

Numerical Study on Free Particle Reinforced Fiber-Metal Composite Sandwiches Under Ballistic Loads

Umut Çalışkan^{a,1}, Nisanur Duman^b, Arslan Talha Terme^c, Mustafa Çayır^d, Mürüvvet Bozkurt^e

^a Erciyes University, Department of Mechanical Engineering, Melikgazi/Kayseri, 38039, Turkey
ORCID ID: 0000-0002-8043-2799

^b Erciyes University, Department of Mechanical Engineering, Melikgazi/Kayseri, 38039, Turkey
ORCID ID: 0000-0001-9722-7938

^c Erciyes University, Department of Mechanical Engineering, Melikgazi/Kayseri, 38039, Turkey
ORCID ID: 0000-0001-6461-4835

^d Erciyes University, Department of Mechanical Engineering, Melikgazi/Kayseri, 38039, Turkey
ORCID ID: 0000-0002-2645-8197

^e Erciyes University, Department of Mechanical Engineering, Melikgazi/Kayseri, 38039, Turkey
ORCID ID: 0000-0002-5413-0412

Abstract

In this study, the ballistic performances of the fiber-metal composite plate with foam core sandwich embedded free particles were numerically investigated. Structures that can change the direction of incoming ammunition in armor designs have always been interesting. Ballistic analyzes of the structures designed with this motivation were carried out with fragment simulated projectile (FSP) under 3 different velocities. The 3D finite element and damage models of the materials were modeled separately, and the analyzes were completed by overcoming the problems encountered in the analysis of the complex structure. The material models of armor system were explained in detail as carbon fiber/epoxy composite plate, aluminum metal plate, PVC foam core material, steel spherical particle and steel fragment simulated projectile. The ballistic behaviors of 2 different types of structures formed according to particle diameter were investigated numerically and the full perforation behavior of the structure formed with small diameter particles was better.

Keywords: “Ballistic behavior, fiber-metal plate, spherical particle, sandwich structure design.”

1. Giriş

Havacılık yapısı uygulamalarında minimum ağırlık ve maksimum sertlik elde etmek için sandviç yapı onlarca yıldır kullanılmaktadır. Ne yazık ki bu yapıların birçoğu dayanıklılık ve hasar toleransı ile ilgili büyük sorunlar yaşamıştır. Ancak sandviç yapının başarılı uygulamaları göz ardı edilmemelidir. F-16 programı, inşa edilen her uçakta bir çok düzeneğe çekirdek yapı uygulamıştır. Bazı imalat sorunları yaşanmış ve yatay kuyruk hücum kenarları gibi bazı tertibatlar uçağın çok hasara açık bir bölgesinde olsa da, bu uygulamalarda sorunlar yaşanmamıştır. Bu alandaki potansiyel araştırma, neden belirli sandviç yapı uygulamalarının başarılı olduğu ve diğerlerinin başarısız olduğunu ve belirli sorunlu yapıları belirlemek için düzeltmeler önermektedir. Günümüzde hemen hemen her sektörde yerini alan kompozitler, havacılık, uzay ve otomotiv sektöründe de önemli bir yere sahiptir. Kompozit malzemeler iki veya daha fazla parçadan oluşan bir malzemenin üretilmesi olarak tanımlanırken, bu malzemeler birbirinden farklı fiziksel veya kimyasal özellikte olabilir. Kompozit malzemelerin kullanılmasındaki genel amaç malzemelerin güçlendirilmesi ve kullanılacak alana göre üstün özellikte malzeme üretimi olarak da tanımlanabilir. Son yıllarda, farklı fonksiyonel malzemelerden oluşan çok katmanlı kompozit zırhlar, insan vücudunun ve askeri teçhizatın balistik darbelere karşı korunması için artan bir ilgi görmüştür. Geleneksel koruyucu yapıya kıyasla çok katmanlı kompozit zırhlar, hafif ve yüksek sertlik gibi avantajlara sahiptir. Aramid, elyaf takviyeli kompozitler gibi sentetik kumaşlar, düşük yoğunlukları ve yüksek mukavemetleri nedeniyle hafif zırh sistemlerinin tasarımında giderek daha fazla kullanılmaktadır [1,2]. Fiber kumaşlarla (karbon, cam, kevlar vb.) güçlendirilmiş metaller (alüminyum alaşımları vb.) fiber metal tabakalı kompozitler olarak adlandırılır. Lamine kompozit malzeme, çok katmanlı bir yapı oluşturmak için birbirine yapıştırılan, aynı elyaf takviyeli katların birkaç laminatından veya en az iki farklı malzeme ile hibrit laminattan oluşan kompozit malzemelerden biridir. Hibrit lamine yapı, düşük öz ağırlık ile mukavemeti, yorulma ömrünü, korozyon direncini, sertliği, termal ve akustik yalıtımı önemli ölçüde iyileştirmek için

¹ Corresponding Author
E-mail Address: ucaliskan@erciyes.edu.tr

kullanılabilir [3]. Yaygın laminatlardan farklı olarak, etkili bir balistik kompozit laminat, balistik darbeye direnmek için genellikle iki ana katmandan yapılır, biri nispeten sert bir kaplama plakası ve diğeri nispeten sert bir arka plakadır [4,5].

Zