GÜNEŞ
Mühendislik Fakültesi/Makine Mühendisliği Bölümü

Araştırmacılar:

Prof.Dr. Junuthula N. Reddy
Texas A&M Üniversitesi/Makine Mühendisliği Bölümü
Yrd. Doç. Dr. Murat AYDIN
Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi/Uçak Mühendisliği Bölümü
Arş. Gör. Kemal ARSLAN
Mühendislik Fakültesi/Makine Mühendisliği Bölümü

KASIM 2015
KAYSERİ

TEŞEKKÜR

112M917 nolu bu proje Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı (1001) ve FDA-2013-4599 proje kodu ile Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Projeye desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a, Erciyes Üniversitesi'ne ve proje ekibine teşekkür ederim.

ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
1. GİRİŞ	1
1.1 BALİSTİK	1
1.2 PENETRASYON MEKANİĞİ	4
1.3 BALİSTİK LİMİT	7
2. LİTERATÜR ÖZETİ	11
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	16
3.1 BÜNYE İLİŞKİLERİ VE KARIŞIM TEORİSİ	16
3.2 TAMURA-TOMOTA-OZOWA (TTO) MODEL	17
3.3 SONLU ELEMENLAR METODU	19
3.4 FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ SANDVİÇ PLAKALARIN MODELLENMESİ.....	22
3.5 FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ PLAKALARIN ÜRETİMİ	26
3.6 BALİSTİK TEST SİSTEMİ.....	32
3.7 BALİSTİK TESTLERDE KULLANILAN STANDARTLAR	36
4. BULGULAR VE TARTIŞMA/SONUÇ.....	39
4.1 SAYISAL ANALİZLER	39
4.2 BALİSTİK TEST SONUÇLARI	50
4.3 SAYISAL VE DENEYSEL SONUÇLARIN MUKAYESESİ.....	72
4.4 SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	72
KAYNAKLAR.....	77
YAYINLAR	82

Özet

Silah teknolojisinin gelişimine bağlı olarak zırh sistemlerinde de yeni gelişmelere ve tasarımlara ihtiyaç duyulmuştur. Bu alandaki yeni malzeme arayışları sonucunda, ağırlığın azaltılarak hareket kabiliyetinin artırılması ve yüksek balistik koruma sağlanması amacıyla metal malzemeler yerini kompozit yapılara bırakmıştır. Genellikle katmanlı yapıya sahip olan modern zırh sistemlerinde, mermi uç geometrisinin deforme edilerek nüfuziyet kabiliyetinin azaltılması, mermi kinetik enerjisinin ve çarpma etkisiyle oluşan şok dalgalarının sönümlenmesi, yapısal bütünlüğün ve termal dayanıklılığın sağlanması gibi ayrı işlevlere sahip malzemeler kullanılmaktadır. Sahip oldukları yüksek mekanik dayanım ve termal direnç gibi özellikleri sebebiyle seramik malzemeler, katmanlı yapılarda kullanılan önemli bileşenlerden biridir ancak kırılgan bir yapıya sahip olmaları sebebiyle zırh sistemlerinde tek başına değil ön yüz malzemesi olarak kullanılırlar. Darbe yüklerine maruz katmanlı yapılarda, katman sınırlarında malzeme özelliklerinin ani olarak değişmesi sebebiyle ara yüzeylerde ayrılmalar meydana gelebilir. Bu olumsuz etki fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (Functionally Graded Materials, FGMs) kullanılarak azaltılır veya ortadan kaldırılabilir. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, yapı içerisinde malzeme kompozisyonunun belirli bir doğrultuda sürekli olarak değiştiği yapılardır. Havacılık, uzay, otomotiv ve enerji gibi geniş çalışma alanlarına sahip fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler savunma teknolojisi alanında da kullanılabilirler. Bu proje kapsamında, fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç (FKSP) plakaların balistik uygulamalarda uygulanabilirliği araştırılmıştır. Deneysel ve sayısal olmak üzere iki kısımdan oluşan bu çalışmanın deneysel kısmında, tek kademeli gaz silah sistemi kullanılarak, farklı seramik bileşenlerin, malzeme kompozisyonunun, seramik bileşenin toz boyutunun ve seramik-yoğun katmandaki seramik oranının sandviç yapının balistik performans üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sayısal çalışmalar bir sonlu elemanlar yazılımı olan LS-DYNA programı gerçekleştirilmiştir. Kademelendirilmiş bölgedeki lokal malzeme özelliklerinin hesaplanmasında Mori-Tanaka mikro-mekanik modeli ve FKS plakanın elasto-plastik malzeme davranışının modellenmesi için TTO model kullanılmıştır. Sayısal çalışmalar ile deneysel sonuçların doğrulanması hedeflenmiştir. Çalışmanın en önemli sonucu; değişen malzeme kompozisyonu ve seramik bileşen ile fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların, balistik dayanımları ve hasar mekanizmalarının değiştiği bu sebeple doğru fonksiyonel yapının tasarlanması bu yapıların balistik amaçlar için kullanılabilirliği açısından önemlidir.

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

Abstract

New technologies and designs in armor systems were required depending on the development of weapon technology. The results of searching new materials in this field, composite structures came into prominence instead of metallic materials in order to increase mobility with decreasing weight and provide high ballistic protection. In modern armor systems which generally have layered structure, different functional materials having the properties that reducing the penetration capability of projectile deforming the nose geometry, absorbing the kinetic energy of projectile and shock waves due to impact effect, providing structural integrity and thermal durability were used in each layer. Ceramic materials are one of the most significant component in layered structures with their high mechanical strength and thermal resistance, however they are used as front plate whereas they are not used stand-alone component in armor systems by reason of their brittle structures. In layered structures subjected to impulsive loading, delaminations can take place by reason of sudden change in material properties at layer boundaries. This negative effect can be reduced or disposed using functionally graded materials (FGMs). Functionally graded materials are structures whose material properties vary continuously throughout the volume depending on a particular direction. FGMs can be used in defense industry as well as aerospace, aeronautics, automotive and energy industries. The applicability of functionally graded sandwich plates (FGSPs) in ballistic applications were investigated within the scope of this project. In experimental part of this project consisting of both numerical and experimental studies, the effect of different ceramic constituents, material composition, grain size of the ceramic constituent and ceramic proportion in ceramic-rich layer on the ballistic performance of the FGSPs were investigated. Numerical simulations were performed using explicit finite element code, LS-DYNA. In order to determine the local material properties in graded zone and model the elasto-plastic behavior of the FGSPs, Mori-Tanaka micromechanics model and TTO model were used, respectively. It was purposed that the experimental results were verified with numerical studies. The most significant result of this study indicated that change in material composition and ceramic constituent influenced the ballistic strength and damage mechanisms of the FGSPs. Therefore, the design of the optimal functionally graded structure was important in terms of usability of this structure in ballistic applications.

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

1. GİRİŞ

Günümüzde sürekli olarak gelişme gösteren silah sistemleri ve diğer tehditlere karşı, zırh sistemlerinin de gelişme göstermesi kaçınılmazdır. Bu gelişmeler ışığında ulusal ve uluslararası sivil ve askeri kuruluşlar ağırlığın azaltılarak yüksek hareket kabiliyetine sahip zırh sistemlerinin geliştirilmesi için Ar-Ge faaliyetlerine devam etmek zorundadırlar. Nitekim tarih boyunca ülkeler arasındaki savaşlarda da, 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.

1.1 Balistik

Balistik genel anlamda, fişegın 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 balistiğı olmak üzere üç ana disipline ayrılmıştır (Cihangiroğlu, 2011).

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 tetiğı 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 balistiğın bu bölümü; ateşli silah, fişek, fişegın 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. Fişğin 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 kütlesinin, çapının karesine oranı ile elde edilir.

$$SD = m/d^2 \quad 1.1$$

$$BC = SD/i \quad 1.2$$

Balistik katsayısı büyük olan mermi çekirdeği küçük olana nazaran hızı daha fazla korur ve daha kararlı şekilde hedefe doğru gider (Üner ve Çakır, 2007).

Silahların namluları içerisinde bulunan helezon şeklinde uzanan girintilere "yiv", çıkıntılara ise "set" ismi verilir (Şekil 1). Mermi çekirdeğine kendi eksenini etrafında dönü veren yiv ve setlerin namlu içerisindeki dönüşleri, soldan sağa veya sağdan sola doğrudur. Mermi çekirdeğinin havayı burgu gibi delerek atış menzilini 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 benzemektedir; yalpalama, dönü ve yalpalı dönü olarak adlandırılır (Cihangiroğlu, 2011).



Şekil 1. Namlu içerisindeki Yiv-Setlerin görünümü

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 kütlesi ve hızına bağlıdır.

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 (Üner ve Çakır, 2007).

Farklı seramik bileşen ve kompozisyonlara sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların, 0.3 kalibre parçacık benzetimli (FSP) mermi tesiri altındaki balistik performansının inceleneceği bu çalışma terminal balistik ile ilgilidir. Atışlarda kullanılan mermilerin hedef plakaya ulaşınca kadar geçen zaman içerisindeki hareketleri ve bu hareketleri etkileyen faktörler bu çalışma kapsamının dışındadır.

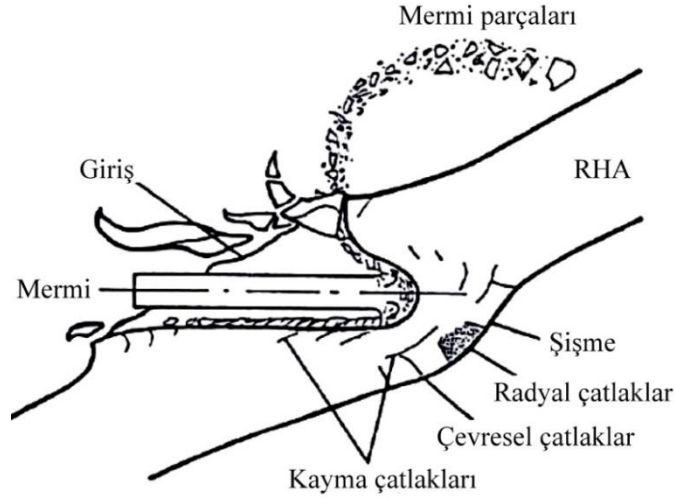
1.2 Penetrasyon Mekaniği

Kinetik enerji penetrasyonu genel olarak yüksek hızlı darbe uygulamalarında incelenen bir konudur. Özellikle balistik darbe analizlerinde yer alır ve mermi ile hedef arasında darbe süresince oluşan olaylar incelenir.

Kavramsal olarak penetrasyon (nüfuziyet) merminin hedef içine kısmen girmesi, yani hedef içinde durmasıdır. Uygun bir zırh tasarımının elde edilmesini amaçlayan bir çalışmanın temel dayanak noktası da budur. Perforasyon (delinme) ise hedefin kalınlığı boyunca merminin ilerlemesi, yani merminin hedefi tamamıyla delip geçmesi olarak tanımlanır. Merminin hedef ile penetrasyonu veya perforasyonu hareketinden kaynaklanan kinetik enerjisi sayesinde gerçekleşir. Bu nokta kinetik enerji çarpışmalarını, kimyasal enerji boşalımlarından ayırır. Kinetik enerji penetrasyonun gelişimi Şekil 2’de gösterilmiştir (Özşahin, 2008; Zukas, 1990).

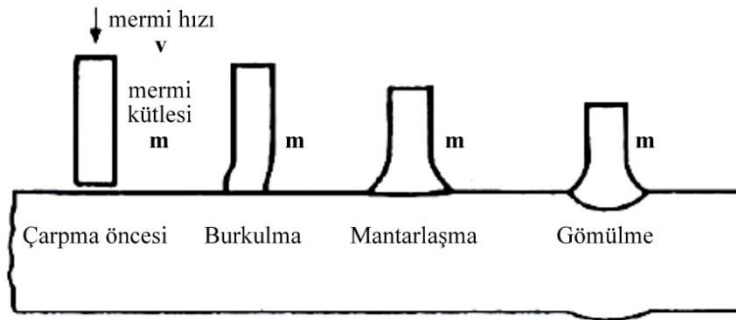
Merminin hedefe çarptığı andan itibaren hem mermide, hem de hedef cisimde gerilme dalgaları oluşur. Bu gerilme dalgaları çarpma hızı ve malzeme özelliklerine bağlı olarak sesin malzeme içindeki hızında ya da daha yüksek hızlarda hareket ederler. Bunları daha yavaş

hızlara sahip olan kayma dalgaları izler. Yüksek çarpma hızlarında, mermide, serbest yüzeye bağlı olarak dik çarpmalarda iki boyutlu, açılı çarpmalarda ise üç boyutlu gerilme durumu yaratan gevşeme (*relief*) dalgaları oluşur. Bunun sonucunda, sınır şartlarından dolayı basma yönündeki gerilme dalgaları çekme yönüne döner. Yüksek hızlarda bu dalgaların etkisi düşük hızlardakine oranla daha fazladır (Özşahin,2008; Zukas, 1990).



Şekil 2. Kinetik enerji penetrasyonu (Özşahin,2008; Zukas, 1990).

Eğer uzun, silindirik bir cisim balistik limitin altında bir hızla hedef yüzeye çarparsa eğilmeye başlar. Çarpma hızı arttıkça, plastik deformasyon belirli bir bölgede yoğunlaşır ve silindirin uç kısmı hedefi delemeyen mantar şeklinde deformasyona uğrar. Çarpma daha yüksek bir hızda gerçekleşirse plastik deformasyona ek olarak silindir hedef içine gömülür. Bu durum Şekil 3. Balistik limitin altındaki darbe davranışı 'te görülmektedir (Özşahin,2008; Zukas, 1990).



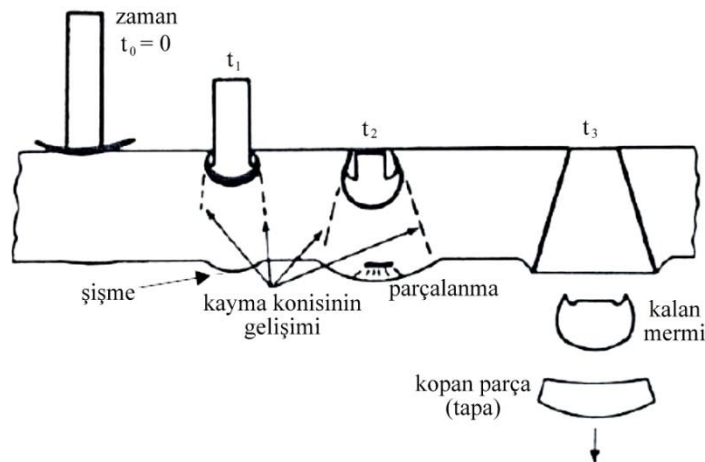
Şekil 3. Balistik limitin altındaki darbe davranışı (Özşahin,2008; Zukas, 1990).

Balistik limitin üzerindeki çarpmalarda penetrasyon, çarpma ile eş zamanlı olarak başlar. (Şekil 4. Balistik limitin üzerindeki darbe davranışı) Çarpmanın ilk anında, yüzeyler arası basınç hem hedef, hem de merminin malzeme mukavemetinin çok üzerinde olacağından,

merminin ucunda erozyonla birlikte penetrasyon olurken, merminin geri kalan kısmı herhangi bir deformasyona uğramadan oluşan kraterde yol alır. Krater giderek derinleşirken, dip kısmı merminin ucundaki deformasyona uygun tarzda genişler ve temas yüzeyinde yüksek kayma gerilmeleri oluşur. Belirli bir zaman sonra malzeme özellikleri, çarpma hızı ve hedefin kalınlığına bağlı olarak hedefin arka yüzeyinde şişme (*bulging*) ve yayılma şeklinde şekil değişiklikleri meydana gelir. Balistik penetrasyon ve perforasyon süresince mermi ve hedef, temas yüzeylerinden başlamak üzere eşit ve zıt yönde kuvvetlere maruz kalırlar. Ara yüzeyden itibaren yayılan dalgalar mermi ve hedefin içindeki gerilme ve yer değiştirmeleri biçimlendirir ve durumlarında değişikliklere neden olurlar. Mermi; hızının belli bir miktarını kaybeder, yörüngesinde değişiklikler olur, deforme olabilir, erozyona bağlı olarak ağırlığının bir kısmını kaybedebilir, değişik boyutlarda parçacıkların hedeften kopmasına neden olabilir (Özşahin,2008; Zukas, 1990).

Balistik darbe sonucunda, mermi ve zırh malzemeleri için çeşitli hasar mekanizmaları ortaya çıkmaktadır. Şekil 5'te gösterilen bu hasar mekanizmaları;

- Başlangıç gerilme dalgasından dolayı kırılma,
- Kırılğan malzemede başlangıç gerilme dalgasının ardından radyal kırılma,
- Yansıyan şok dalgalarının birbirleri ile karşılaşmaları sonucunda oluşan çekme yükleri altında kırılma (*spall fracture*),
- Tapa oluşumu (*plugging*),
- Ön veya arka yapraklanma (*petaling*),
- Parçalanma (*fragmentation*),
- Sünek delik genişlemesi (*ductile hole enlargement*) biçimindedir.



Şekil 4. Balistik limitin üzerindeki darbe davranışı (Özşahin,2008; Zukas, 1990).

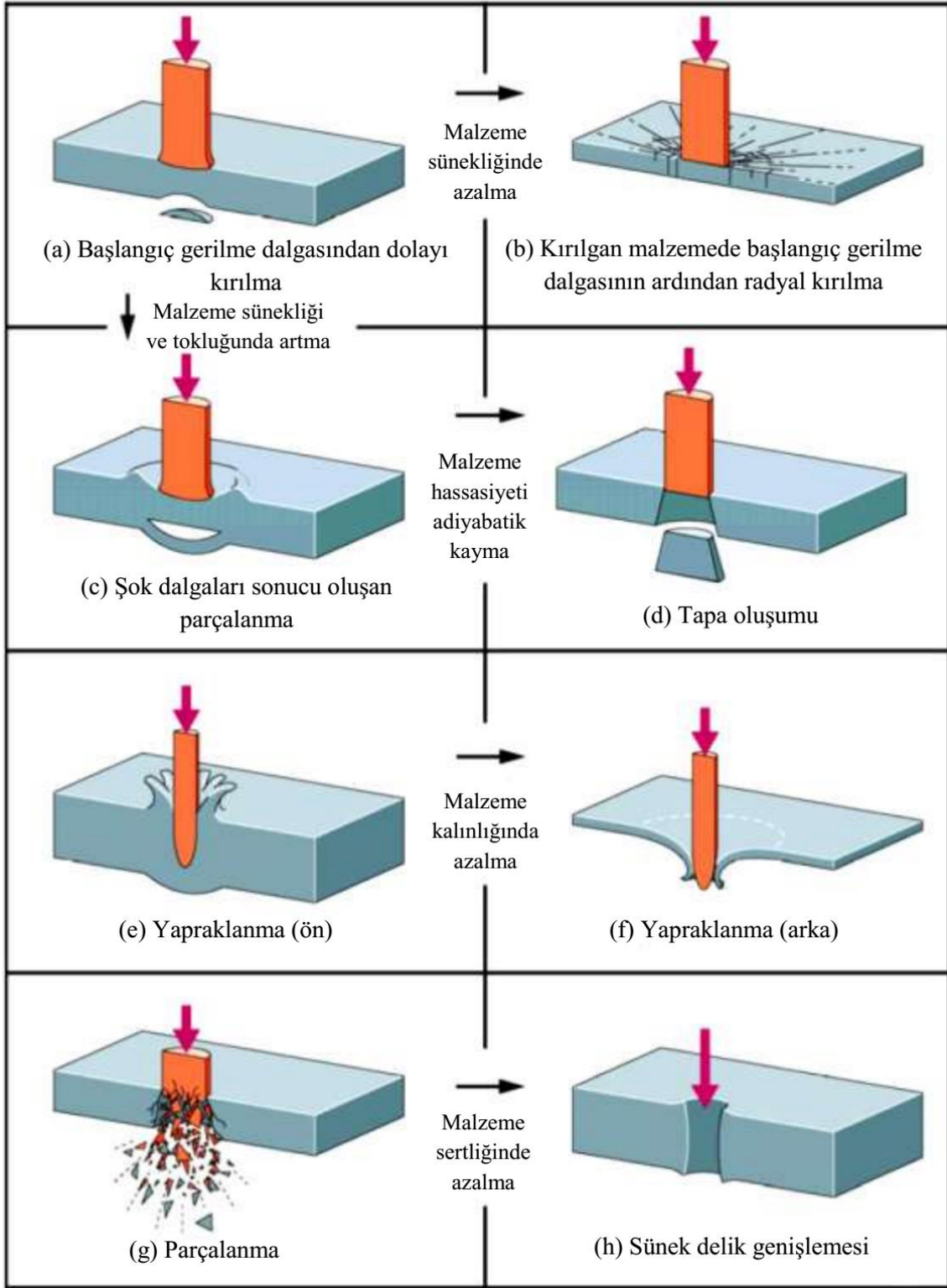
Özellikle sert metaller ve seramik gibi malzemelerde, yüksek basınç yükü nedeniyle dinamik hasar görülmektedir.

Balistik darbe analizlerinde, zırh sisteminin mekanik özelliklerinin bilinmesinin yanı sıra, darbe etkisini oluşturan mermi veya penetratörün de özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Çünkü mermi türüne göre oluşacak darbe etkileri farklılıklar gösterir. Gelişen teknoloji ile farklı silahlar için hız, geometrik şekil, çekirdek yapısı gibi özellikleri birbirinden çok farklı mermi türleri geliştirilmiştir. Bu yüzden balistik zırhların tasarımında darbeyi oluşturacak olan merminin de özellikleri dikkate alınmalıdır (Tan ve Khoo, 2005). Zırh tasarımda, mermi için dikkat edilmesi gereken başlıca özellikler şunlardır:

- Mermi çekirdeğinin malzemesi (çelik, bakır, kurşun, vb.)
- Mermi uç geometrisi (sivri, küt, vs.)
- Çekirdek ağırlığı
- Mermi hızı
- Mermi uç geometrisi ve hızı oluşabilecek penetrasyon veya perforasyon olaylarını oldukça önemli derecede etkilemektedir. Bu parametrelerin öneminin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 6' da farklı mermi geometrileri gösterilmiştir (Tan ve Khoo, 2005).

1.3 Balistik Limit

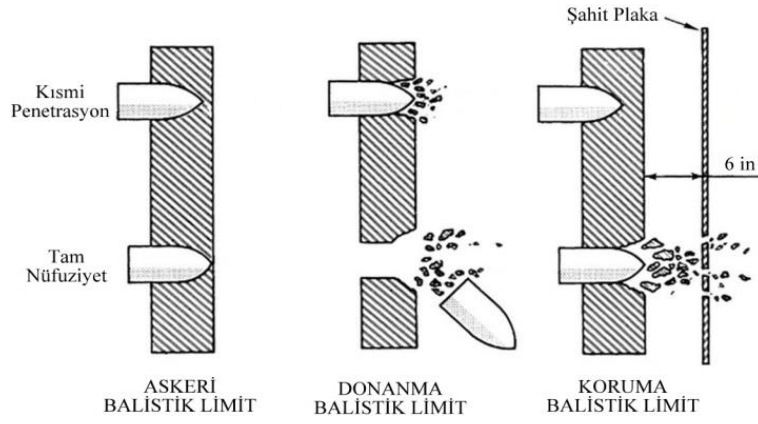
Balistik limit kavramı için literatürde farklı yaklaşımlar mevcuttur ve bu yaklaşımları tanımlamak gerekir. Balistik limit hızı VBL, merminin hedefe tamamen nüfuz edemediği hız ve bu hızın altındaki hızlar olarak tanımlanmıştır. Şekil 7' de balistik limit kavramı üzerine farklı yaklaşımlar gösterilmiştir. Bu yaklaşımlar arasındaki temel fark perforasyon olayının tanımlanmasındaki farklı kriterlerdir (Laible, 2012). Balistik limit hızının belirlenmesindeki gerçek değerlendirme istatistiksel çalışmalara dayalı olan testlerle yapılır. Balistik limit hızı V50 ile gösterilir ve bu hız merminin hedefe dik konumda çarpması sonucu hedefin % 50' sini delme kapasitesine sahip olduğu hızdır. Bahsedildiği gibi V50 hızının tespitinde istatistiksel yaklaşımlardan faydalanılır. Temel olarak, tam nüfuziyete sebep olan en düşük üç hız ile kısmi nüfuziyete sebep olan en yüksek üç hızın ortalaması alınarak balistik limit hızı tespit edilir. Deney sonuçlarında hedefi delip geçen en düşük hız ve delip geçmeyen en yüksek hız arasındaki fark ne kadar az ise balistik limit tahmininin doğruluğu o kadar yüksek demektir. Balistik darbe için tipik bir V_{50} diyagramı Şekil 8. Balistik limit eğrisi gösterilmiştir (Zukas, 1990).



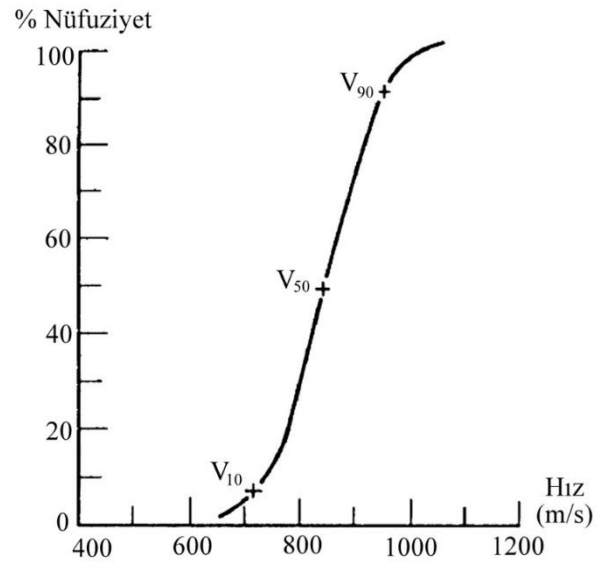
Şekil 5. Balistik darbe etkisi altında oluşan hasar mekanizmaları (Wetzel, 2009)



Şekil 6. Balistik testlerde kullanılan mermiler (Tan ve Khoo, 2005)



Şekil 7. Balistik limit kavramı üzerine farklı yaklaşımlar (Laible, 2012)



Şekil 8. Balistik limit eğrisi (Zukas, 1990)

Balistik limit kavramı üzerine diğer bir yaklaşım da Lambert-Jonas yaklaşımıdır. Eşitlik 1.3 Lambert-Jonas yaklaşımını göstermektedir (Ben-Dor vd., 2002)

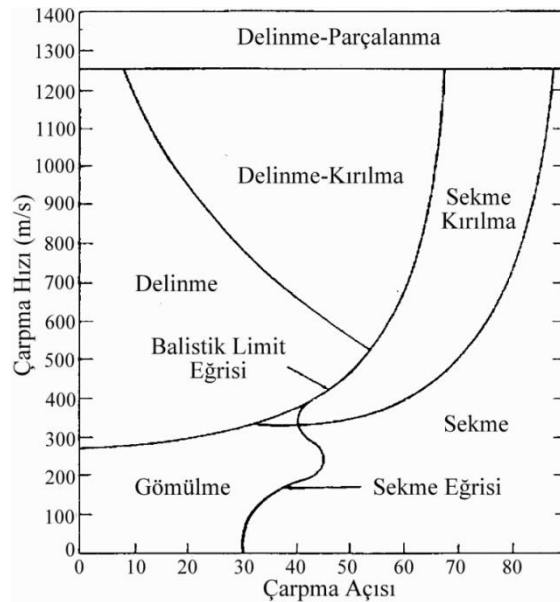
$$v_{res} = a(v_{imp}^p - v_{bl}^p)^{1/p}, \quad v_{imp} > v_{bl} \quad 1.3$$

Burada, v_{imp} merminin çarpma hızını, v_{res} merminin plakayı deldikten sonra kalan artık hızı ve v_{bl} balistik limit hızını göstermektedir. a ve p deneysel verilerden elde edilen katsayılar olup, $p=2$ olduğu zaman eşitlik Recht-Ipson yaklaşımı (eşitlik 1.4) adını almaktadır.

$$v_{res} = a(v_{imp}^2 - v_{bl}^2)^{1/2}, \quad a = M/(M + m) \quad 1.4$$

a katsayısının bulunmasında kullanılan M merminin kütlesini ve m ise çarpışma ile mermiden kopan parçanın kütlesini göstermektedir. Lambert-Jonas eşitliğine göre balistik limit eğrisi çizildiğinde yatay eksen çarpma hızını, dikey eksen ise artık hızı göstermektedir. Eğrinin yatay eksenini kestiği nokta balistik limit hızını vermektedir. Yani $v_{res}=0$ olduğunda çarpma hızı v_{imp} , balistik limit hızı v_{bl} 'e eşit olur.

Yüksek hızlı çarpışma olayını diyagramlar yardımıyla göstermek sistemin anlaşılması bakımından daha faydalı olmaktadır. Bu diyagramlar oluşturulurken hız, hedef kalınlığı, çarpma açısı, çarpma kinetik enerjisi, itme, kuvvet ve zaman gibi etkiler dikkate alınmaktadır. Şekil 9. oval-sivri bir merminin 6.35 mm kalınlığındaki 2024-T3 alüminyum plakaya nüfuziyeti halinde elde edilen balistik faz diyagramını göstermektedir. Balistik limit, mermi ve zırh performansının tespitinde temel parametredir (Zukas, 1990).



Şekil 9. Balistik faz diyagramı (Zukas, 1990)

2. LİTERATÜR ÖZETİ

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 kütsel 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 (Alper ve Çoruhlu, 2006; Gooch, 2002; Charles, 2001; Orlovskaya, 2003).

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 ısıl genleşme katsayısı, geniş sıcaklık aralığında kullanılabilirlik ve gereksinimlere göre istenilen toleranslarda üretilerek kullanılabilmesidir.

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 (Backman ve Goldsmith, 1978; Jensen vd., 2004).

Bilindiği gibi metal yapıların çarpma hasarları genellikle yüzeyden başlar ve göz ile belirlenebilir. Fakat kompozitlerde karakteristik hasar mukavemette 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 sönmüleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir. Bu nedenle kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi oldukça büyük bir öneme sahiptir [Ceyhun ve Turan, 2003]. 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 (Tiberkak vd., 2008; Lam ve Sathiyamoorthy, 1999).

Gonçalves vd. (2004), 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 vd. (2000), 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 ve Chou (1997), tabakalı kompozitlerin zırh olarak kullanılması durumundaki davranışlarını incelemiştir. Çalışmalarında, cam fiber takviyeli 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 vd. (2004), AA5083 alüminyum matrisli SiC takviyeli kompozit malzemenin balistik davranışlarını incelemiştir. Deneyler sırasında 7.62 ve 9 mm kalibreli mermiler kullanılmıştır. Atışlar sonrası, çarpma yüzeylerinde kırılan çatlaklar gözlenmiştir. Ayrıca, mermi çarpma bölgelerinde matrisin, sürtünmeden dolayı ergidiği tespit edilmiştir. Testlerde, kompozit hedefin arkasında destek olup olmamasının, hedefin direncini etkilediği tespit edilmiştir.

Babaei vd. (2011), alüminyum-alüminyum, alüminyum-çelik, çelik-alüminyum ve çelik-çelik katmanlı yapıların, balistik performansını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Sayısal çalışmalarında, 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 çalışmalarında %7 lik bir hata oranı ile bunu doğrulamışlardır.

Feli ve Asgari (2011), silindirik tungsten mermi etkisi altında seramik ön yüzü kompozit plakaların balistik perforasyonunun simülasyonunu LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirmişlerdir. İki boyutlu, dinamik eksplisit analizlerinde, plaka üst katmanını Al_2O_3 , arka katmanını ise Twaron elyaf takviyeli 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 delaminasyonun etkilendiğini göstermişlerdir.

Taşdemirci vd. (2012), seramik kompozit zırhlarda, ara katman malzemesinin balistik performans üzerine etkisini teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Farklı ara katman malzemesi kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında, 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 [Yang, 2000; Matsunaga, 2009; Han vd., 2002; Jr, 2006; Bruck, 2000).

Chin (1999), 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. Mihalcin vd. (2000), 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. Gooch ve Burkins (2001), 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. McCauley vd. (2004), 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. Templeton vd. (2007), 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. Übeyli vd. (2014), SiC-Al fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların balistik performansını incelemiş ve 7.62 mm AP mermi kullanarak 800m/s hızda gerçekleştirdikleri balistik testlerde FGM plakaların balistik koruma sağlamadığı sonucuna varmışlardır.

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.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 Bünye İlişkileri ve Karışım Teorisi

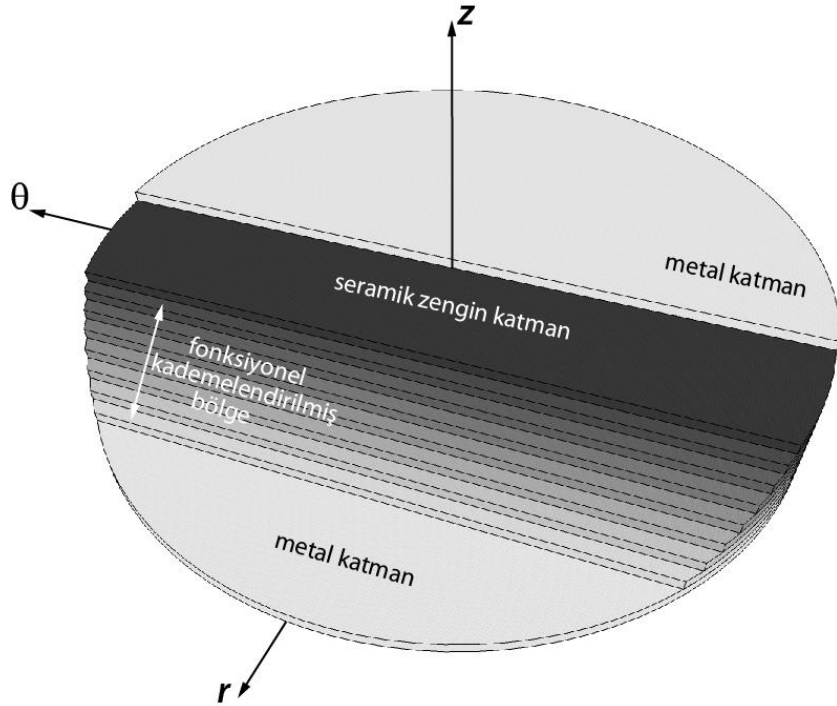
Seramik ve metal bileşenlerden oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların, alt ve üst yüzeyleri metal olup, bu metal yüzeyler arasında kalan bölgede seramik oranı, alt yüzeyden üst yüzeye doğru ilerledikçe, kademeli olarak değiştiği kabul edilmektedir (Şekil 10). Keramik (c) ve metal (m) bileşenlerin hacimsel oranları arasındaki ilişki;

$$V_s + V_m = 1 \quad 3.1$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada V_s seramik fazın hacimsel oranını, V_m metal fazın hacimsel oranını göstermektedir. Bileşimin oranı plaka kalınlığı (h) boyunca konumun fonksiyonu olarak;

$$V_m(z) = \left(1 - \frac{z}{h}\right)^n \quad 3.2$$

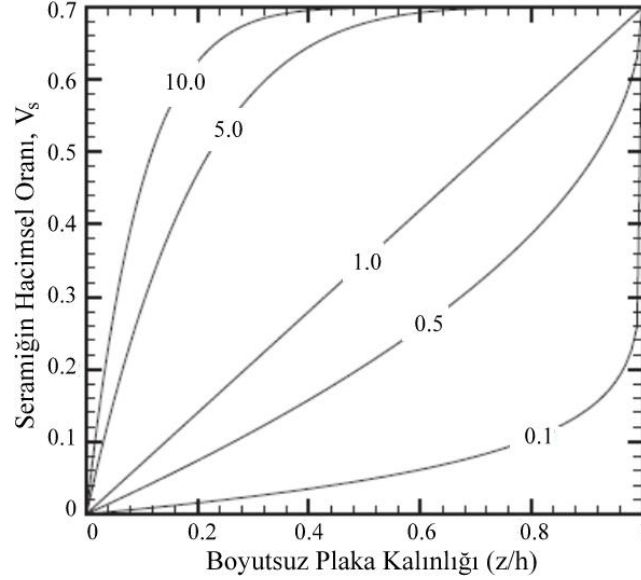
$$V_s(z) = 1 - V_m(z) \quad 3.3$$



Şekil 10. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka (FKSP)

Şeklinde ifade edilir. Burada $V_s(z)$ plakanın herhangi bir z mesafesindeki seramik bileşenin hacimsel oranı, h plaka kalınlığı, n bileşimin hacimsel değişimini lineer veya nonlineer olarak kontrol eden keyfi bir üstür. Hacimsel oran üssü (n), $0.1(metal\ yoğun)$ ile $10(seramik\ zengin)$ arasında değişen bir değerdir. Bazı n değerleri için bileşimin hacimsel oranları Şekil 11’de

gösterilmiştir. Bu çalışmada, $n = 0,1$, $n = 1$, $n = 5$ ve $n = 10$ malzeme kompozisyonlarına sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların balistik performans incelemesi yapılmıştır.



Şekil 11. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca farklı malzeme kompozisyonlarında seramik bileşenin hacimsel oranı

3.2 Tamura-Tomota-Ozowa (TTO) Model

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin lineer-elastik davranışları Hooke kanunu ile tariflenebilirken, elasto-plastik davranışlarını modellemek için Tamura vd. (1973) tarafından ortaya atılan ve metal-seramik esaslı fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin hacimsel oranlarını esas alan TTO model kullanılabilir.

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

$$\sigma = V_s \sigma_s + V_m \sigma_m \quad 3.4$$

$$\varepsilon = V_s \varepsilon_s + V_m \varepsilon_m \quad 3.5$$

Eşitlik 3.4' den yola çıkarak sayısal analizler için gerekli olan, fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların ara katmanlarının kopma şekil değiştirmeleri benzer şekilde 3.5 eşitliği kullanılarak hesaplanabilir.

$$\varepsilon^f = V_s \varepsilon_s^f + V_m \varepsilon_m^f \quad 3.6$$

TTO modelde gerilme-şekil değiştirme transfer oranı (q) olarak isimlendirilen ve her bir plaka katmanının gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin hesaplanmasında kullanılan bir parametre daha mevcut olup 0 ile ∞ arasında değişir. q parametresi şu şekilde hesaplanır:

$$q = \frac{\sigma_s - \sigma_m}{|\varepsilon_s - \varepsilon_m|} \quad 3.7$$

q ' nun değeri plaka bileşenlerinin malzeme özelliklerine ve kompozit yapı içerisindeki mikroyapısal etkileşimlere bağlıdır. Örneğin, $q = 0$ için bileşen elemanlarının gerilme dağılımları eşit iken, $q = \infty$ için bileşen elemanlarının şekil değiştirme dağılımları eşittir. Pratikte kompozit yapı içerisindeki bileşen elemanlar, karmaşık mikroyapıları (tane boyutları, tane şekillerindeki fark, doğrultu, hacimsel oran vs.) nedeniyle farklı gerilme ve şekil değiştirme değerlerine sahiptirler. q ' nun sıfırdan farklı sonlu bir değeri, bileşenlerin etkilerini yaklaşık olarak yansıtabilir. q parametresi sayısal ve/veya deneysel yöntemlerle elde edilebilmektedir. q parametresi, seramik ve metal bileşenlerin gerilme-şekil değiştirme eğrilerini, SF/FM oranının bileşenlerin hacimsel oranına eşit olacak şekilde kesen d doğrusunun eğimine eşittir ve bu çalışmada SiC için $q = 4.8$ GPa ve B₄C için de $q = 20.7$ GPa değeri kullanılmıştır. Söz konusu değerler deneysel yöntemle hesaplanmıştır.

$$\sigma_i = E_i \varepsilon_i \quad 3.8$$

burada $E_i (i = s, m)$ bileşen fazların elastiklik modülüdür. Kompozitin elastiklik modülü E ise şu şekilde hesaplanır;

$$E = \frac{V_m E_m \frac{q+E_s}{q+E_m} + (1 - V_m) E_s}{V_m \frac{q+E_s}{q+E_m} + (1 - V_m)} \quad 3.9$$

kompozitin poisson oranı v ;

$$v = V_s v_s + V_m v_m \quad 3.10$$

formülüyle hesaplanır. Metal-seramik esaslı kompozitlerin plastik deformasyon uygulamalarında TTO model, metal bileşen akmaya başlayınca kompozitin aktığını varsayar. Kompozitin akma gerilmesi σ_Y şu şekilde hesaplanır;

$$\sigma_Y = \sigma_0 \left[V_m + \frac{q + E_m E_s}{q + E_s E_m} (1 - V_m) \right] \quad 3.11$$

Burada σ_0 , metalin akma gerilmesidir. 3.11 denklemine göre kompozitin akma gerilmesi; metalin akma gerilmesi, metalin hacimsel oranı, bileşen fazların elastiklik modülleri ve q parametresine bağlıdır. Kompozitin gerilme-şekil değiştirme eğrisini yaklaşık olarak tarif etmek için bir kuvvet kanunu modeli kullanılmıştır. Sırasıyla metal ve kompozitin akma noktasından sonraki gerilme-şekil değiştirme eğrileri için;

$$\varepsilon_m = \varepsilon_0 \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_0} \right)^{n_0}, \quad (\sigma_m \geq \sigma_0) \quad 3.12$$

ve

$$\varepsilon = \varepsilon_Y \left(\frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^n, \quad (\sigma \geq \sigma_Y) \quad 3.13$$

yazılabilir. Burada,

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_m}, \quad \varepsilon_Y = \frac{\sigma_Y}{E} \quad 3.14$$

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

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y} = \frac{V_s E}{q + E_s} \frac{\sigma_m}{\sigma_Y} + \frac{(q + V_m E_s)}{q + E_s} \frac{E}{E_m} \frac{\sigma_0}{\sigma_Y} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_0} \right)^{n_0} \quad 3.15$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_Y} = \frac{V_m q + E_s}{q + E_s} \frac{\sigma_m}{\sigma_Y} + \frac{(V_s q E_s)}{q + E_s} \frac{1}{E_m} \frac{\sigma_0}{\sigma_Y} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_0} \right)^{n_0} \quad 3.16$$

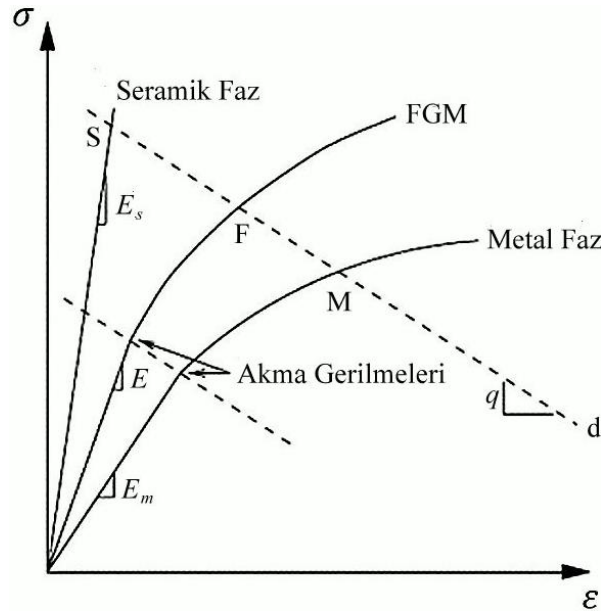
Şekil 12 ve Şekil 13 sırasıyla TTO Model ile tariflenen kompozitin, gerilme-şekil değiştirme eğrisini şematik olarak gösterimi ve seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların TTO model ile üretilmiş gerilme şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.

3.3 Sonlu Elemanlar Metodu

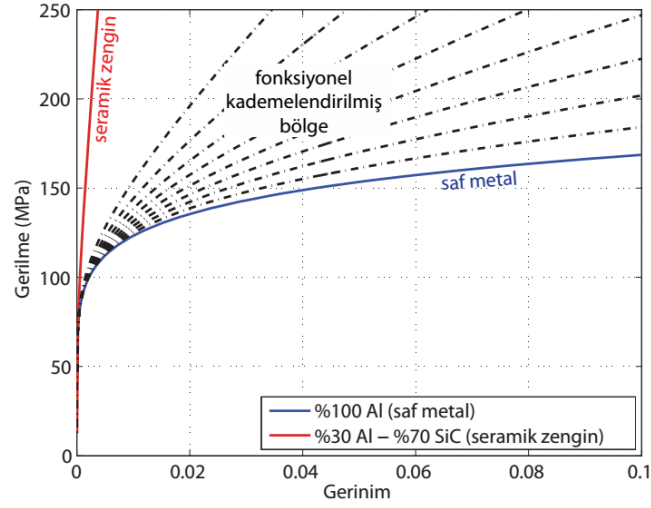
Bu çalışma kapsamında oluşturulan tüm teorik modeller LS-DYNA® sonlu elemanlar paket programı ile geliştirilmiştir. Geliştirilen sayısal modelde Lagrangian sonlu elemanlar formülasyonu kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modellerinin oluşturulmasında ANSYS

Parametrik Tasarım Dili (*APDL-ANSYS Parametric Design Language*) kullanılmıştır. APDL sayesinde sayısal modeller parametrik olarak modellenmiş ve kullanılan formülasyon ve algoritmalar için makro oluşturulmuştur. Parametrik modelleme ile değişimi incelenecek her bir parametre makro içinde tanımlanmış ve bu sayede tekrarlı modellemeler yerine tek bir makro üzerinden sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu tekniğin en büyük avantajı zaman açısından büyük ölçüde tasarruf sağlamaktır.

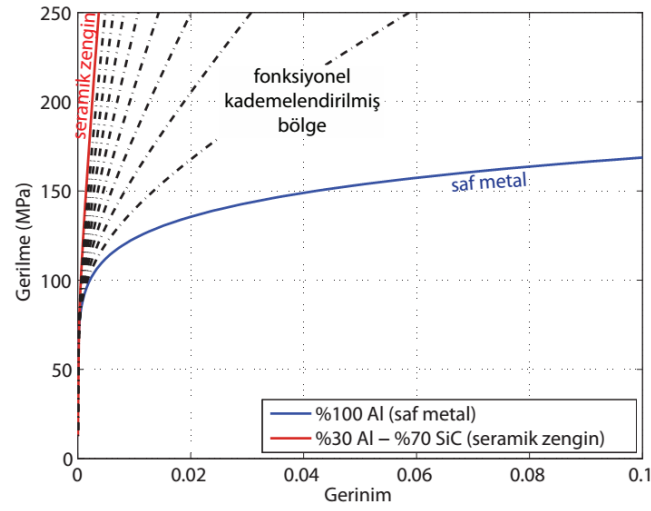
LS-DYNA[®], eksplisit dinamik analizler yapabilen bir sonlu elemanlar paket programıdır. Eksplisit dinamik analizler, kısa zaman aralığında gerçekleşen fiziksel durumlar, büyük deformasyonlar (*large strains*), kırılma (*fracture*) veya malzeme kopması (*material failure*) gibi durumları içeren analizlerdir ve bu tür problemlerin simule edilmesi için idealdir. Eksplisit analizler zamana bağlı analizlerdir ve sonlu elemanlar hesaplamalarında iterasyonlar sonucu bulunan yer değiştirmeler bir önceki iterasyonda bulunan yer değiştirmeler ile bağlantılıdır. Eksplisit hesaplamalar koşullu karardır; yani analizin zaman adımı yaklaşık olarak, elastik bir dalganın sonlu elemanlar ağ yapısı içindeki en küçük boyutlu eleman içinden geçtiği süre ile sınırlıdır. Eksplisit analizler, bünyesinde genellikle temel olarak bilinen tüm non-lineerlikleri (geometrik, malzeme ve temas) bulundurmaktadır. Çarpma analizlerinde büyük yer değiştirme ve şekil değiştirmeler (*large displacement and strains*) söz konusudur.



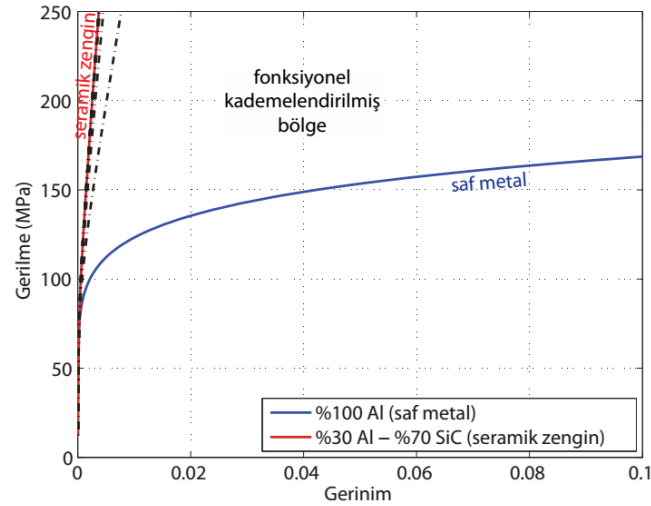
Şekil 12. TTO modelin şematik gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Gunes vd., 2011)



a) $n=0.1$ (metal zengin karışım)



b) $n=1$ (lineer karışım)



c) $n=10$ (seramik zengin karışım)

Şekil 13. Seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların TTO model ile üretilmiş gerilme şekil değiştirme eğrileri

Analizlerde malzeme davranışları non-linear bir malzeme modeli kullanılarak tanımlandığı için pekleşme, malzeme kopması vs. etkiler söz konusudur. Son olarak, elemanlar arasındaki temas durumları (penetrasyon, ayrılma, yapışma vs.) problemin türüne göre değişen farklı temas algoritmaları ile dikkate alınmaktadır.

3.4 Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların

Modellenmesi

Mesnet dış çapı 90 mm ve mesnet iç çapı 70 mm olan dairesel plakalar Şekil 14'te gösterilen bölgeden ankastre olarak mesnetlenerek merkezi çarpma yüküne maruz bırakılmıştır. Gerçekleştirilen analizlerde mermi, mekanik özellikleri Tablo 1' de verilen AISI 4340H çelik malzemeden oluşmakta olup fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka ise kompozisyonu kalınlık boyunca değişen seramik ve metal bileşenlerden oluşmaktadır. 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 2' de verilmiştir.

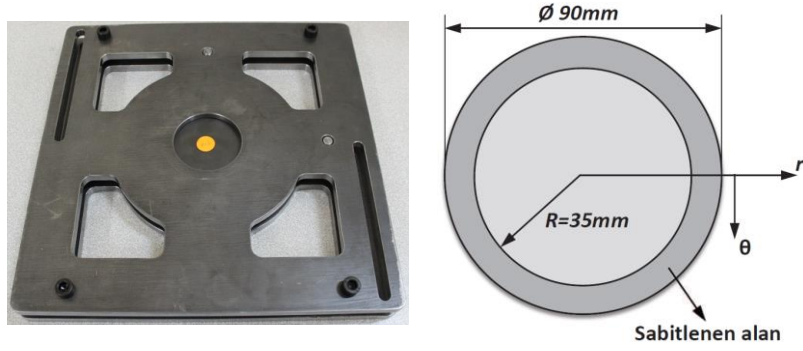
Tablo 1. Parçacık benzetimli çelik mermi mekanik özellikleri

Malzeme	Elastikli k Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)	Akma Gerilmesi (MPa)	Tanjant Modülü (MPa)	Kopma Şekil Değiştirmesi
4340H	200	0.29	7850	970	470	0.77

Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakanın balistik analizleri, eksplisit dinamik analiz yapabilen LS-DYNA FEA yazılımı ile yapılmıştır (Hallquist, 2006). Her bir analiz 24 işlemcili, 1.6 GHz CPU hızına sahip ve 96 GB RAM kapasiteli iş istasyonunda yaklaşık olarak 2 saatte tamamlanmıştır.

Tablo 2. FKS plaka bileşenleri mekanik özellikleri

Malzeme	Elastikli k Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)	Akma Gerilmesi (MPa)	Kopma Şekil Değiştirmesi
Al 6061	67	0.33	2702	95	0.74
SiC	302	0.17	3100	-	0.01
B ₄ C	450	0.207	2510	-	0.01

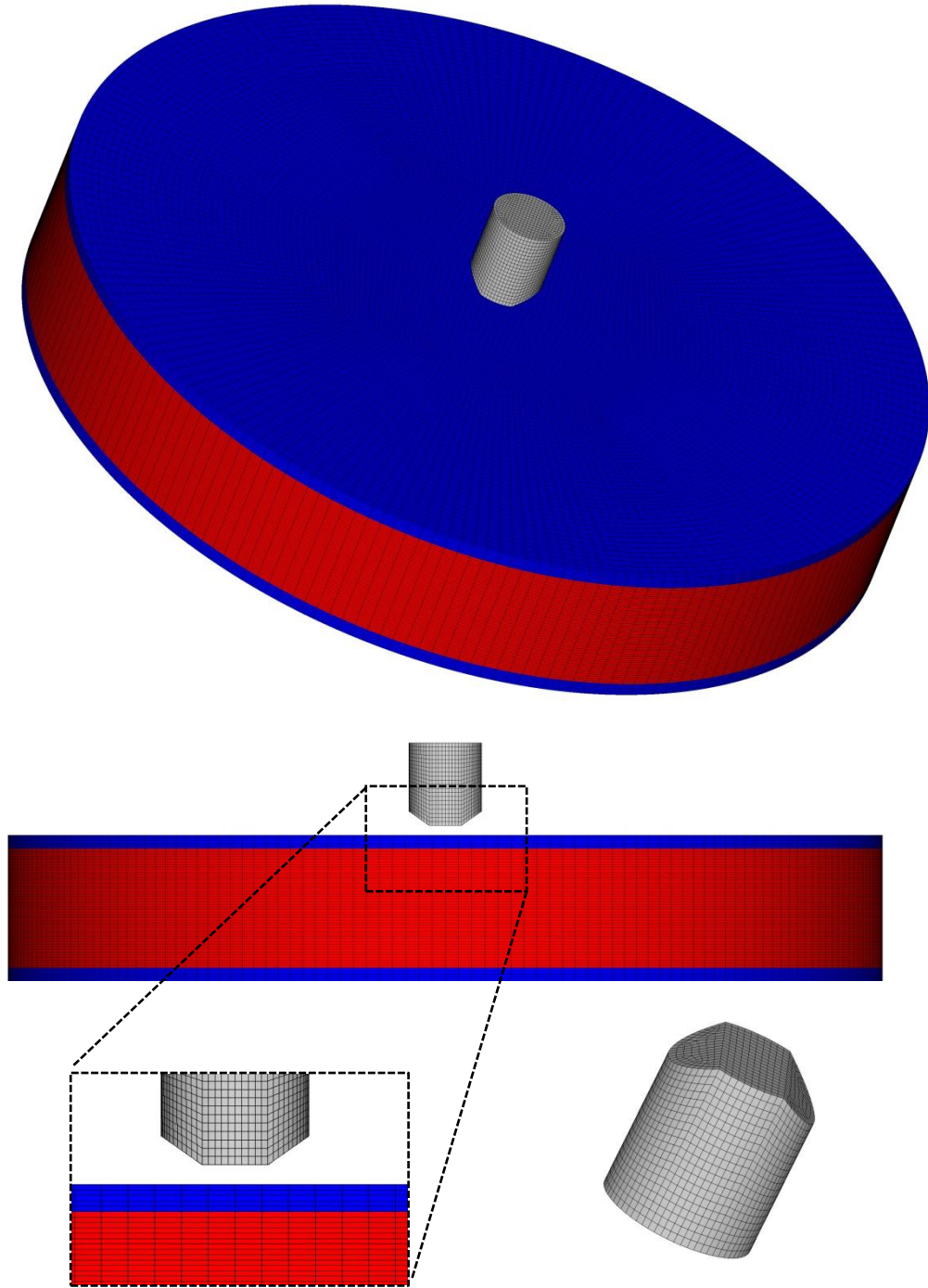


Şekil 14. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların sabitlenmesi

Sonlu elemanlar modeli Şekil 15’de gösterilen plaka ve parçacık benzetimli mermi 8 düğüm noktalı, 9 serbestlik dereceli katı 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, 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 nüfuz ettiği durumlarda kullanılan CONTACT_ERODING_NODES_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 elemanlara penetrasyon problemlerinde ve diğer yüzey hasarına uğrayan problemlerde kullanılır. Ayrıca mermi ve plakaya ait elemanlarda oluşacak bozulmaları engellemek için Flanagan-Belytschko rijitlik formunu (Belytschko vd., 1982) esas alan 5. tip HOURGLASS tanımlanmıştır.

Sayısal analizlerde, çelik mermi deneysel çalışmalardan elde edilen çarpma hızları dikkate alınarak, seramik zengin yüzeyi ön yüz olarak konumlandırılan farklı malzeme kompozisyonu ve farklı seramik bileşenlere sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların üzerine çarptırılmıştır. 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. 11 katmandan oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş

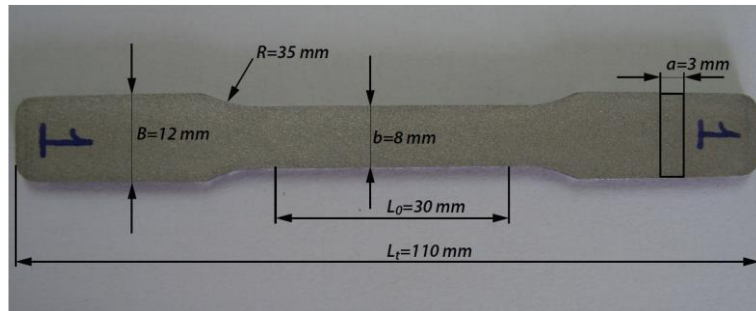


Şekil 15. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka ve mermi sonlu elemanlar modeli
sandviç plakada her bir katmanın farklı oranlarda alüminyum ve silisyum karbür içermesi sebebiyle plaka kalınlığı boyunca mekanik özellikler de değişmektedir.

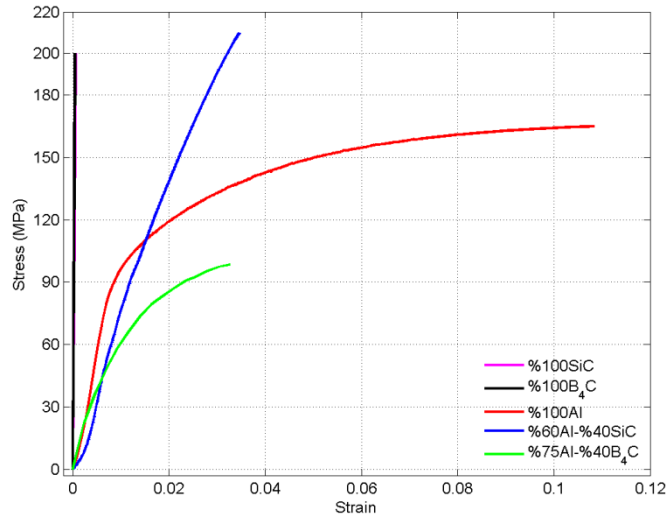
Sayısal modelin oluşturulmasında plaka kalınlığı boyunca değişen mekanik özelliklerin ve katmanlar arası bağ kuvvetlerinin tespit edilmesi modelin başarısı açısından önemlidir. Malzemeler statik ve dinamik yükleme altında farklı davranırlar. Deformasyon hızının

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 birçok çalışma bulmak mümkündür (Campbell, 1953). 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 alınması sayısal modelin başarısını doğrudan etkileyecektir.

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 üretilirerek, fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar ile aynı sinterleme şartlarında üretilen (Şekil 16) çekme numunelerinin Erciyes Üniversitesi Teknoloji ve Araştırma Uygulama Merkezinde bulunan Shimadzu marka çekme cihazı ile 0.1 mm/dk hızında çekme testleri yapılarak Şekil 17'deki eğriler elde edilmiştir. TTO modelde bulunan gerilme-şekil değiştirme transfer oranı q hesabı için çekme testinden elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrileri kullanılmıştır.



Şekil 16. Toz sinterleme yöntemi ile üretilmiş çekme numunesi



Şekil 17. Toz istifleme sıcak presleme yöntemiyle üretilen %100 Al 6061, %60Al-%40 SiC ve %75Al-%25 B₄C çekme numuneleri için gerilme şekil değişimi eğrileri

Sayısal analizlerde, FKS plaka için MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY malzeme modeli kullanılmış olup model için gerekli olan elastiklik modülü, akma gerilmesi, tanjant modülü ve kopma gerinim değerleri TTO model kullanılarak tespit edilmiştir. STANAG-2920 ve MIL-DTL-46593B (MR) standartlarına göre üretilmiş 0.30 kalibre FSP (*Fragment Simulating Projectile*) mermi için ise MAT_PLASTIC_KINEMATIC malzeme modeli kullanılmıştır.

3.5 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 (Kieback vd., 2003; Wu vd., 2005; Zhou vd., 2004; Muller vd., 2013; El-Desouky vd., 2013).

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 3’de fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin üretim yöntemleri ve özellikleri genel olarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında üretilen, farklı seramik bileşen ve malzeme kompozisyonlarına sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar, toz istifleme sıcak presleme (powder stacking-hot pressing) tekniği kullanılarak Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kompozit Laboratuvarında üretilmiştir. Üretilen plakaların, her bir katmanı için gerekli olan metal ve seramik miktarları, karışım teorisi kullanılarak, hesaplanmış olup, örnek olarak seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip FKS plakalar için farklı kompozisyonlardaki plakalara ait hacimsel oranlar ve plaka kalınlığı boyunca bileşenlerin değişimini gösteren makro görüntüler sırasıyla Şekil 18 ve Şekil 19’da verilmiştir.

3.5.1 Plaka Üretiminde Kullanılan Tozlar

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, genel olarak metal ve seramik bileşenlerden oluşur. Plakayı oluşturan bileşenlerin, plaka yatay ve düşey düzlemlerinde konumlandırılması ile bir, iki ve üç boyutta fonksiyonel yapının elde edilmesi mümkün olabilir. Yapılan bu çalışmada, silindirik geometriye sahip plakalarda, plaka kalınlığı boyunca malzeme kompozisyonu değişmekte, yatay düzlemde kompozisyon aynı kalmaktadır. Üretilen plakalarda, mevcut sıcak sinterleme ünitesinin kapasitesi de dikkate alınarak metal bileşen olarak alüminyum ve seramik bileşen olarak ta alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC) ve bor karbür (B_4C) kullanılmıştır. 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 5’te yukarıda bahsi geçen seramiklere ait özellikler verilmiştir.

Tablo 4'te kimyasal bileşimi verilen 10 mikron boyutundaki alüminyum 6061 tozunun temel alaşım elementleri magnezyum ve silisyum olup, yüksek korozyon dayanımı, iyi kaynak edilebilirlik ve yüksek sertlik özelliklerine sahip olması sebebiyle savunma sanayi, uçak

Tablo 3. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin üretim teknikleri (Kieback vd., 2003)

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 – 1000μm), T:ince (10 – 100μm)

UT:çok ince (< 10μm), C:sürekli

^b Toz boyutuna bağlıdır.

^c Maksimum kalınlık ile sınırlıdır.

* PVD: Fiziksel buharlı depozisyon

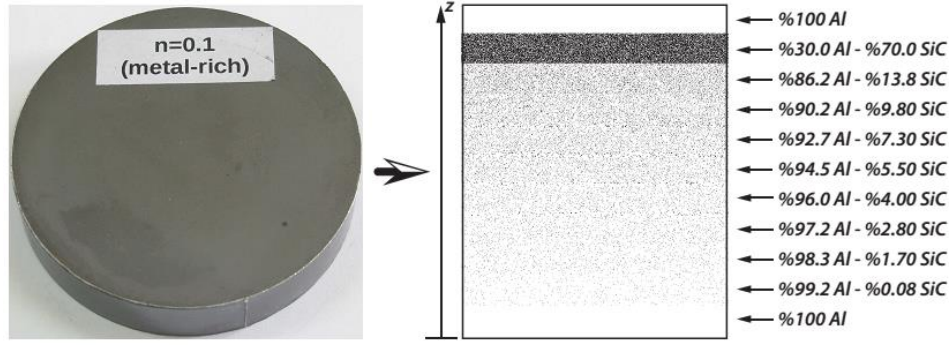
** CVD: Kimyasal buharlı depozisyon

*** GMFC: Köpük sıkıştırma ile kademelendirme

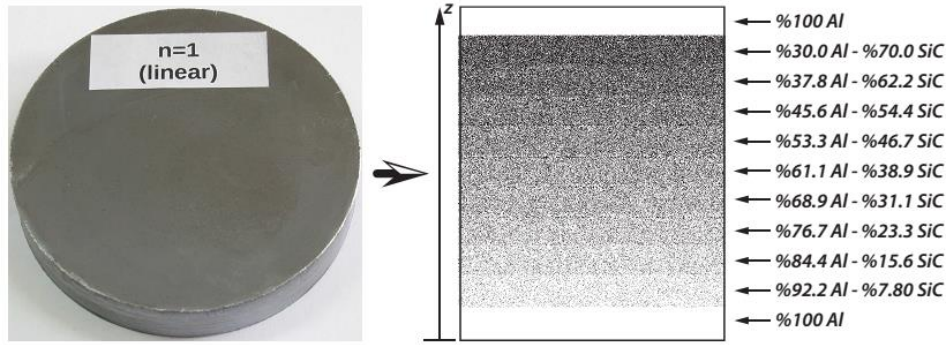
sanayi, gemi inşa sektörü, uzay uygulamaları, helikopter pervane kaplaması gibi kullanım alanlarına sahiptir.

Balistik sistemlerde yüksek sertlik ve dayanım gerekliliği sebebiyle, seramik malzemeler tercih sebebi olmuştur, fakat yüksek kırılgenliğe sahip olmaları sebebiyle, seramik malzemeler bu amaç için tek başına kullanılmazlar. Bu sebeple seramikler, balistik uygulamalarda ön yüz malzemesi ya da matris malzemesi olarak karşımıza çıkar. Balistik yük

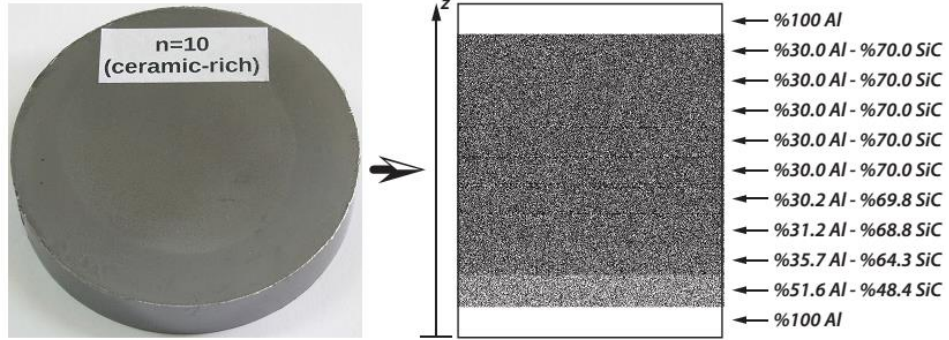
altında zırh sistemleri yapısında bulunan seramik katman, mermi enerjisini sönümler ve yüksek sertliğe sahip olması sebebiyle, mermi uçuşu kalınlaştırarak merminin nüfuziyet



$n = 0.1$ (Metal zengin plaka)

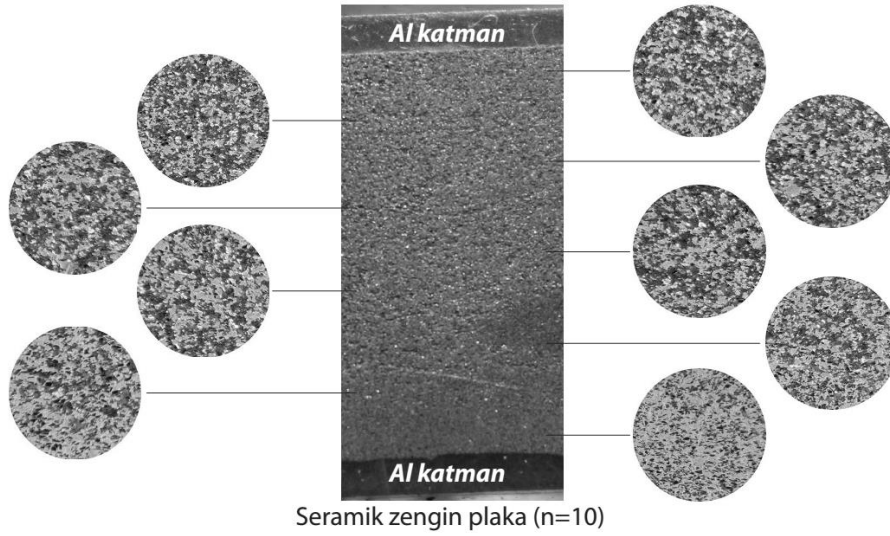
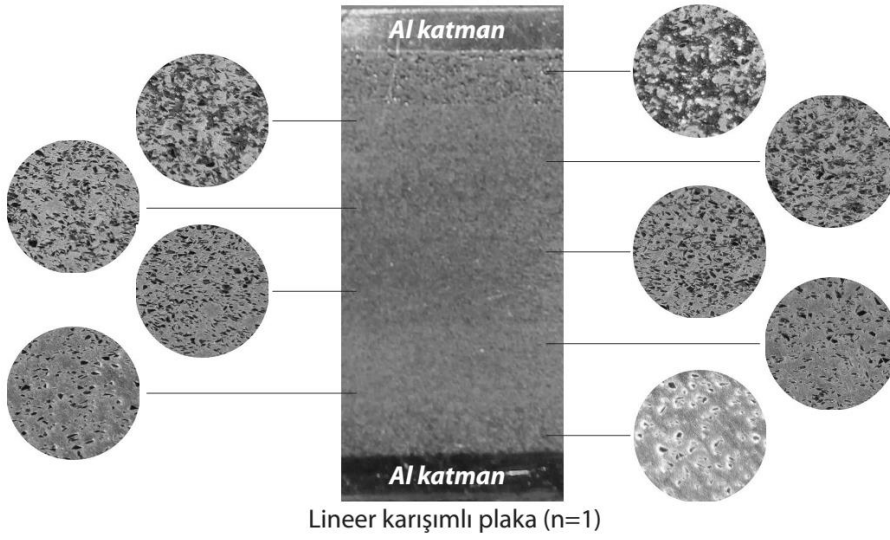
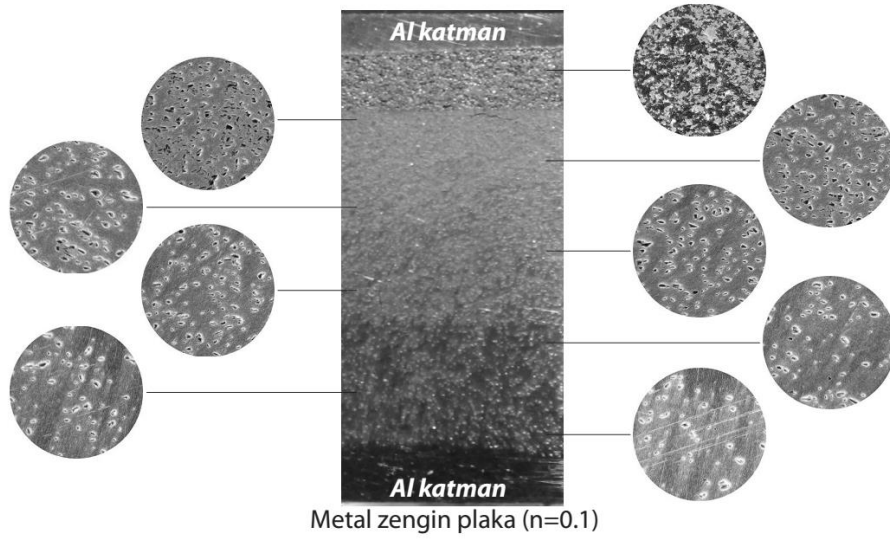


$n = 1$ (Lineer karışımli plaka)



$n = 10$ (Seramik yoğun plaka)

Şekil 18. Seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip FKS plakalar için farklı kompozisyonlardaki plakalara ait hacimsel oranlar



Şekil 19. Seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip FKS plakalar için farklı kompozisyonlardaki plakalara ait plaka kalınlığı boyunca bileşenlerin değişimini gösteren makro görüntüler

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 5'te yukarıda bahsi geçen seramiklere ait özellikler verilmiştir.

Tablo 4. Al 6061 kimyasal bileşimi

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Diğer	Al
0.7	0.4-0.8	0.15-0.4	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25	0.15	0.15	Kalan

Farklı seramik bileşenler ve toz boyutlarının balistik performans üzerindeki etkilerin de incelendiği bu çalışma kapsamında, alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC) ve bor karbür (B_4C) seramik bileşenler için ortalama 3, 9, 44 ve 125 mikron boyutlarındaki tozlar kullanılmıştır.

Tablo 5. Zırh yapımında kullanılan seramik malzeme özellikleri

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

3.5.2 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 metal ve seramik miktarları, karıştırma kaplarına konularak, homojen olarak karışabilmeleri için Şekil 20’de gösterilen Tubular marka karıştırıcı ile 5 saat süreyle karıştırılmıştır.

3.5.3 Üretim Kalıpları

Tozların soğuk olarak istiflenmesi ve basınç altında sinterlenme işlemlerinde kullanılmak üzere, Şekil 21’de gösterilen üretim kalıpları, sıcak iş çeliğinden (AISI2344) üretilmiş ve ısıl işlem ile 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.



Şekil 20. Toz karıştırma ünitesi

3.5.4 Plaka Sinterleme Ünitesi

90 mm çapındaki kalıp içerisinde, düşük basınç altında soğuk presleme ile belirli hacimsel oranlardaki toz karışımlarından, katman katman hazırlanan numuneler, Şekil 22’de gösterilen fırın içerisine yerleştirilerek, 600°C sıcaklıkta yaklaşık olarak 90 dakika, düşük basınç altında preslenmiştir. Sinterleme işlemi sonrası, kalıp içinde kontrollü olarak basınç altında soğutulan numuneler, kalıp içerisinden çıkarılmıştır.

3.6 Balistik Test Sistemi

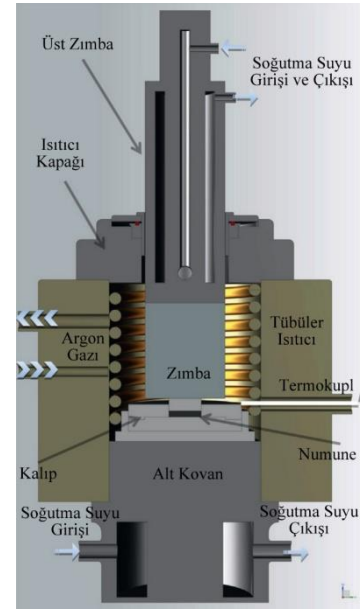
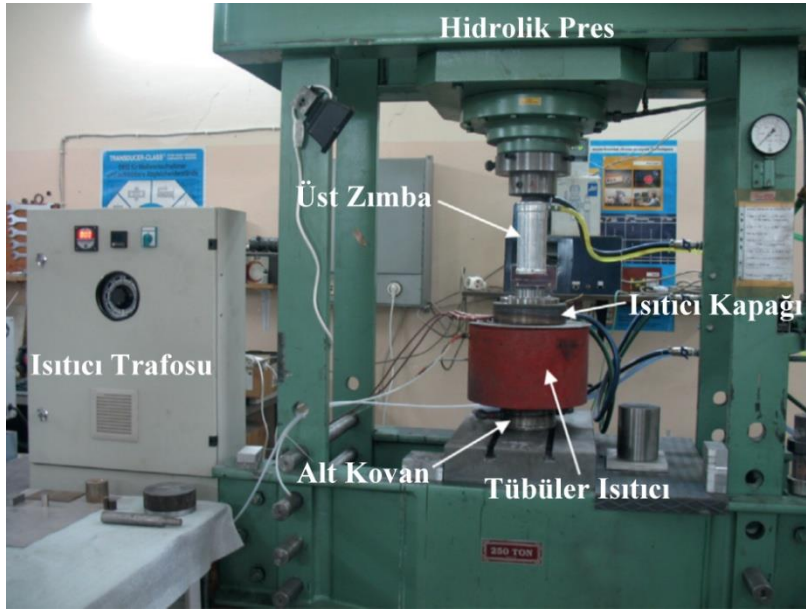
Bu çalışmada gerçekleştirilen balistik testler TÜBÜTAK desteği ile Amerika menşeli Physics Applications Incorporation (PAI) firmasından ithal edilen ve Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarında bulunan, tek kademeli balistik gaz silahı (*gas gun*) ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 23).

Gaz silah sisteminde, merminin fırlatılması için hava, nitrojen, helyum gibi farklı tür gazlar kullanılabilmektedir. Gaz silahındaki lançer sistemi, 12,7 mm çapında ve 1,8 m uzunluğunda bir namluya sahiptir (Şekil 24). En yüksek çalışma basıncı 690 bar olan lançer sistemi, farklı tipte mermiler ile farklı hızlarda atışlar yapabilmektedir. Gaz silah sisteminin basınçlandırma ve ateşleme mekanizması söz konusu firma tarafından geliştirilen bir yazılım kullanılarak Şekil 25’te gösterilen kontrol ünitesi tarafından bilgisayar kontrollü olarak yapılmaktadır.



Şekil 21. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka üretimi için sıcak iş çeliğinden (AISI2344) imal edilmiş kalıplar

Farklı basınç ve diyaframlar kullanılarak 300 m/s ile 1200 m/s hız aralığında yüksek hassasiyette atışlar yapılabilmektedir. Lançer sistemi, metal veya polimer malzemeden yapılan diyaframlar (Şekil 26 a) ile ayrılmış üç hazneden oluşmaktadır. İlk hazne, diyafram patlama basıncından daha düşük bir basınç değerinde gaz ile basınçlandırılır, daha sonra ikinci haznede aynı basınca çıkarıldıktan sonra ilk haznedeki basınç iki katına çıkarılır.



Şekil 22. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların üretimi için kullanılan sıcak pres ünitesi ve kesit görünüşü

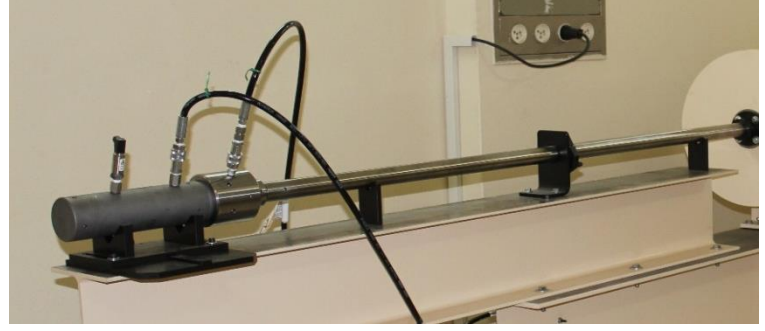
İkinci haznedeki gazın ani olarak boşaltılması ile diyafram patlar ve yüksek basınçlı gaz son haznede bulunan mermiyi harekete geçirir. Mermi lançer sisteminin son haznesi ile bağlantılı olan namluya, polimer veya metal malzemelerden üretilmiş sabot (Şekil 26 b) içerisinde yerleştirilir. bulunan iki ışık perdesini kesmesi için geçen süreyi hesaplayarak mermi hızının bulunması prensibi ile çalışır.

3.6.1 Mermi Hızı Ölçüm Sistemi

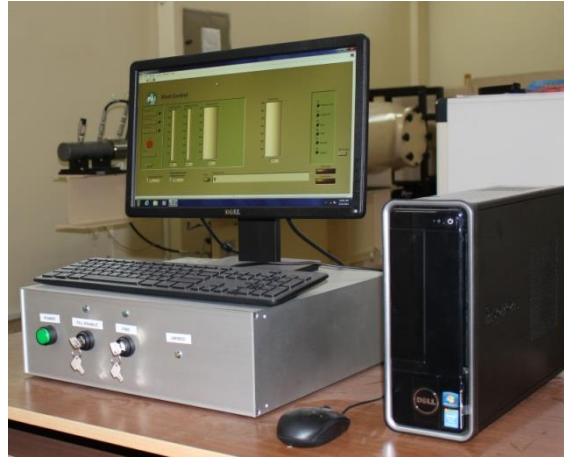
Testlerde, mermi hızlarının ölçümü, gaz silah sistemine entegre edilmiş hız ölçüm sistemi ile yapılmaktadır (Şekil 27). Sistem, namludan çıkan merminin, aralarında sabit bir mesafe



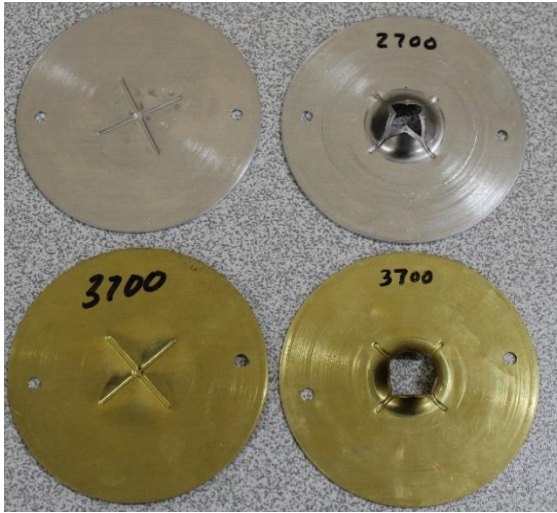
Şekil 23. Gaz silah sistemi



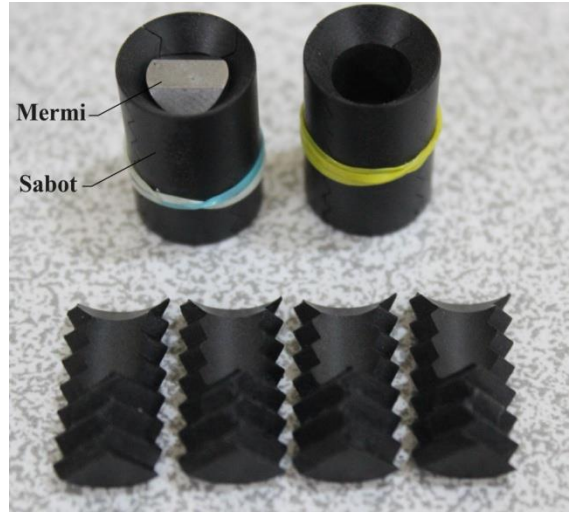
Şekil 24. Lançer



Şekil 25. Bilgisayar destekli kontrol ünitesi



(a)



(b)

Şekil 26. Diyafram ve sabot

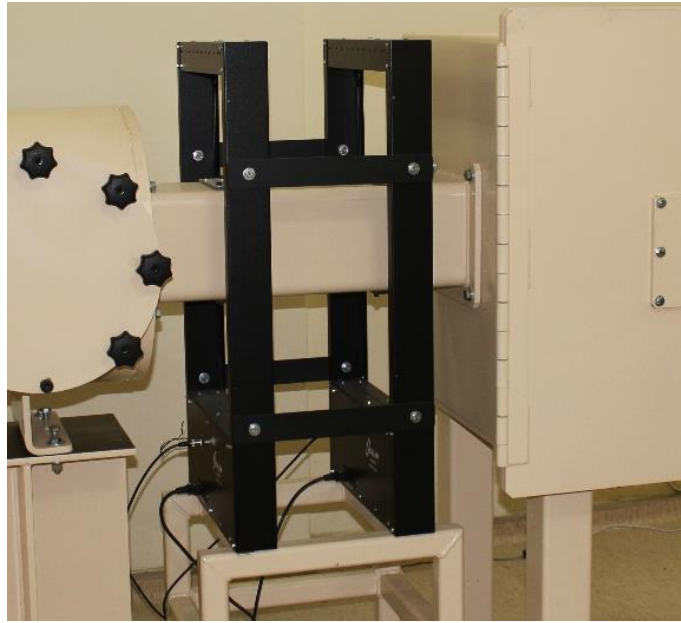
3.6.2 Hedef Plakaları Sabitleme Yöntemi

Gaz silah sistemi ile birlikte verilen hedef sabitleme plakası dörtgen plakalar için tasarlanmış olması sebebiyle fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalar Şekil 28’de gösterilen

sabitlenme plakaları ürettirilerek hedef tankı içerisine sabitlenmiştir. Sayısal modelde de söz konusu sınır şartı dikkate alınarak analizler yapılmıştır.

3.6.3 Balistik Testlerde Kullanılan Mermiler

Balistik testlerde, standartlarda tanımlanmış parçacık benzetimli mermiler kullanılabilmektedir. Bu mermilerin geometrik, malzeme ve teknik özelliklerini gösteren standartlar mevcuttur. Yine bu amaçla kullanılan STANAG ve MIL-DTL standartları mevcuttur. Testlerde, numunelerin balistik performansını belirlemek için STANAG 2920 (NATO STANAG 2920, 2003) ve MIL-DTL-46593B (MR) (MIL-DTL-46593B, 2008)



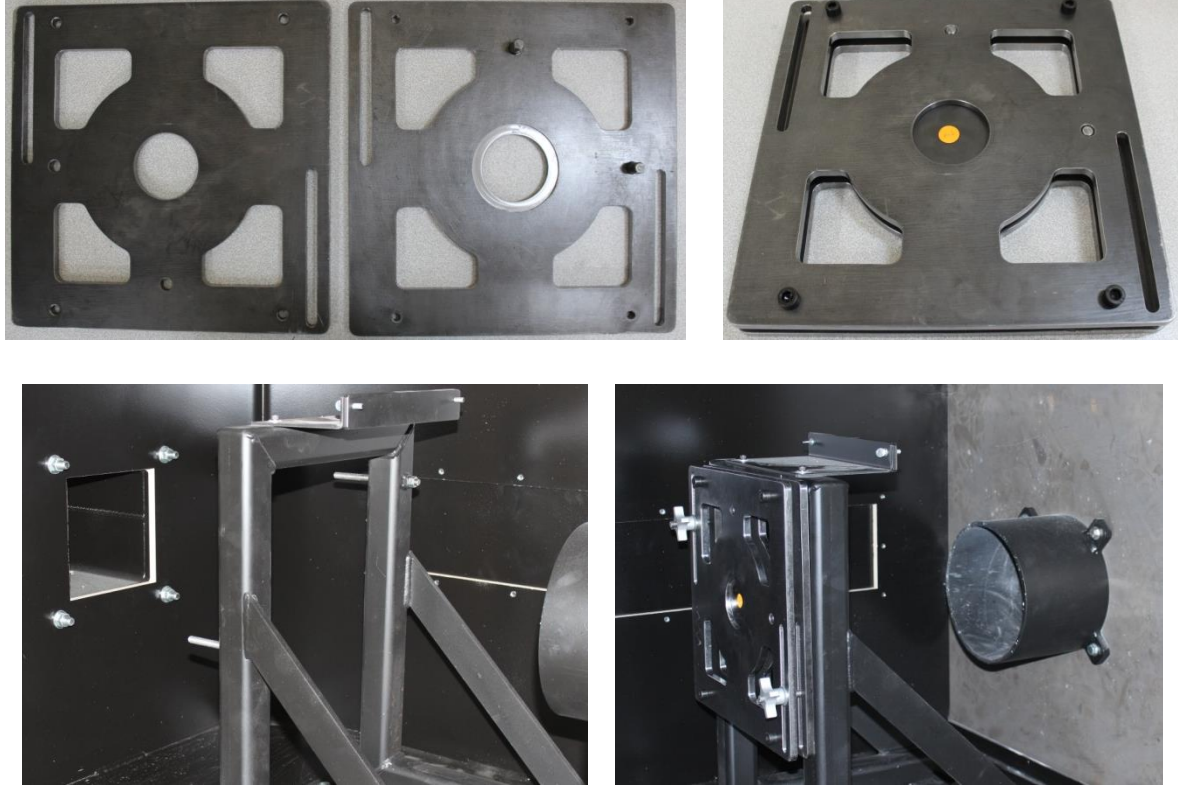
Şekil 27. Hız ölçüm sistemi

standartlarına göre tanımlanmış 0.30 kalibre FSP (Fragment Simulating Projectiles-Parçacık Benzetimli Mermiler) mermiler kullanılmıştır (Şekil 29 ölçüler mm birimindedir). FSP mermiler AISI 4340H çeliğinden üretilmiş olup özellikleri Tablo 6’ da verilmiştir.

3.7 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

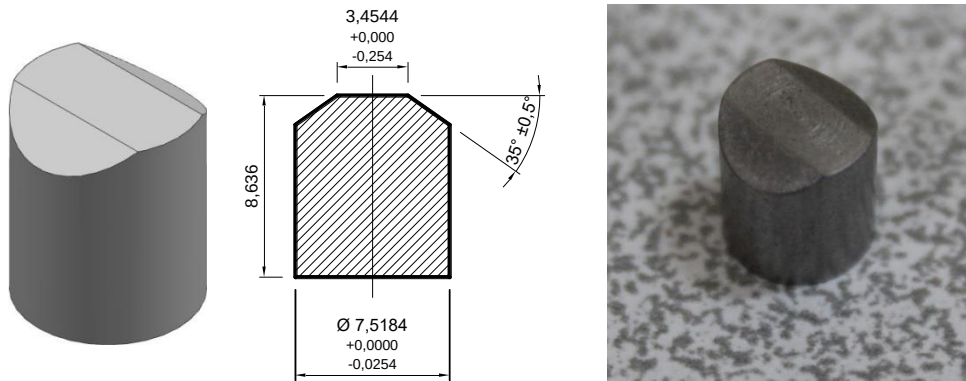
seviyeleri, NIJ 0101.03; kurşun geçirmez yelek kompozit zırhların testleri ve MIL-STD-662; zırhlar için V50 balistik testi ile ilgilidir. Tablo 7 ve Tablo 8’de sırasıyla NIJ ve STANAG standartlarında balistik koruma seviyeleri verilmiştir.



Şekil 28. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların hedef noktasına sabitlenmesi

Tablo 6. 0.30 kalibre FSP mermi özellikleri

Malzeme	AISI 4340H-4337H
Ağırlık (grain)	44±0.5
Sertlik (RC)	30±2



Şekil 29. 0.30 kalibre FSP mermi

Tablo 7. Balistik koruma seviyeleri (NIJ 0101.03) (NIJ Standard 0101.03, 1987).

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

Tablo 8. Balistik koruma seviyeleri (STANAG-4569) (NATO STANAG 4569, 2004)

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: Pirinç kaplamalı kurşun çekirdek	30 m
1	5.56 mm x 45 NATO	900	Tüfek: Pirinç kaplamalı kurşun çekirdek	30 m
1	5.56 mm x 45 M193	937	Tüfek: Pirinç kaplamalı kurşun çekirdek	30 m

4. BULGULAR VE TARTIŞMA/SONUÇ

4.1 Sayısal Analizler

Teorik ve deneysel olmak üzere iki bölümden oluşan bu çalışmanın teorik kısmında, alüminyum ve farklı malzeme kompozisyonlarına ($n=0.1$, $n=1.0$, $n=5.0$ ve $n=10.0$) ve farklı seramik bileşenlere (SiC ve B_4C) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç 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 analiz sonuçları incelenmiştir.

Balistik test şartlarına benzer olarak geliştirilen sayısal modelin başarısını belirlemek amacıyla ilk olarak alüminyum 6061 plaka için analizler yapılmış ve sayısal sonuçların deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Şekil 30'da alüminyum plaka için sayısal analiz sonuçları verilmektedir. 512.3 m/s mermi hızında gerçekleştirilen analizlerde mermi plaka orta noktasına kadar nüfuz etmiş ve plaka arka yüzeyinde şişme meydana gelmiştir.

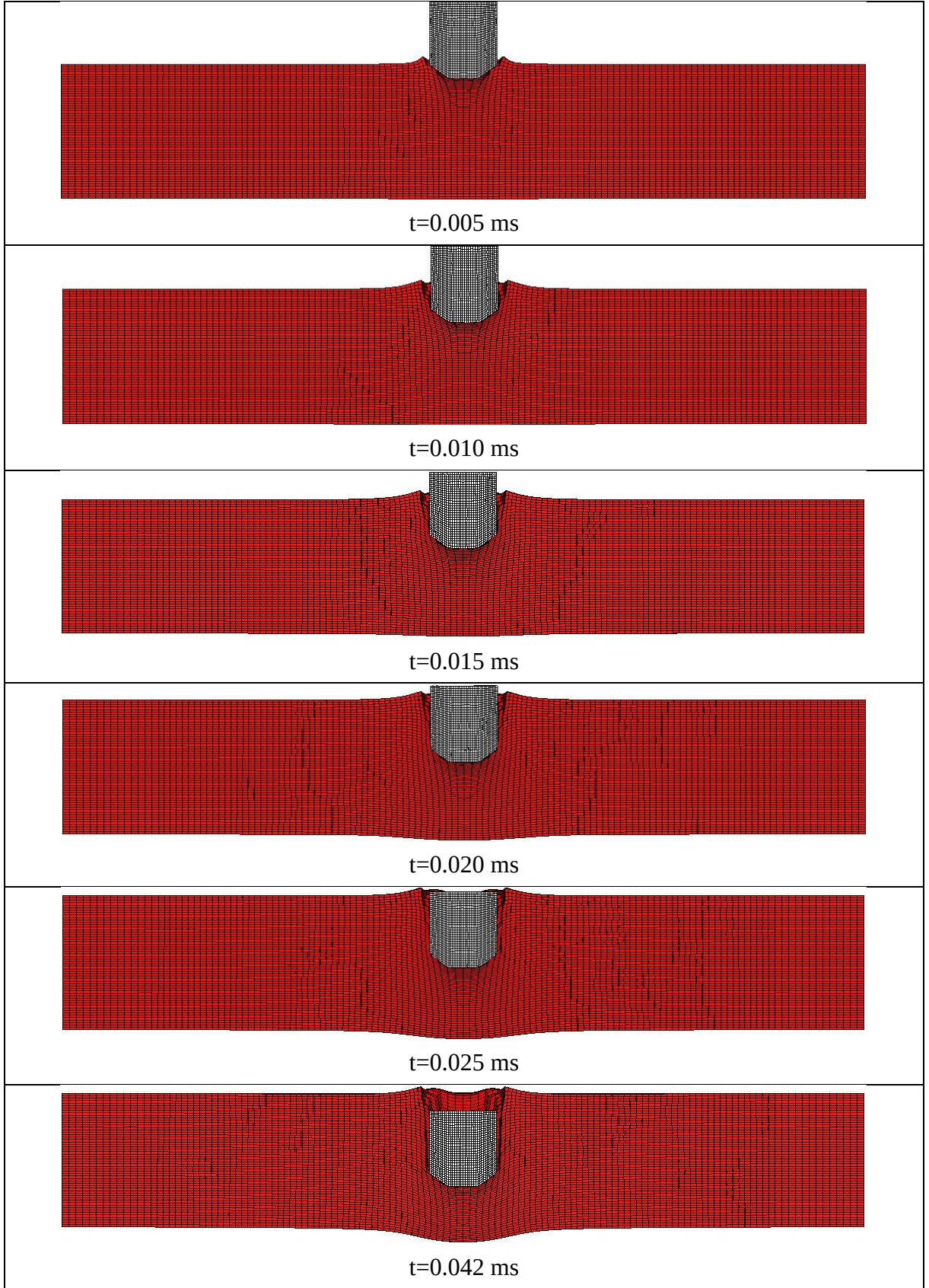
Malzeme kompozisyonun balistik performans üzerine etkisinin incelendiği analizlerde, (Şekil 31-Şekil 34) 2.851 g ağırlığındaki 0.30 kalibre FSP mermi, $n=0.1$ (metal zengin), $n=1.0$ (lineer karışım), $n=5.0$ ve $n=10.0$ (seramik zengin) FKS plakalar üzerine sırasıyla 521.1, 513.2, 517.5 ve 518.8 m/s hızlarda çarptırılmıştır. Söz konusu hızlar gaz silah sistemi ile gerçekleştirilen balistik testlerde her bir plaka için ölçülen hız değerleridir. Analizlerde fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların en üst katmanı (çarpma yüzeyi) %100 alüminyum olup, alüminyum katmanın hemen altındaki seramik zengin katman %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahiptir. Plaka alt yüzeyi de %100 alüminyum olan FKS plakaların, ara katmanları her bir kompozisyon için bileşenlerin hacimsel oranlarındaki değişime bağlı olarak bir kuvvet kanununa göre değişmektedir. Şekiller incelendiğinde plaka içerisindeki seramik oranının artmasıyla nüfuziyet hızında azalma görülmüştür. Ayrıca artan seramik oranı ile plaka rijitliği artmış ve penetrasyon derinliği ve plaka arka yüzeylerinde oluşan şişme miktarları da azalmıştır.

Seramik malzemeler, balistik sistemlerde kullanılacak bir malzemedan beklenen yüksek sertlik, termal direnç ve basma dayanımına sahip olsa da kırılgan bir yapıya sahip olmalarından dolayı tek başına bu amaç için kullanılmazlar. Zırh sistemlerinde genellikle ön

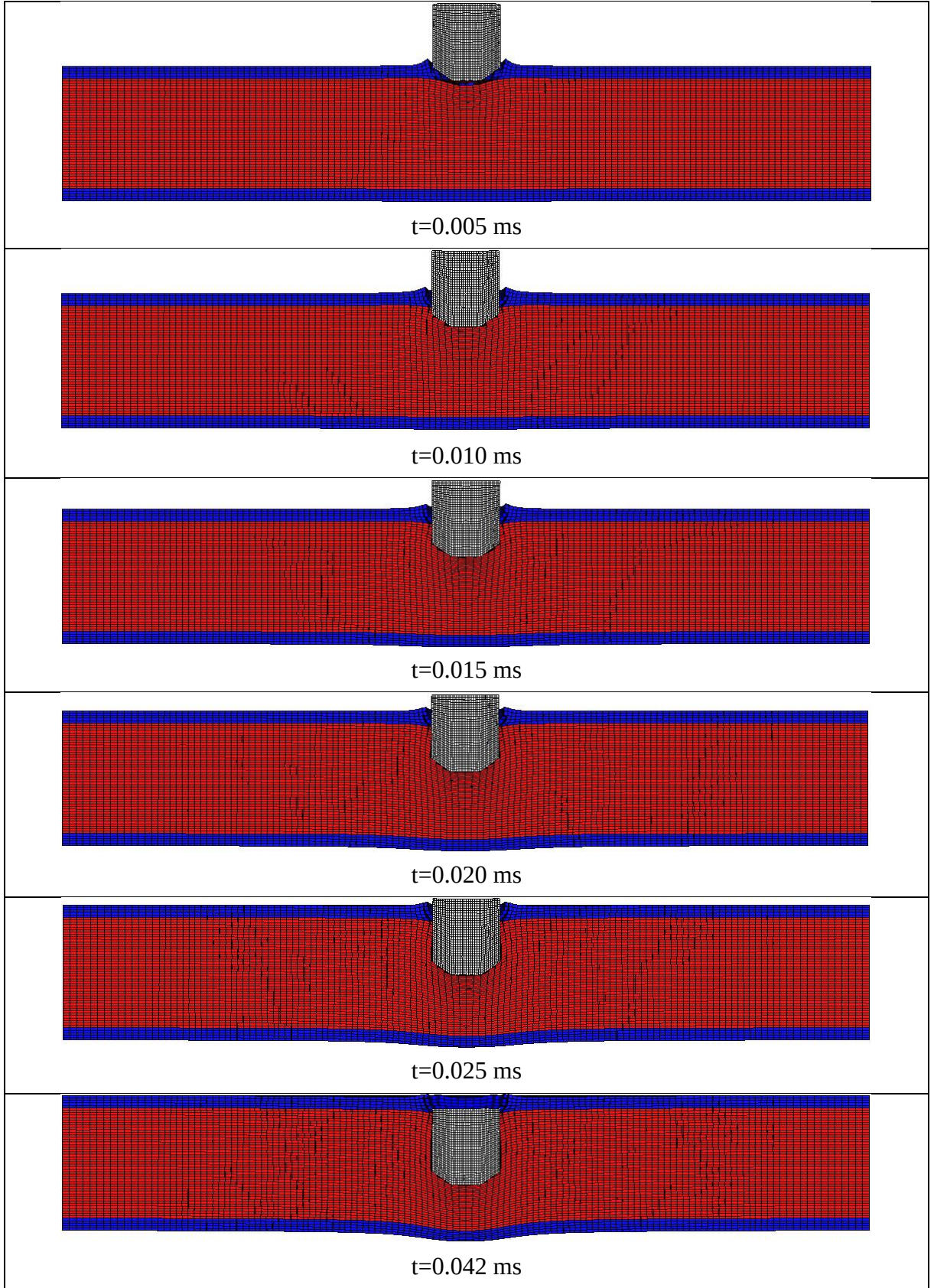
yüz malzemesi olarak kullanılan seramikler, merminin delici ucunu deforme ederken arka yüzeyde kullanılan sünek (metal, polimer vs.) malzemeler enerjiyi absorbe ederek merminin durdurulmasını sağlamakta, mermi ve parçacıkları tutarak tam nüfuziyeti engellemektedir.

Proje kapsamında toz istifleme ve sıcak presleme yöntemiyle üretilen FKS plakalar, alüminyum katman altında bulunan en yüksek seramik oranına sahip katman için sırasıyla %70 seramik-%30 metal, %60 seramik-%40 ve %50 seramik-%50 metal oranları için ayrı ayrı üretilmiş ve bu plakaların balistik testleri yapılmıştır. Testlerde seramik zengin katmanı %50 seramik-%50 metal oranına sahip FKS plakalar daha yüksek performans göstermesi sebebiyle, n=5.0 malzeme kompozisyonunda ve seramik zengin katmanı %50 B₄C - %50 Al karışım oranına sahip FKS plaka sayısal olarak modellenmiş ve değişen mermi hızının penetrasyon derinliği ve deformasyon üzerindeki etkisi incelenmiştir (Şekil 35-Şekil 37). Üç farklı mermi hızında (551.7 m/s, 588.3 m/s ve 620.1 m/s) gerçekleştirilen analizlerde artan mermi hızı ile penetrasyon derinliği artmıştır.

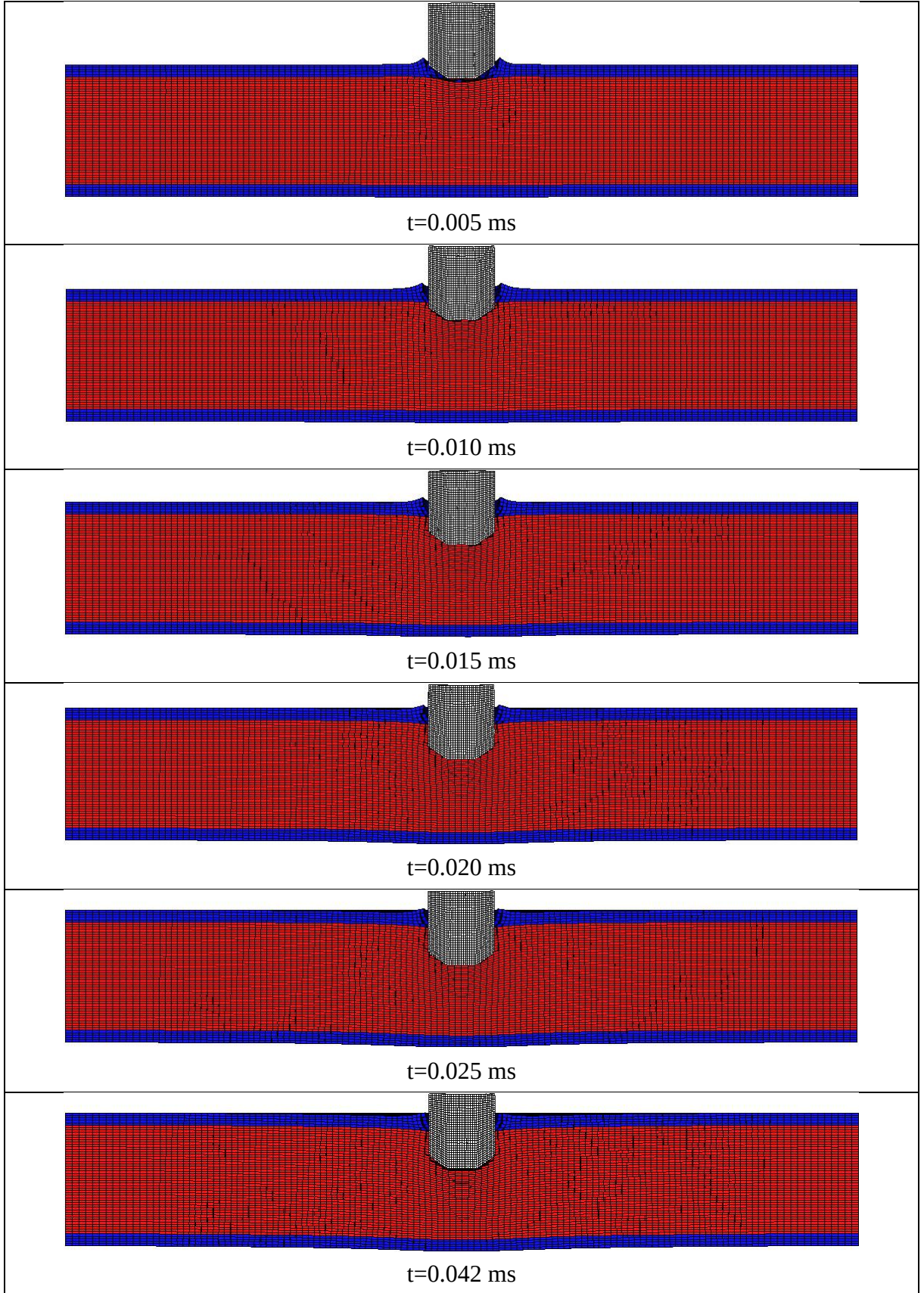
Zırh sistemlerinde yaygın olarak kullanılan seramiklerin başında alüminyum oksit, bor karbür, silisyum karbür ve titanyum diborür gelmektedir. Farklı seramik bileşenlere sahip FKS plakaların balistik performans üzerine etkisinin de incelendiği bu çalışmada, 588.3 m/s hıza sahip mermi B₄C-Al ve SiC-Al bileşenlere sahip FKS plakaların üzerine çarptırılmış ve yüksek rijitlik/ağırlık oranına sahip B₄C seramik bileşene sahip plakaların daha yüksek balistik performans gösterdiği sonucuna varılmıştır (Şekil 38).



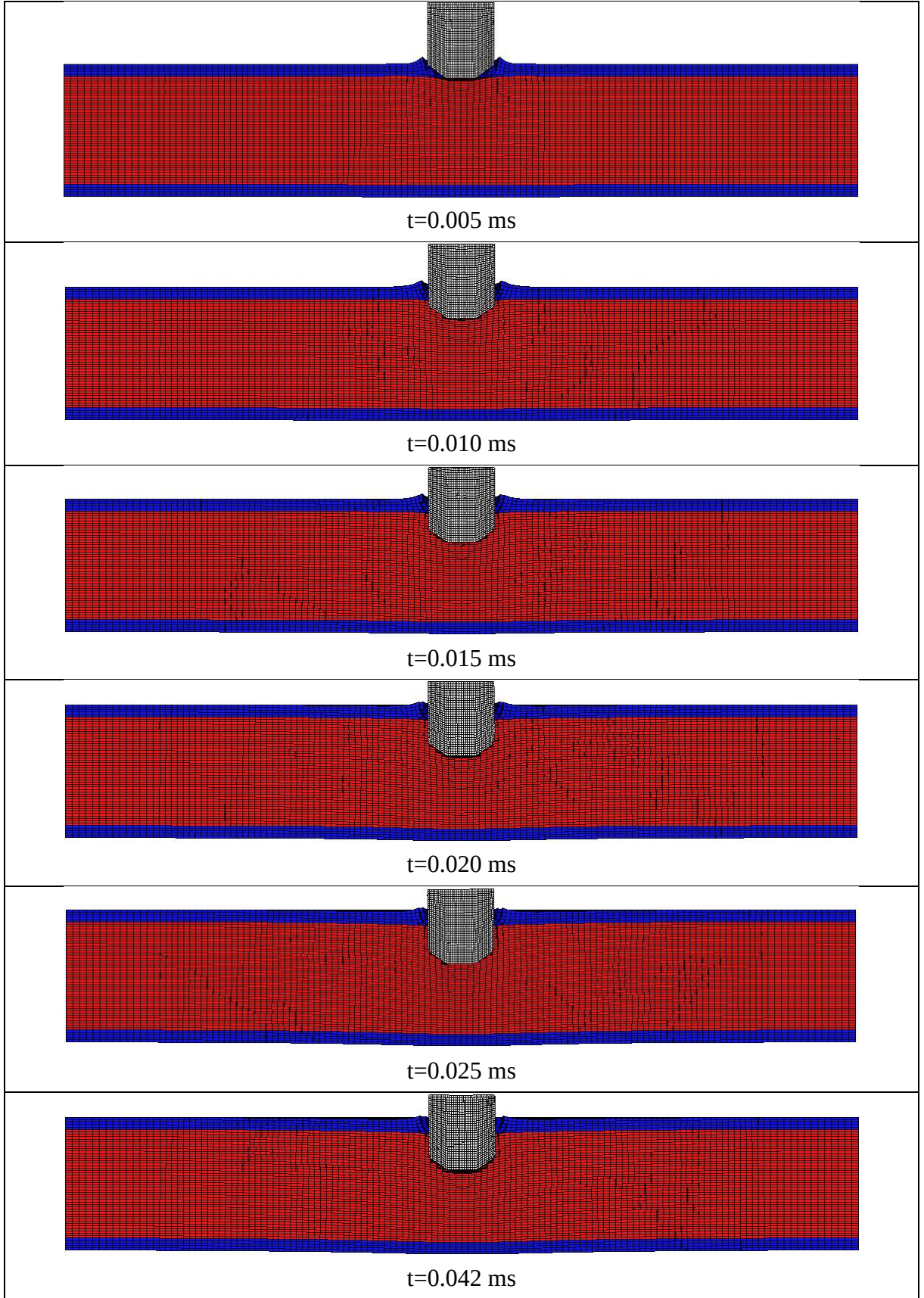
Şekil 30. %100 Al plakada çarpma esnasında oluşan sayısal hasar ve deformasyonlar ($v=512.3$ m/s, $E=374.1$ J)



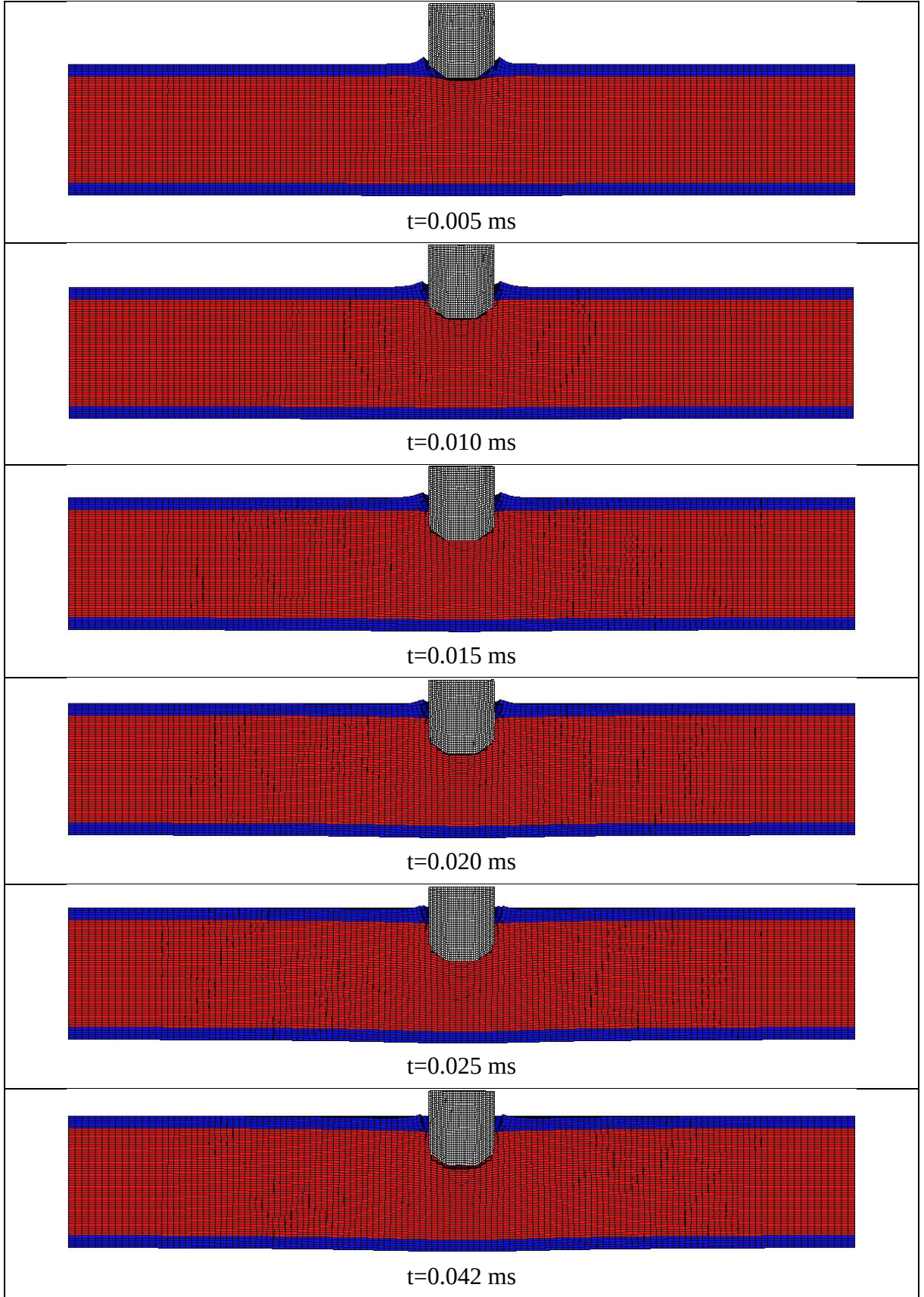
Şekil 31. Seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip metal-yoğun ($n=0.1$) FKS plakada çarpma esnasında oluşan sayısal hasar ve deformasyonlar ($v=521,1$ m/s)



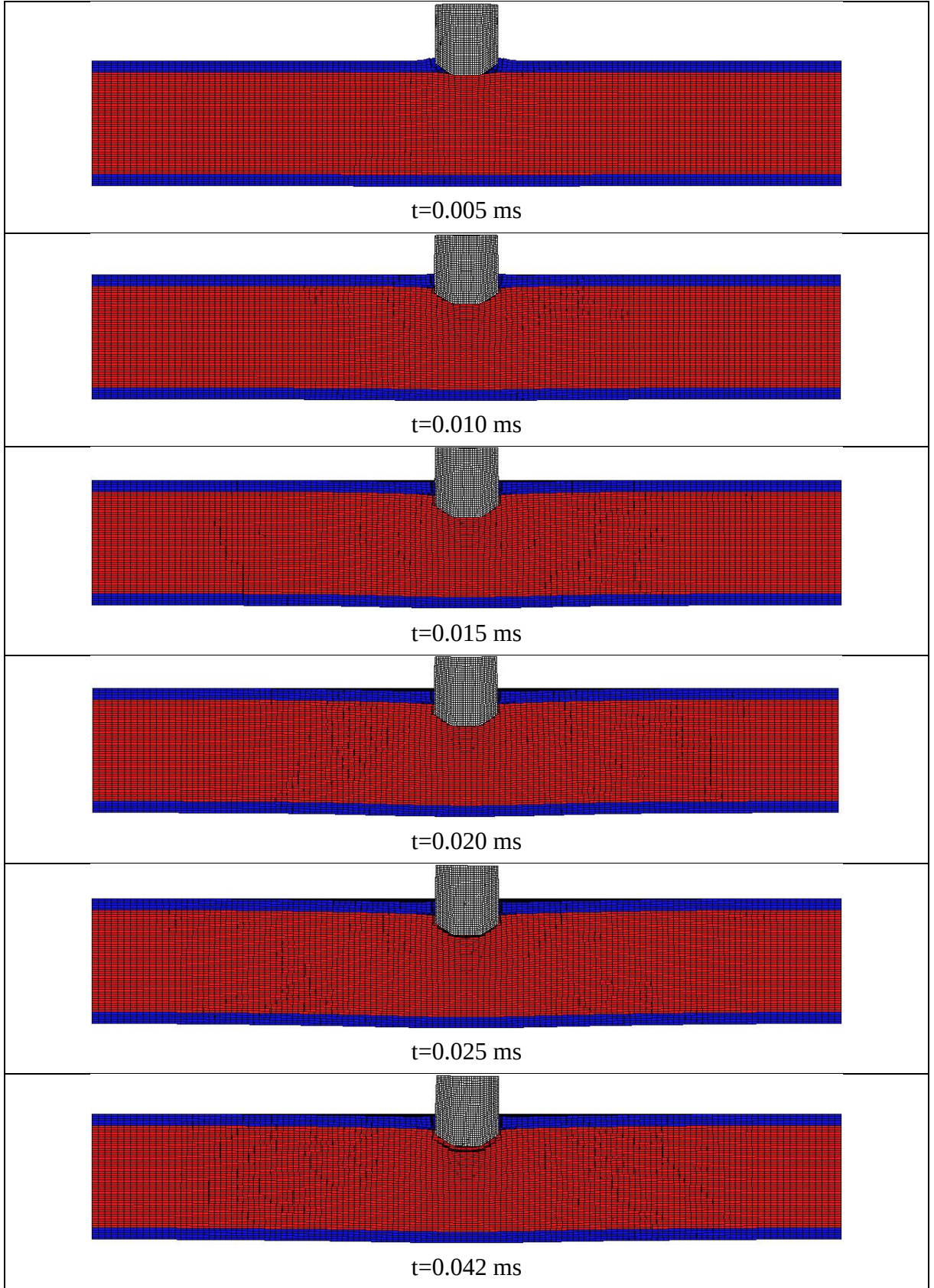
Şekil 32. Seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip lineer ($n=1.0$) FKS plakada çarpma esnasında oluşan sayısal hasar ve deformasyonlar ($v=513,2$ m/s)



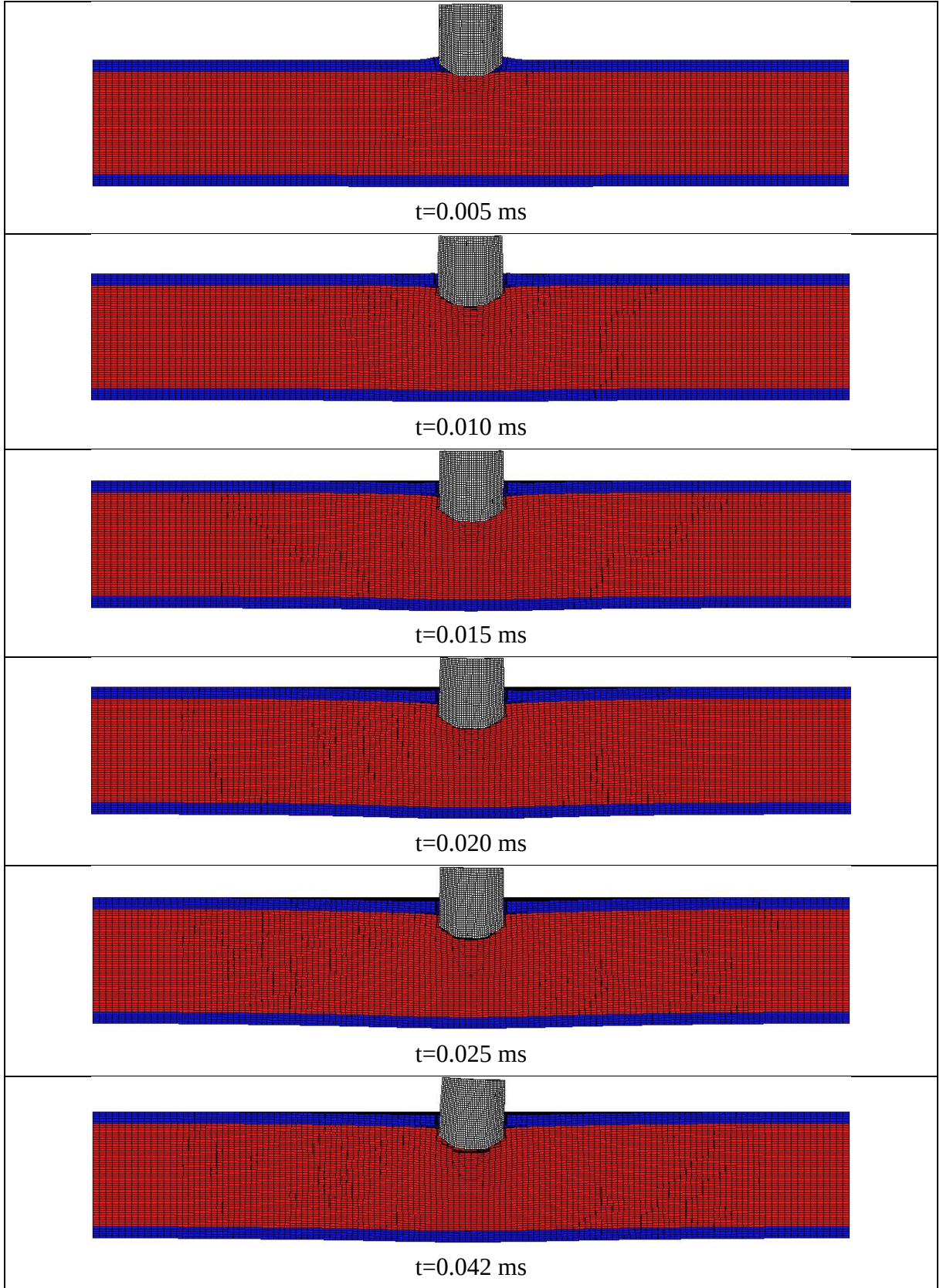
Şekil 33. Seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip $n=5.0$ FKS plakada çarpma esnasında oluşan sayısal hasar ve deformasyonlar ($v=517,5$ m/s)



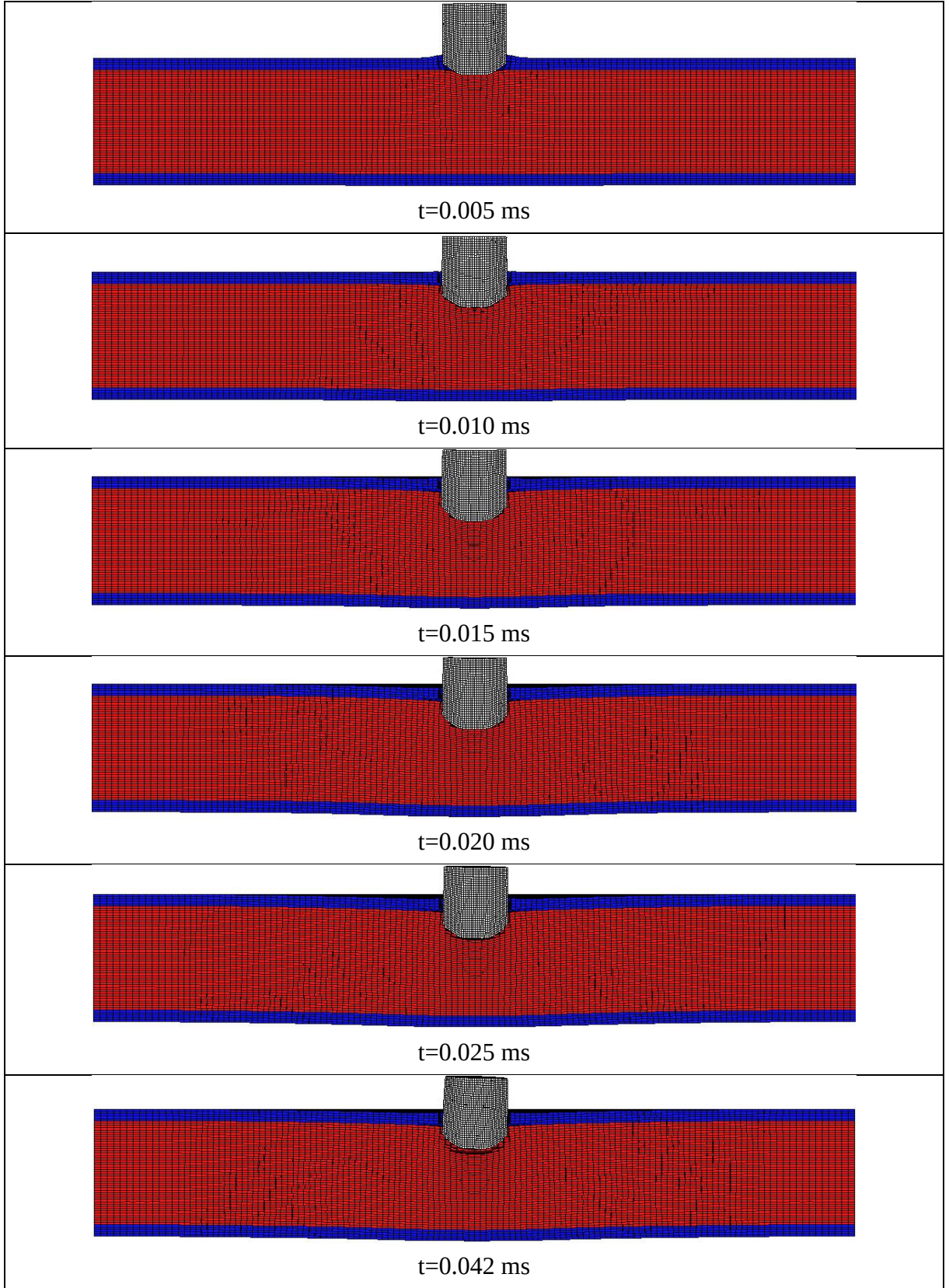
Şekil 34. Seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip seramik-yoğun ($n=10.0$) FKS plakada çarpma esnasında oluşan sayısal hasar ve deformasyonlar ($v=518,8$ m/s)



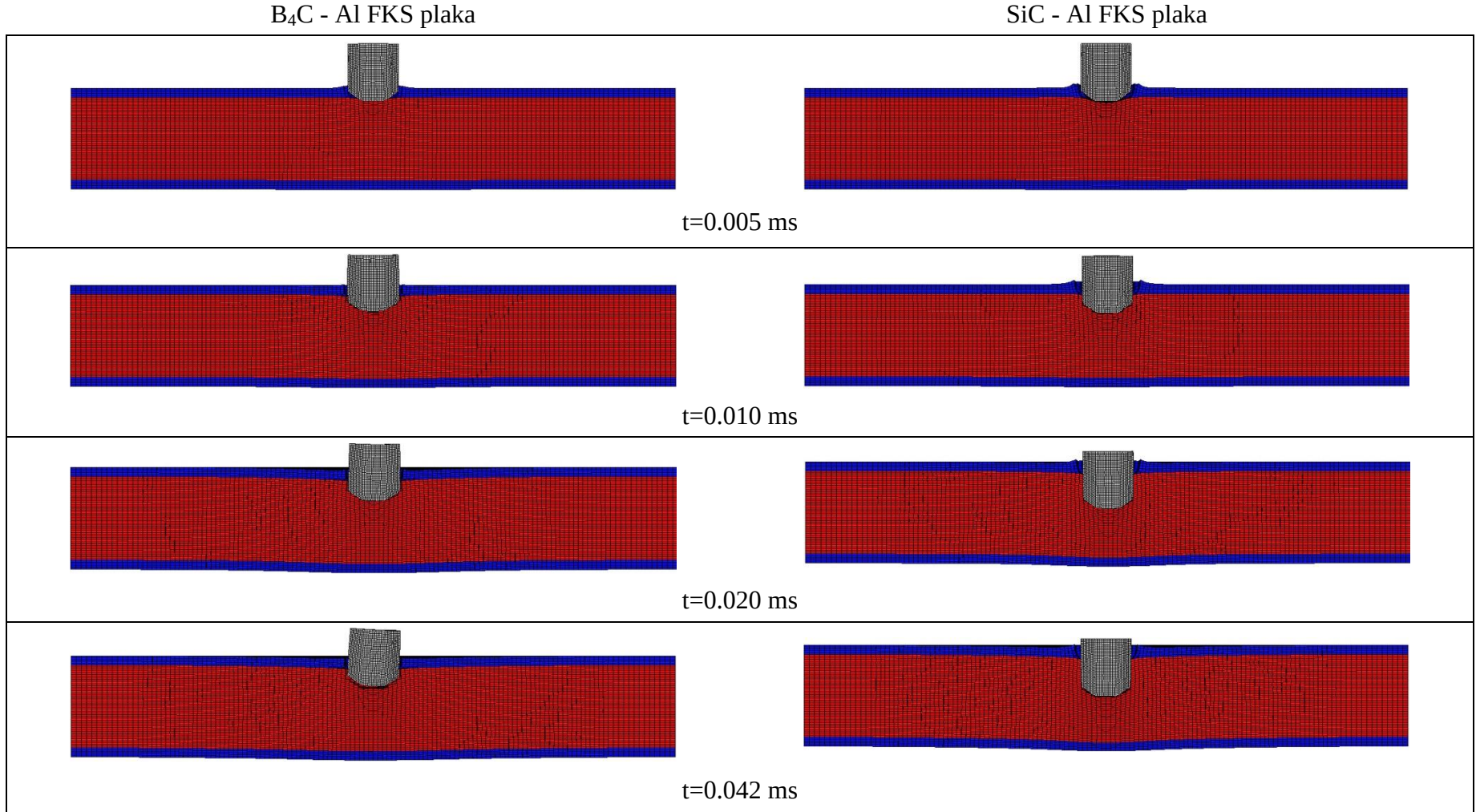
Şekil 35. Seramik zengin katmanı %50 B4C - %50 Al karışım oranına sahip $n=5.0$ FKS plakada çarpma esnasında oluşan sayısal hasar ve deformasyonlar ($v=551.7$ m/s)



Şekil 36. Seramik zengin katmanı %50 B4C - %50 Al karışım oranına sahip $n=5.0$ FKS plakada çarpma esnasında oluşan sayısal hasar ve deformasyonlar ($v=588.3$ m/s)



Şekil 37. Seramik zengin katmanı %50 B4C - %50 Al karışım oranına sahip $n=5.0$ FKS plakada çarpma esnasında oluşan sayısal hasar ve deformasyonlar ($v=620.1$ m/s)



Şekil 38. Seramik zengin katmanı %50 Seramik - %50 Metal karışım oranına sahip $n=5.0$ FKS plakada çarpma esnasında oluşan sayısal hasar ve deformasyonlar ($v=588.3$ m/s)

4.2 Balistik Test Sonuçları

Bu bölümde, fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların balistik yükleme altındaki darbe davranışları, deneysel olarak incelenmiştir. Balistik testler, proje kapsamında Amerika menşeli Physics Applications Incorporation (PAI) firmasından ithal edilen ve Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarına kurulan tek kademeli balistik gaz silahı (gas-gun) ile gerçekleştirilmiştir. Testlerde STANAG 2920 ve MIL-DTL-46593 (MR) standartlarında tanımlanmış olan 0.30 kalibre parçacık benzetimli mermiler (FSP-Fragment Simulating Projectiles) kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalarda balistik performans üzerinde; değişen malzeme kompozisyonunun, farklı seramik bileşenlerinin, farklı seramik toz boyutunun ve hacimsel olarak en yüksek seramik oranına sahip katmanın ihtiva ettiği seramik oranının etkisi incelenmiştir.

Balistik performans çalışmalarında, plakanın balistik limitinin tespit edilmesi önemli bir husustur. Balistik limit ışık geçecek oranda kısmi nüfuziyetin meydana geldiği durum olarak tariflenebilir. Çalışmalarda seramik zengin katmanı %50 B₄C ve %50 Al oranına sahip FKS plaka için balistik limit çalışması yapılmıştır.

Toz istifleme sıcak presleme yöntemi ile üretilen 90 mm çap ve yaklaşık 16 mm kalınlığa sahip alüminyum ve farklı kompozisyonlardaki farklı seramik bileşen ve toz boyutuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar hedef noktasında sabitleme plakaları arasına yerleştirildikten sonra plaka orta noktalarına atışlar yapılmıştır.

Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda, seramik zengin 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 sönmleyecektir. Bu mekanizma göz önünde bulunarak yapılan balistik testlerde FKS plakalar seramik zengin katman atış yönünde olacak şekilde konumlandırılmıştır. Özkeş (2013), fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların çarpma yükleri altındaki davranışlarını incelemiş ve çarpma yüzeyinin seramikten metale doğru olarak kademelendiği durumda daha yüksek darbe dayanımın elde edildiğini göstermişlerdir. Literatürdeki zırh balistiği üzerinde yapılan diğer çalışmalarda da seramik katmanın ön yüz malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir (Zhou vd., 2004; Krishnan vd., 2010; Ravid vd., 2003; Adams, 2001; Shockey ve Marchand, 2001).

50 mikron Al 6061 tozu kullanılarak FKS plakalar ile aynı yöntemlerle üretilen alüminyum plakaya 512.3 m/s hızda gerçekleştirilen testte mermi plaka içerisine nüfuz etmiş fakat tam delinme (perforasyon) gerçekleşmemiştir ve plaka arka yüzeyinde şişme meydana gelmiştir.(Şekil 39).

Değişen malzeme kompozisyonunun balistik performans üzerindeki etkisini incelemek üzere 4 farklı malzeme kompozisyonunda (n=0.1, 1.0, 5.0 ve 10.0) üretilen FKS plakalar için gerçekleştirilen testlerde (Şekil 40Şekil 41), mermi metal zengin (n=0.1) ve lineer karışım (n=1.0) oranlarına sahip plakalar tarafından tutulurken seramik oranı yüksek olan n=5 ve n=10 (seramik zengin) kompozisyona sahip plakalarda delinme oluşmuştur.

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, metal yoğun (n=0.1) ve lineer karışıma (n=1.0) sahip plaka arka yüzeyinde oluşan radyal çatlaklarda bu duruma örnektir.

Toz istifleme sıcak presleme yöntemiyle üretilen FKS plakalar seramik ve metal bileşenlerden oluşmaktadır. Yapıyı oluşturan katmanlar farklı hacimsel oranlarda seramik ve metal toz ihtiva etmekte olup metal oranının azalması ile katman içerisindeki seramik tozları bir arada tutacak metal matris zayıflamakta ve yapı bütünlüğünü koruyamamaktadır. Seramik oranı fazla olan plakalarda delinme oluşması da bu durumun bir neticesidir.

Balistik testler sonrası katmanlar arası yapıyı görmek amacıyla plakalar epoksi kalıba alınarak çarpma yüzeyine dik doğrultuda kesilmiştir. Şekil 41’te sırasıyla n=0.1, n=1.0, n=5 ve n=10 malzeme kompozisyonlarına sahip FKS plakalarda mermi isabeti sonrasında oluşan deformasyon kesit resimleri verilmiştir. Kesit görüntülerinden anlaşılabacağı üzere, metal zengin ve lineer karışıma sahip plakalarda mermi yaklaşık olarak plaka ortasına kadar nüfuz etmiş ve plaka arkasında radyal çatlaklar oluşmuştur. Lineer karışıma sahip plakada, metal zengin plakaya kıyasla penetrasyon derinliği daha düşük seviyededir. Metal yoğun plaka arkasında şişme oluşmuş olup lineer karışıma sahip plakada şişme daha düşüktür. n=5 ve seramik zengin karışıma sahip plakalarda yüksek kırılma dayanımı sebebiyle mermi tam nüfuziyet sağlamıştır. Netice itibari ile değişen malzeme kompozisyonunun balistik performans üzerindeki etkisi aşikâr olup en yüksek balistik dayanım, lineer kompozisyona sahip plaka tarafından göstermiştir.

Seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip FKS plakaların balistik test sonrası, yüksek seramik oranına sahip plakalarda bütünlüğün korunmaması sebebiyle, Seramik zengin katmanı %60 SiC - %40 Al ve seramik zengin katmanı %50 SiC - %50 Al karışım oranına sahip FKS plakalar üretilerek balistik testler tekrarlanmıştır. Yaklaşık olarak 500 m/s mermi hızında gerçekleştirilen testlerde, seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip FKS plakalara kıyasla daha yüksek balistik performans elde edilmiştir. Şekil 42-Şekil 43 ve Şekil 44Şekil 45'te sırasıyla seramik zengin katmanı %60 SiC - %40 Al ve %50 SiC - %50 Al karışım oranına sahip FKS plakalarda mermi isabeti sonrasında oluşan deformasyon kesit resimleri verilmiştir. Resimler incelendiğinde yapı içerisindeki metal oranının artması ile plaka deformasyonu azalmakta ve plaka bütünlüğünü koruyabilmektedir. Seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip FKS plakalarda, seramik oranının artması ile balistik performansın da artması beklenirken lineer karışıma sahip kompozisyonlardan sonrası için bu eğilimin tersinde bir davranış tespit edilmiştir. Seramik tozları bir arada tutan alüminyum fazın azalması sebebiyle yapının bütünlüğünü koruyamaması şeklinde izah edilebilecek bu davranış, seramik zengin katmanı %60 SiC - %40 Al ve %50 SiC - %50 Al karışım oranına sahip plakalar için iyileşme göstermiştir. Mermi penetrasyonu açısından bakıldığında ise artan metal oranı ile penetrasyon derinliği azalmakta ve n=5 malzeme kompozisyonu için seramik zengin katmanı %50 SiC - %50 Al karışım oranına sahip FKS plaka en yüksek balistik performans göstermiştir. Söz konusu kompozisyona sahip plakanın en yüksek balistik performans gösterdiğinin desteklenmesi amacıyla seramik zengin katmanı sırasıyla %70 SiC - %30 Al, 60 SiC - %40 Al ve %50 SiC - %50 Al karışım oranlarına sahip FKS plakalara 600 m/s mermi hızı için balistik testler tekrarlanmıştır. Şekil 46Şekil 47, Şekil 48Şekil 49 ve Şekil 50Şekil 51'de sırasıyla seramik zengin katmanı sırasıyla %70 SiC - %30 Al, 60 SiC - %40 Al ve %50 SiC - %50 Al karışım oranlarına sahip FKS plakalarda mermi isabeti sonrasında oluşan deformasyon kesit resimleri verilmiştir. Resimler incelendiğinde değişen malzeme kompozisyonunun balistik davranış üzerinde etkili olduğu ve yapı içerisinde metal oranının artması ile katmanlar arası delaminasyonların azaldığı görülmektedir.

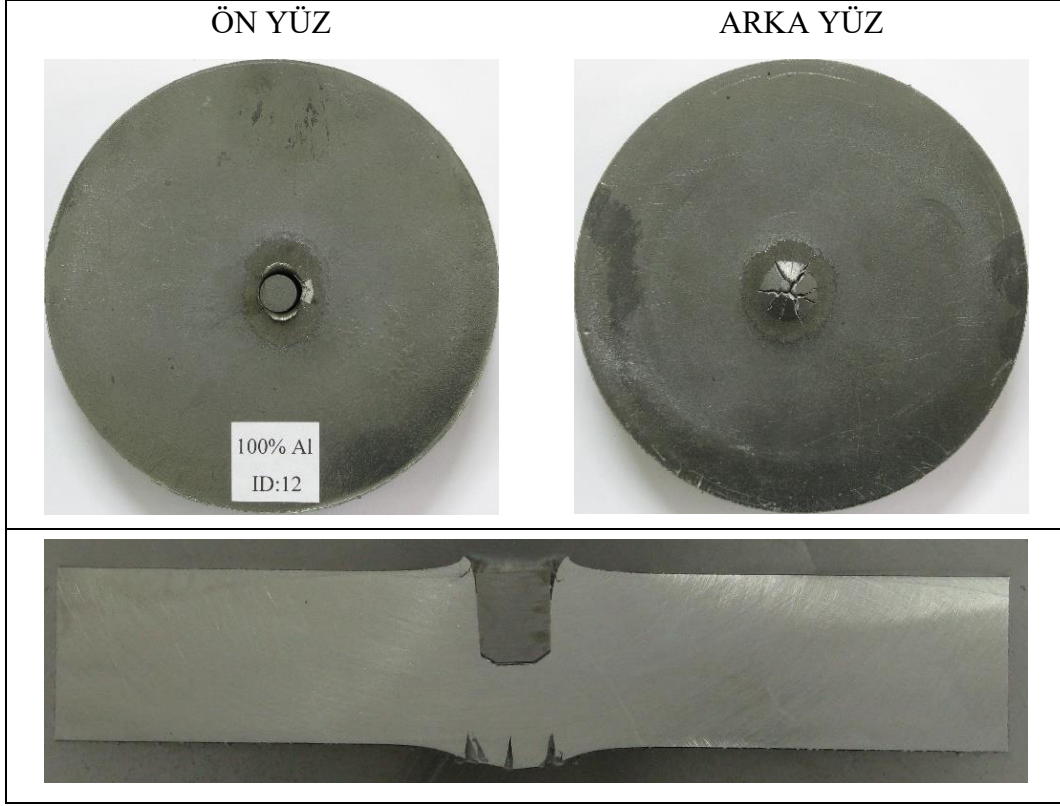
Farklı seramik bileşenlerin ve seramik toz boyutunun balistik performans üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan testlerde (Şekil 52Şekil 54). 3µm, 9µm, 44µm ve 125µm boyutlarında B4C tozları kullanılarak üretilen seramik zengin katmanı %50 B4C - %50 Al karışım oranlarına sahip plakaların balistik testleri sonucunda toz boyutunun artması ile plakaların balistik performansının ve mermi deformasyonlarının arttığı görülmüştür. Al₂O₃,

SiC ve B₄C seramik tozları kullanılarak üretilen FKS plakaların balistik test sonrası oluşan deformasyon kesit resimleri incelendiğinde, gerek yapı bütünlüğü gerekse balistik dayanım açısından B₄C tozunun daha yüksek performans gösterdiği tespit edilmiştir. Analizlerde (Şekil 54) mermi Al-B₄C fonksiyonel kademelendirilmiş plaka içerisine nüfuz etmiş ve plaka içerisinde kalmıştır ve plaka arka yüzeyinde ise şişme oluşmuştur.

Al-Al₂O₃ ve Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda ise tam delinme oluşmuş olup Al-Al₂O₃ bileşenlere sahip plaka daha fazla deforme olmuştur. Ayrıca özellikle seramik bileşenin hacimsel oranının yüksek olduğu tabakaların birbirine bağlanamadığı ve ara yüzeyden ayrıldığı görülmektedir bu durum Al-Al₂O₃ ve Al-B₄C fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalarda daha belirgin olup %70 seramik %30 metal karışıma sahip katmanlar, plakadan tamamen ayrılmış olup Al-SiC plakada ise bu ayrılma daha az olmuştur. Sonuç olarak alüminyum ile seramik tozları arasındaki reaktivite açısından SiC tozunun diğer seramik tozlara kıyasla daha başarılı olduğu anlaşılmaktadır. 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. Balistik testlerde Al-Al₂O₃ ve Al-SiC bileşenlere sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalarda delinme gerçekleşmiştir. 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 Al-Al₂O₃ ve Al-SiC FKS plakalarda mermi plaka üzerinden plaka arka yüzeyine doğru genişleyen konik bir parçayı koparmıştır. Al-Al₂O₃ fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada, Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaya göre katmanlar arası delaminasyonun daha fazla olduğu ve arka yüz deformasyon çapının arttığı görülmektedir. Al-B₄C plakada mermi yaklaşık olarak plaka kalınlığının yarısına kadar nüfuz etmiş ve plaka arka yüzeyinde radyal çatlaklar oluşmuştur. Ayrıca plakada seramik %70 bor karbür %30 alüminyum karışıma sahip katman ile altındaki katman arasında delaminasyon oluştuğu görülmektedir.

DeneySEL olarak gerçekleştirilen bir diğer çalışma da, yaklaşık olarak 16 mm kalınlığa sahip seramik zengin yüzeyi %50 B₄C -%50 Al karışım oranına ve n=5 malzeme kompozisyonuna sahip FKS plakanın balistik limit çalışmasıdır (Şekil 55Şekil 56). Üç farklı mermi hızında (551.7, 588.3 ve 620.1 m/s) gerçekleştirilen testlerde 551.7 ve 588.3 m/s hızda plakalarda kısmi penetrasyon oluşurken 620.1 m/s mermi hızında plakada perforasyon gerçekleşmiştir. İstatiksel çalışmalara dayalı olan, balistik limit hızı V₅₀ ile gösterilir ve bu hız merminin hedefe dik konumda çarpması sonucu hedefin % 50' sini delme kapasitesine sahip olduğu

hızıdır. Bu bilgiler ışığında ilgili malzeme kompozisyonu için malzeme kompozisyonu için balistik limit 588 m/s olarak belirlenmiştir.



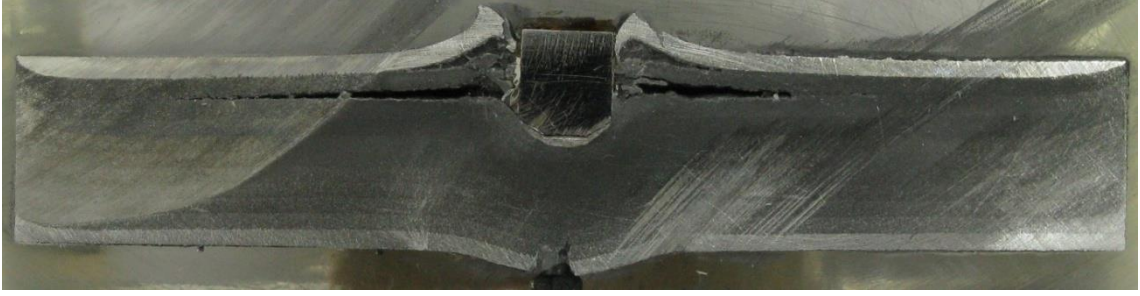
Şekil 39. %100 Al 6061 plakanın balistik test sonrası ön yüz, arka yüz ve kesit görüntüsü (v=512.3 m/s E=374.1 J)

	n=0.1 $v=521.1 \text{ m/s}$ ($E=387.1 \text{ J}$)	n=1.0 $v=513.2 \text{ m/s}$ ($E=375.4 \text{ J}$)	n=5.0 $v=517.5 \text{ m/s}$ ($E=381.7 \text{ J}$)	n=10.0 $v=518.8 \text{ m/s}$ ($E=383.7 \text{ J}$)
ÖN YÜZ	 SiC/0.1/70/50/C ID:13	 SiC/1.0/70/50/C ID:14	 SiC/5.0/70/50/C ID:15	 SiC/10.0/70/50/C ID:16
ARKA YÜZ				

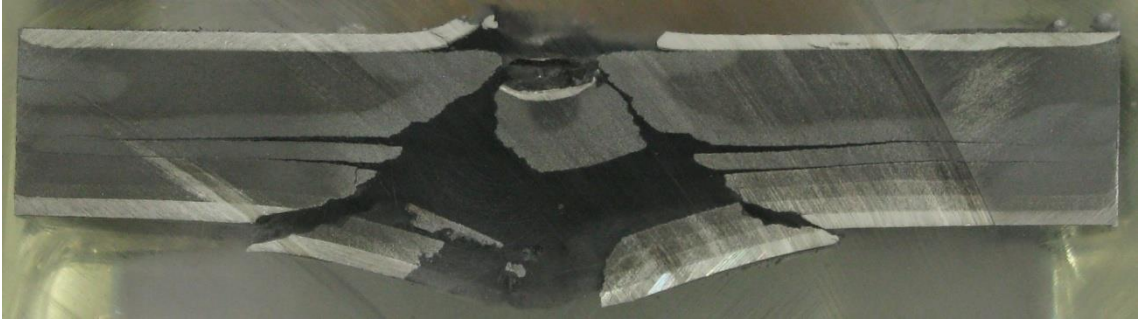
Şekil 40. Seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip FKS plakaların balistik test sonrası ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyon görüntüleri (*Ortalama hız 500 m/s*)



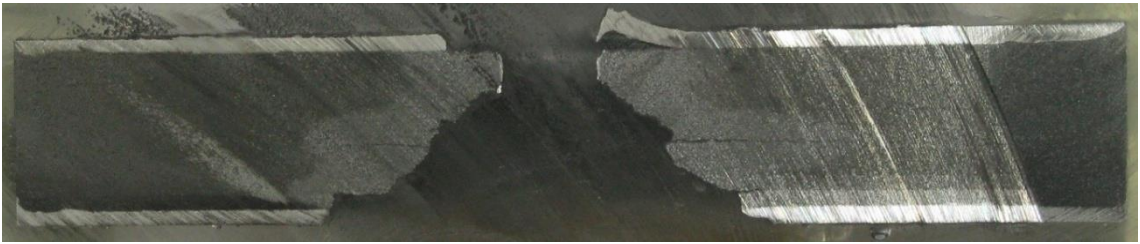
n=0.1 metal zengin FKS plaka ($v=521.1$ m/s)



n= 1.0 lineer karışım FKS plaka ($v=513.2$ m/s)



n= 5.0 ($v=517.5$ m/s)

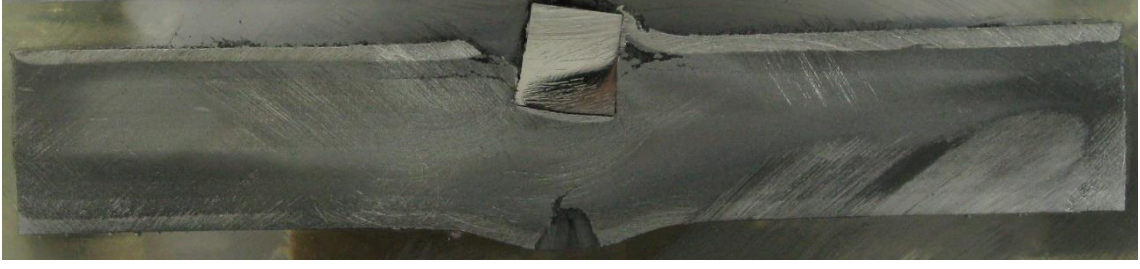


n= 10.0 Seramik zengin FKS plaka ($v=518.8$ m/s)

Şekil 41. Seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip FKS plakaların balistik test sonrası kesit görüntüsü (Ortalama hız 500 m/s)

	n=1.0 $v=516.4 \text{ m/s}$ ($E=380.1 \text{ J}$)	n=5.0 $v=509.6 \text{ m/s}$ ($E=370.2 \text{ J}$)	n=10.0 $v=518.8 \text{ m/s}$ ($E=383.7 \text{ J}$)
ÖN YÜZ			
ARKA YÜZ			

Şekil 42. Seramik zengin katmanı %60 SiC - %40 Al karışım oranına sahip FKS plakaların balistik test sonrası ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyon görüntüleri (*Ortalama hız 500 m/s*)



n= 1.0 lineer karışım FKS plaka ($v=516.4$ m/s)



n= 5.0 ($v=509.6$ m/s)



n= 10.0 Seramik zengin FKS plaka ($v=518.8$ m/s)

Şekil 43. Seramik zengin katmanı %60 SiC - %40 Al karışım oranına sahip FKS plakaların balistik test sonrası kesit görüntüsü (Ortalama hız 500 m/s)

	n=1.0 v=515.9 m/s (E=379.4 J)	n=5.0 v=504.3 m/s (E=362.5 J)	n=10.0 v=515.7 m/s (E=379.1 J)
ÖN YÜZ			
ARKA YÜZ			

Şekil 44. Seramik zengin katmanı %50 SiC - %50 Al karışım oranına sahip FKS plakaların balistik test sonrası ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyon görüntüleri (Ortalama hız 500 m/s)



n= 1.0 lineer karışım FKS plaka ($v=515.9$ m/s)

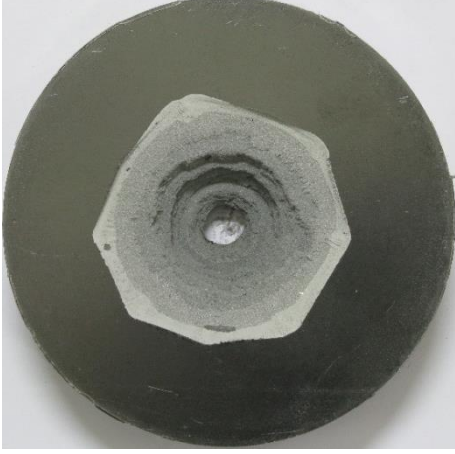


n= 5.0 ($v=504.3$ m/s)

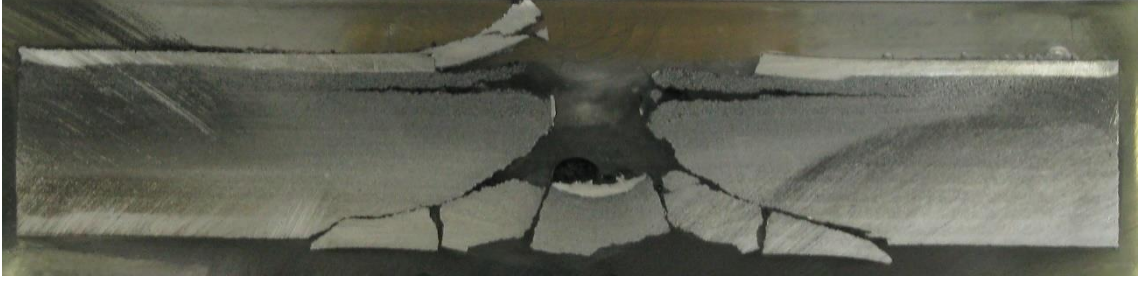


n= 10.0 Seramik zengin FKS plaka ($v=515.7$ m/s)

Şekil 45. Seramik zengin katmanı %50 SiC - %50 Al karışım oranına sahip FKS plakaların balistik test sonrası kesit görüntüsü (Ortalama hız 500 m/s)

	n=1.0 v=612.8 m/s (E=535.3 J)	n=5.0 v=611 m/s (E=532.2 J)	n=10.0 v=622.5 m/s (E=552.4 J)
ÖN YÜZ			
ARKA YÜZ			

Şekil 46. Seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip FKS plakaların balistik test sonrası ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyon görüntüleri (*Ortalama hız 600 m/s*)



n= 1.0 lineer karışım FKS plaka ($v=612.8$ m/s)



n= 5.0 ($v=611$ m/s)



n= 10.0 Seramik zengin FKS plaka ($v=622.5$ m/s)

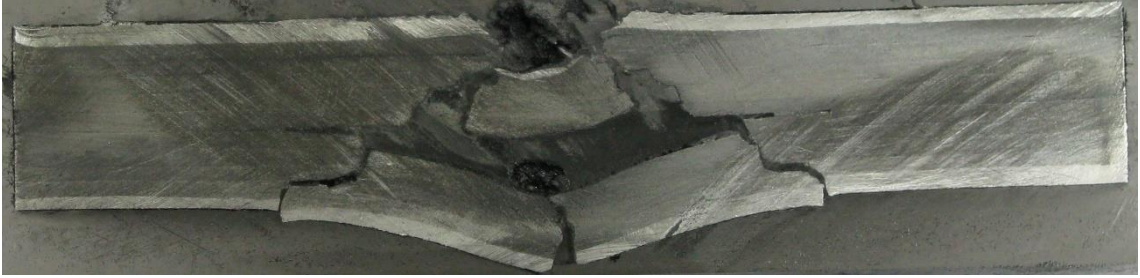
Şekil 47. Seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip FKS plakaların balistik test sonrası kesit görüntüsü (Ortalama hız 600 m/s)

	n=1.0 $v=617.2 \text{ m/s}$ ($E=543 \text{ J}$)	n=5.0 $v=613.7 \text{ m/s}$ ($E=536.9 \text{ J}$)	n=10.0 $v=613.3 \text{ m/s}$ ($E=536.2 \text{ J}$)
ÖN YÜZ			
ARKA YÜZ			

Şekil 48. Seramik zengin katmanı %60 SiC - %40 Al karışım oranına sahip FKS plakaların balistik test sonrası ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyon görüntüleri (*Ortalama hız 600 m/s*)



n= 1.0 lineer karışım FKS plaka (v=617.2 m/s)



n= 5.0 (v=613.7 m/s)



n= 10.0 Seramik zengin FKS plaka (v=613.3 m/s)

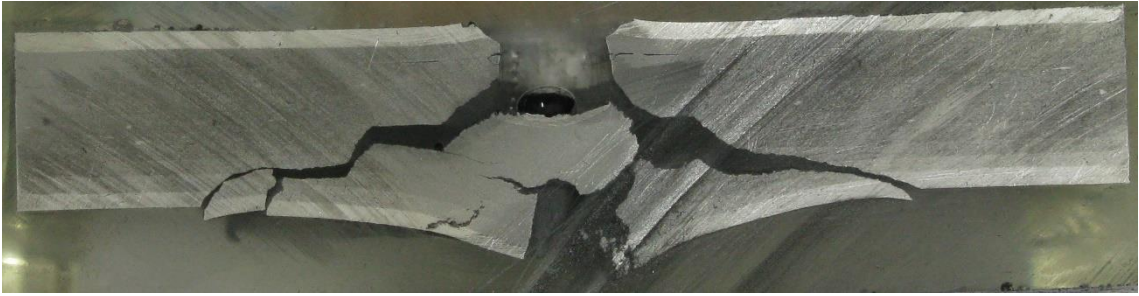
Şekil 49. Seramik zengin katmanı %60 SiC - %40 Al karışım oranına sahip FKS plakaların balistik test sonrası kesit görüntüsü (Ortalama hız 600 m/s)

	n=1.0 v=624.7 m/s (E=556.3 J)	n=5.0 v=612.1 m/s (E=534.1 J)	n=10.0 v=619.1 m/s (E=546.4 J)
ÖN YÜZ			
ARKA YÜZ			

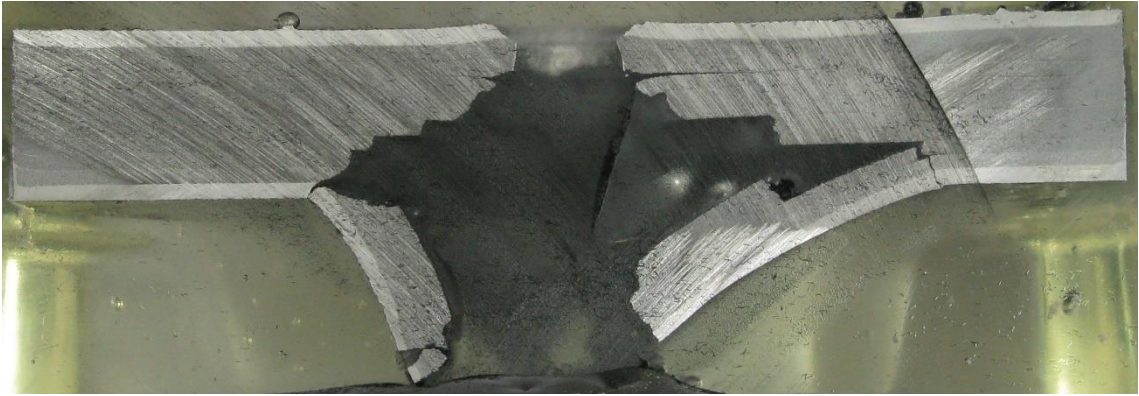
Şekil 50. Seramik zengin katmanı %50 SiC - %50 Al karışım oranına sahip FKS plakaların balistik test sonrası ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyon görüntüleri (Ortalama hız 600 m/s)



n= 1.0 lineer karışım FKS plaka (v=624.7 m/s)



n= 5.0 (v=612.1 m/s)

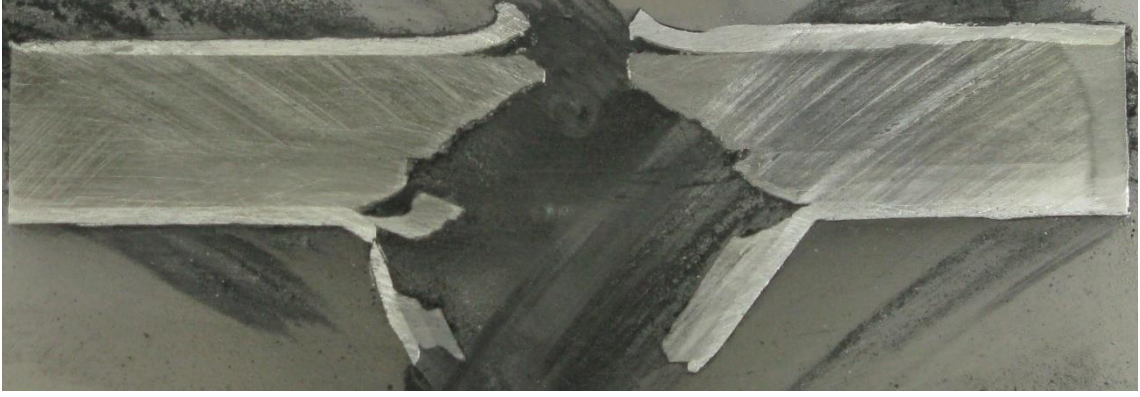


n= 10.0 Seramik zengin FKS plaka (v=619.1 m/s)

Şekil 51. Seramik zengin katmanı %50 SiC - %50 Al karışım oranına sahip FKS plakaların balistik test sonrası kesit görüntüsü (Ortalama hız 600 m/s)

	3 μ m $v=595.4$ m/s ($E=505.3$ J)	9 μ m $v=588.3$ m/s ($E=493.4$ J)	44 μ m $v=613.7$ m/s ($E=536.9$ J)	125 μ m $v=604.6$ m/s ($E=521.1$ J)
ÖN YÜZ	 B ₄ C/5.0/50/3/C ID:50	 B ₄ C/5.0/50/9/C ID:51	 B ₄ C/5.0/50/44/C ID:52	 B ₄ C/5.0/50/125/C ID:53
ARKA YÜZ				

Şekil 52. Farklı boyutlarda seramik toz kullanılarak üretilen ve seramik zengin katmanı %50 B₄C - %50 Al karışım oranına sahip FKS plakaların balistik test sonrası ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyon görüntüleri ($n=5.0$, Ortalama hız 600 m/s)



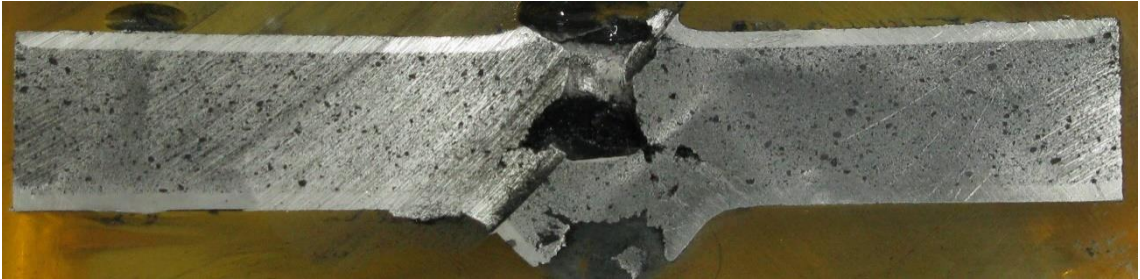
%50 B₄C(3μm) - %50 Al karışım oranına sahip FKS plaka (v=595.4 m/s)



%50 B₄C(9μm) - %50 Al karışım oranına sahip FKS plaka (v=588.3 m/s)



%50 B₄C(44μm) - %50 Al karışım oranına sahip FKS plaka (v=613.7 m/s)



%50 B₄C(125μm) - %50 Al karışım oranına sahip FKS plaka (v=604.6 m/s)

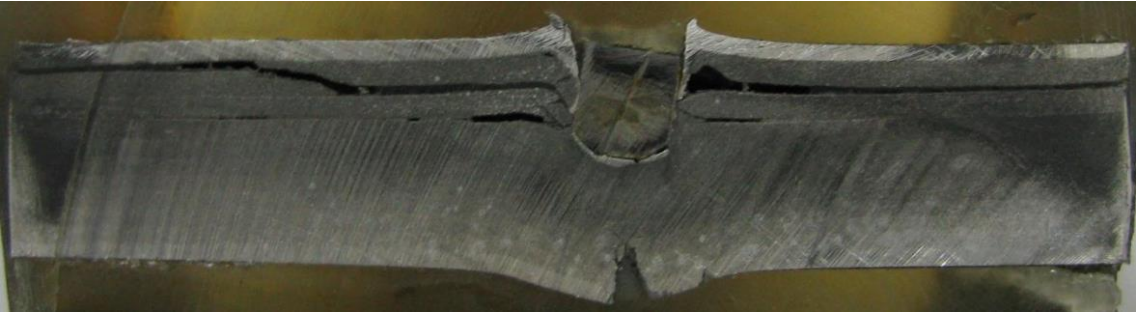
Şekil 53. n= 5.0 kompozisyonel gradyanta ve farklı toz boyutuna sahip FKS plakaların balistik test sonrası kesit görüntüsü (Ortalama hız 600 m/s)



Seramik zengin katmanı %70 Al_2O_3 (20-50 μm) - %30 Al karışım oranına sahip FKS plaka



Seramik zengin katmanı %70 SiC(50 μm) - %30 Al karışım oranına sahip FKS plaka



Seramik zengin katmanı %70 B_4C (44 μm) - %30 Al karışım oranına sahip FKS plaka

Şekil 54. Farklı seramik toz bileşenlerine sahip lineer kompozisyondaki FKS plakaların balistik test sonrası kesit görüntüleri

	$v=551.7 \text{ m/s}$ ($E=433.9 \text{ J}$)	$v=588.3 \text{ m/s}$ ($E=493.4 \text{ J}$)	$v=620.1 \text{ m/s}$ ($E=548.1 \text{ J}$)
ÖN YÜZ			
ARKA YÜZ			

Şekil 55. Seramik zengin katmanı %50 B₄C - %50 Al karışım oranına sahip FKS plakaların, farklı hızda mermi isabeti sonrası ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyon görüntüleri ($n=5.0$, ortalama hız 600 m/s, ortalama toz boyutu 9 μ m)



%50 B₄C - %50 Al karışım oranına sahip FKS plaka (v=551.7 m/s)



%50 B₄C - %50 Al karışım oranına sahip FKS plaka (v=588.3 m/s)



%50 B₄C - %50 Al karışım oranına sahip FKS plaka (v=620.1 m/s)

Şekil 56. n= 5.0 kompozisyonel gradyanta ve (9µm) toz boyutuna sahip FKS plakaların 3 farklı hızdaki balistik test sonrası kesit görüntüsü

4.3 Sayısal ve Deneysel Sonuçların Mukayesesi

Bu bölümde, fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların balistik yükleme atlındaki darbe davranışlarının deneysel ve sayısal mukayesesi yapılmıştır. Sahip olunan gaz silah sisteminde hesaplanan mermi hızı, merminin plakaya çarpmadan hemen önceki hızı olup, terminal balistik açısından kritik öneme sahip olan, merminin plakadan çıkış hızının ölçülememesi sebebiyle, merminin enerjisinin plaka deformasyonunda harcanan kısmının hesaplanması mümkün olmamıştır. Bu nedenle söz konusu mukayese ancak hasar yüzeyleri ve kesitleri değerlendirilerek yapılabilir.

Şekil 57’ de yaklaşık olarak 500 m/s test hızı için %100 Al 6061 ve seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip FKS plakaların deneysel ve sayısal kesit görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde sayısal analiz sonuçları, alüminyum, metal yoğun ($n=0.1$) ve lineer karışım ($n=1$) oranına sahip plakalar için deneysel sonuçlar ile oldukça uyumlu iken seramik oranının arttığı $n=5$ ve seramik zengin ($n=10$) kompozisyonlarındaki plakalar için uyumlu olmadığı görülmektedir. Bu uyumsuzluğun sebebi, artan seramik oranı ile FKS plakalarda metal seramik bağ kuvvetleri zayıflamış ve bu nedenle kırılğan davranış sergileyerek balistik darbe sonrası parçalanmıştır Buna karşın sayısal modelde mükemmel bir bağ kuvvetinin kabulü yapılmış olması sebebiyle plaka daha yüksek dayanım göstermiştir.

Şekil 57’ de balistik limit testleri yapılan seramik zengin katmanı %50 B₄C - %50 Al karışım oranına sahip FKS plakaların, üç farklı mermi hızı altında deneysel ve sayısal kesit görüntüleri verilmiştir. Sayısal model için gerekli olan kademelendirilmiş bölgenin malzeme özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan TTO model, B₄C bileşeni için yapıyı daha rijit olarak modellemiş ve bu sebeple sayısal sonuçlar deneysel sonuçlardan, silisyum karbür bileşenine kıyasla uzaklaşmıştır. Buradan hareketle fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin sayısal olarak modellenmesinde kullanılan TTO modelin $n=1$ ve daha alt kompozisyonlar için başarılı bir model olduğu fakat plaka içerisindeki seramik oranının artmasıyla modelin deneysel sonuçlardan uzaklaştığı söylenebilir.

4.4 Sonuçlar ve Değerlendirme

"Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Balistik Darbe Etkisi Altında Lineer Olmayan Mekanik Analizleri" isimli bu çalışmada, 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 STANAG-2920 ve MIL-DTL-46593B (MR) standartlarına göre üretilmiş 0.30 kalibre parçacık benzetimli mermi (FSP) mermi modellenerek gerçekleştirilmiştir. Gerek sayısal gerekse deneysel analizler beş farklı malzeme kompozisyonu için (% 100 Alüminyum, metal yoğun ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$), $n=5.0$ ve seramik zengin ($n = 10$)) tekrarlanmıştır. Sayısal analizler için bir sonlu elemanlar paket programı olan LS-DYNA kullanılmıştır. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar seramik zengin yüzey, çarpma yüzeyine yakın olacak şekilde konumlandırılarak merkezi çarpma yüküne maruz bırakılmıştır.

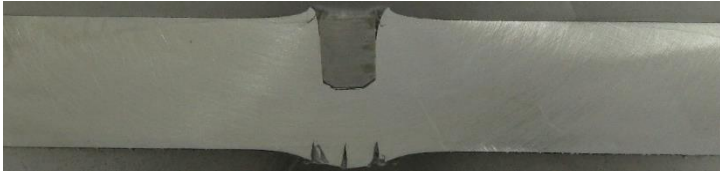
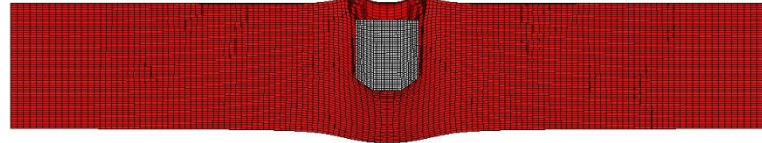
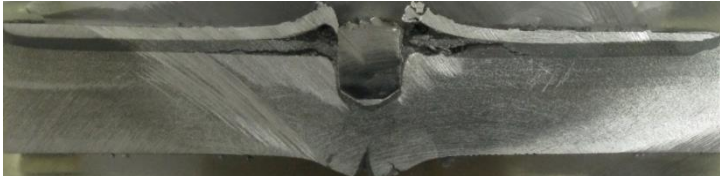
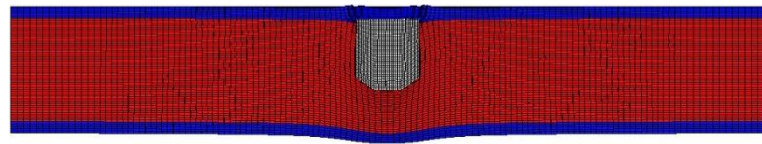
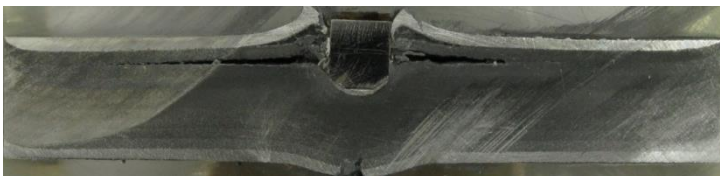
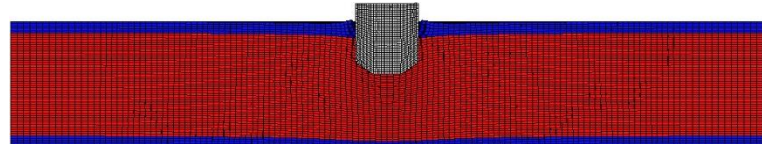
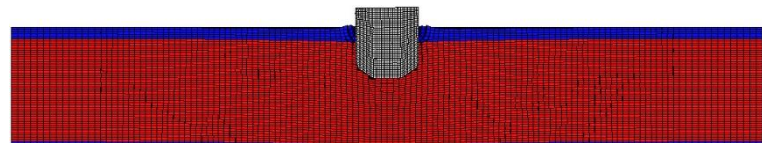
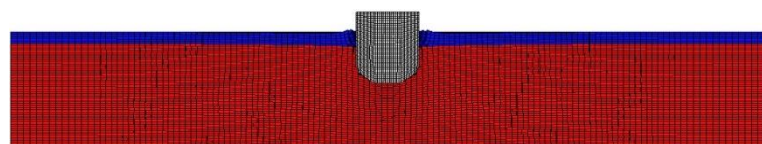
Seramik (Al_2O_3 , SiC ve B_4C) ve metal (Al) bileşenlerden oluşan sandviç plakaların kompozisyonu kalınlık boyunca değişmektedir. Seramik ve metal katmanlar arasında kalan, fonksiyonel kademelendirilmiş bölgenin mekanik özelliklerinin, plaka kalınlığı boyunca sürekli olarak bileşenlerin hacimsel oranlarındaki 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 MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY malzeme modeli kullanılmış ve geliştirilen sayısal analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla doğrulanması neticesinde sayısal modelin geçerliliği doğrulanmıştır.

Farklı seramik bileşen ve toz boyutu ve malzeme kompozisyonlarındaki FKS plakalar için yapılan balistik testler, TÜBİTAK desteği ile alınan gaz silah sistemi ile gerçekleştirilmiş olup, 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 engellemiş, seramik zengin katman merminin kinetik enerjisini azaltmış ve arka yüzeydeki metal ise kalan enerjiyi sönmülemiştir.

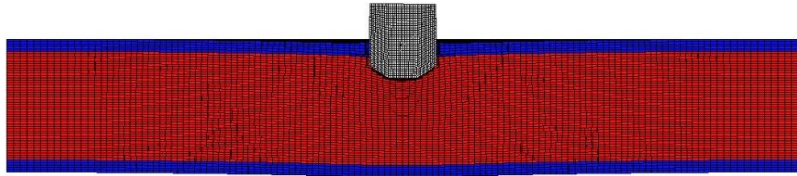
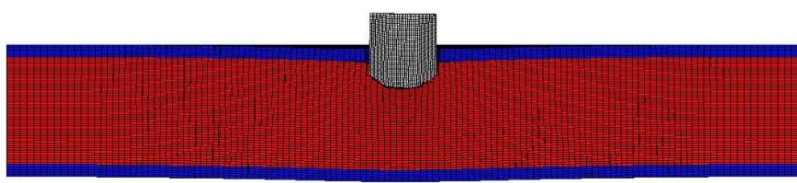
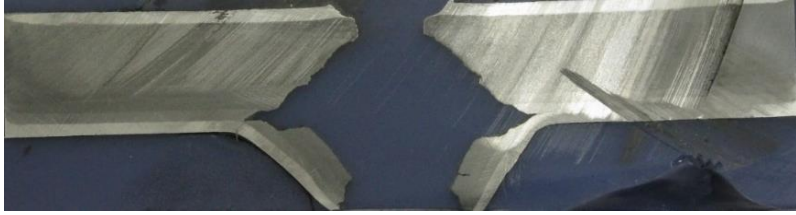
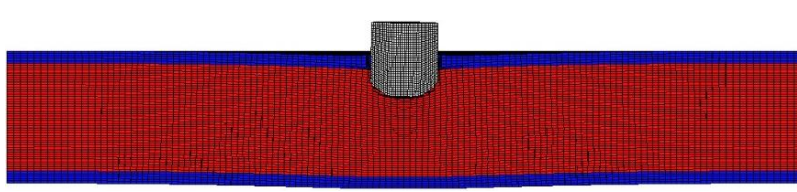
Çalışmada, seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışıma sahip plakalarda, kompozisyonel gradyanın artmasıyla balistik performans azalmış ve balistik testler sonrası plakalar bütünlüğünü koruyamamıştır. Kademelendirilmiş yapı içerisinde malzeme özelliklerindeki değişimin yumuşak bir geçişe sahip olması 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 3), katmanlar arası mekanik özelliklerin değişimi ani olmaktadır. Bu çalışma kapsamında 11 katman olarak üretilen plakaların ortalama katman kalınlıkları 1.4 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 olmayacaktır.

Sonuç olarak bu çalışma ile değişen malzeme kompozisyonunun balistik performans üzerinde doğrudan etkili olduğu ve artan kompozisyonel gradyant ile plakaların balistik dayanımının, seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışıma sahip plakalarda lineer kompozisyona kadar arttığı daha sonrasında plakaların kırılma davranış sergilemesi sebebiyle düştüğü görülmüştür. Seramik zengin katmanın ihtiva ettiği seramik oranının azaltılması ile birden daha büyük kompozisyonel gradyantlar için de performans artışının devam ettiği, seramik zengin katmanı %60 SiC - %40 Al ve %50 SiC - %50 Al karışım oranlarına sahip plakalar için incelenmiştir. Farklı seramik bileşenler kullanılarak yapılan testlerde B_4C bileşenin Al_2O_3 ve SiC bileşenlere kıyasla daha yüksek performans gösterdiği ve artan seramik toz boyutunun da mermi penetrasyon derinliği direkt olarak etkilediği sonucuna varılmıştır. Balistik limit çalışmaları kapsamında yapılan testlerde, seramik zengin katmanı %50 SiC - %50 Al karışım oranlarına sahip 16 mm kalınlığında FKS plakanın, 588 m/s'lik bir balistik limite sahip olduğu hesaplanmış olup bu hız değeri STANAG standartlarında 2. Seviye balistik koruyuculara tekabül etmektedir.

	DENEYSEL	SAYISAL
Al 6061		
n=0.1 (metal zengin karışım)		
n=1.0 (lineer karışım)		
n=5.0		
n=10.0 (seramik zengin karışım)		

Şekil 57. %100 Al 6061 ve seramik zengin katmanı %70 SiC - %30 Al karışım oranına sahip FKS plakaların deneysel ve sayısal kesit görüntülerinin mukayesesi (ortalama hız 500 m/s)

DENEYSEL	SAYISAL
	
$v=551.7 \text{ m/s } (E=433.9 \text{ J})$	
	
$v=588.3 \text{ m/s } (E=493.4 \text{ J})$	
	
$v=620.1 \text{ m/s } (E=548.1 \text{ J})$	

Şekil 58. Seramik zengin katmanı %50 B₄C - %50 Al karışım oranına sahip FKS plakaların deneysel ve sayısal kesit görüntülerinin mukayesesi (n=5.0)

KAYNAKLAR

- Adams, M.A. 2001. “Theory and experimental test methods for evaluating ceramic armor components”, *Ceramic Transactions*, 134,139–151.
- Alper, İ., Çoruhlu, A. 2006. *Silah Sistemleri ve Balistik Ders Kitabı*. Kara Kuvvetleri Komutanlığı Kara Harp Okulu Komutanlığı.
- Babaei, B., Shokrieh, M.M., Daneshjou, K. 2011. “The ballistic resistance of multi-layered targets impacted by rigid projectiles”, *Materials Science and Engineering: A*, 530,208 – 217.
- Backman, M.E., Goldsmith, W. 1978. “The mechanics of penetration of projectiles into targets”, *International Journal of Engineering Science*, 16,1 – 99.
- Belytschko, T., Flanagan, D., Kennedy, J. 1982. “Finite element methods with user-controlled meshes for fluid-structure interaction”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 33,669 – 688.
- Ben-Dor, G., Dubinsky, A., Elperin, T. 2002. “On the Lambert-Jonas approximation for ballistic impact”, *Mechanics Research Communications*, 29, 137-139.
- Bruck, H.A. 2000. “A one-dimensional model for designing functionally graded materials to manage stress waves”, *International Journal of Solids and Structures*, 37,6383 – 6395.
- Campbell, J. 1953. “An investigation of the plastic behaviour of metal rods subjected to longitudinal impact”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1,113 – 123.
- Ceyhun, V.,Turan, M. 2003. “Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı”, *Mühendis ve Makina*, 516,1–11.
- Charles, A. 2001. “Developing an ultra-lightweight armor concept”, IV. International Conference on Advanced Ceramics and Glass, 485–498.
- Cheeseman, Jensen, B.A., Hoppel, R., Christopher. 2004. “Protecting the future force: advanced materials and analysis enable robust composite armor”, *AMPTIAC Quarterly*, 8,37–46.
- Chin, E.S. 1999. “Army focused research team on functionally graded armor composites, *Materials Science and Engineering: A*”, 259,155 – 161.
- Cihangiroğlu, B. 2011. *Adli Bilimler I. Jandarma Kriminal Daire Başkanlığı Yayınları*.

- El-Desouky, A., Kassegne, S.K., Moon, K.S., McKittrick, J., Morsi, K. 2013. "Rapid processing; characterization of micro-scale functionally graded porous materials", *Journal of Materials Processing Technology*, 213,1251 – 1257.
- Feli, S., Asgari, M. 2011. "Finite element simulation of ceramic/composite armor under ballistic impact", *Composites Part B: Engineering*, 42,771 – 780.
- Gonçalves, D., de Melo, F., Klein, A., Al-Qureshi, H. 2004. "Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44,307 – 316.
- Gooch, W.A. 2002. *An Overview Of Ceramic Armor Applications*. The American Ceramic Society.
- 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*.
- Gunes, R., Aydin, M., Apalak, M. K., Reddy J. N. 2011. "The elasto-plastic impact analysis of functionally graded circular plates under low-velocities", *Composite Structures*, 93, 860-869.
- Hallquist, J.O. 2006. *California: LS-DYNA Theory Manual*.
- Han, X., Xu, D., Liu, G.R. 2002. "Transient responses in a functionally graded cylindrical shell to a point load", *Journal of Sound and Vibration*, 251,783–805.
- Jr., L.L.M. 2006. "Functionally gradient metal matrix composites: Numerical analysis of the microstructure–strength relationships", *Composites Science and Technology*, 66,1873 – 1887.
- Karamis, M., Nair, F., Tasdemirci, A. 2004. "Analyses of metallurgical behavior of Al–SiCp composites after ballistic impacts", *Composite Structures*, 64,219 – 226.
- Kieback, B., Neubrand, A., Riedel, H. 2003. "Processing techniques for functionally graded materials", *Materials Science and Engineering: A*, 362,81 – 106.
- Kleponis, D.S., Mihalcin, A.L., Filbey, G.L. 2000. "Material design paradigms for optimal functional gradient armors", in *14th Engineering Mechanics Conference*, University of Texas at Austin, Austin, TX.
- 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, 583 – 593.

- Laible, R. 2012. Ballistic Materials and Penetration Mechanics. The Netherlands: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Lam, K., Sathiyamoorthy, T. 1999. "Response of composite beam under low-velocity impact of multiple masses", *Composite Structures*, 44,205 – 220.
- Liu, D., Raju, B.B., Dang, X. 2000. "Impact perforation resistance of laminated and assembled composite plates", *International Journal of Impact Engineering*, 24,733 – 746.
- Matsunaga, H. 2009. "Stress analysis of functionally graded plates subjected to thermal and mechanical loadings", *Composite Structures*, 87,344 – 357.
- McCauley, W., J., D'Andrea, G., Cho, K., Burkins, M.S., Dowding, R.J., Gooch, J., 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.
- MIL-DTL-46593B (MR) w/AMENDMENT 1. 2008. Detail Specification, Projectile Calibers 0.22, 0.30, 0.50 and 20 mm Fragment-Simulating.
- Muller, P., Mognol, P., 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*, 213,685 – 692.
- NATO STANAG 2920. 2003. Ballistic Test Method for Personal Armour Materials and Combat Clothing.
- NATO STANAG 4569. 2004. Protection levels for occupants of logistic and light armoured vehicles.
- NIJ Standard 0101.03. 1987. Ballistic Resistance of Personal Body Armor.
- Orlovskaya, N. 2003. "Design and manufacturing B₄C-SiC layered ceramics for armor applications", in 105th Annual Meeting of The American Ceramic Society, 59–70.
- Özkeş İ. 2013. Çekirdeği fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların düşük hızlı çarpma yükleri altında mekanik davranışlarının incelenmesi. Kayseri: Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi.
- Özşahin, E. 2008. Alüminyum Levhaların Yüksek Hızlı Çarpma Yükleri Altındaki Davranışları. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

- Ravid, M., Bodner, S.R., and Chocron, S. 2003. "Penetration analysis of ceramic armor backed by composite materials", *Ceramic Transactions*, 151, 145–153.
- Shockey, D.A., Marchand, A.H. 2001. "Failure phenomenology of confined ceramic targets and impact rods", *Ceramic Transactions*, 134, 385–402.
- Tamura, I., Tomota, Y., Ozawa, H. 1973. "Strength and ductility of Fe-Ni-C alloys composed of austenite and martensite with various strength", *Proceedings of the Third Conference on Strength of Metals and Alloys*, 1, 611-615.
- Tan, V. B. C., Khoo, K. J. L. 2005. "Perforation of flexible laminates by projectiles of different geometry", *International Journal of Impact Engineering*, 31, 793-810.
- Tasdemirci, A., Tunusoglu, G., 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*, 44,1 – 9.
- 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*,.
- Tiberkak, R., Bachene, M., Rechak, S., Necib, B. 2008. "Damage prediction in composite plates subjected to low velocity impact", *Composite Structures*, 83,73 – 82.
- Übeyli, M., Balci, E., Sarikan, B., Öztaş, M.K., Camuşcu, N., Yildirim, R.O., Keleş, Ö. 2014. "The ballistic performance of SiC-AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy", *Materials & Design*, 56, 31–36.
- Üner, B. ve İsmail Çakır. 2007. *Adli Balistik*. Arıkan Basım Yayın Dağıtım.
- Wang, B., Chou, S. 1997. "The behaviour of laminated composite plates as Armour", *Journal of Materials Processing Technology*, 68,279 – 287.
- Wetzel, J. J. 2009. *The Impulse Response of Extruded Corrugated Core Aluminum Sandwich Structures*. ABD: University of Virginia, School of Engineering and Applied Science, M.Sc. Thesis.
- Wu, A., Cao, W., Ge, C., Li, J., Kawasaki, A. 2005. "Fabrication and characteristics of plasma facing SiC/C functionally graded composite material", *Materials Chemistry and Physics*, 91,545 – 550.
- Yang, Y. 2000. "Time-dependent stress analysis in functionally graded materials", *International Journal of Solids and Structures*, 37,7593 – 7608.

Zhou, M., Xi, J., Yan, J. 2004. “Modeling and processing of functionally graded materials for rapid prototyping”, *Journal of Materials Processing Technology*, 146,396 – 402.

Zukas, J. A. 1990. *High Velocity Impact Dynamics*. USA: John Wiley & Sons Inc.

YAYINLAR

Aydin M., Apalak M.K., Güneş R., Reddy J.N., "An Experimental Study On Ballistics Performance: Functionally Graded Sandwich Plate Impacted By A 9 Mm Parabellum Projectile", 13th International Symposium on Multiscale, Multifunctional and Functionally Graded Materials, Brezilya, ABD, 19-22 Ekim 2014, pp.21-24

Güneş R., Arslan K., Apalak M.K., Reddy J.N., "Numerical Investigations On The Ballistic Performance Of Honeycomb Sandwich Structures Reinforced By Functionally Graded Plates", 13th International Symposium on Multiscale, Multifunctional and Functionally Graded Materials, SAO PAULO, BREZILYA, 19-22 Ekim 2014, pp.16-20

Aydin M., Apalak M.K., Güneş R., Reddy J.N., "Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Balistik Darbe Yüğü Altındaki Davranışı Üzerinde Farklı Seramik Bileşenlerinin Etkisinin İncelenmesi", 19. Ulusal Mekanik Kongresi, TRABZON, TÜRKİYE, 24-28 Ağustos 2015

Arslan K., Güneş R., Apalak M.K., Reddy J.N., "Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakalar ile Desteklenmiş Bal Peteği Sandviç Yapıların Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının İncelenmesi", XIX. Ulusal Mekanik Kongresi, TRABZON, TÜRKİYE, 24-28 Ağustos 2015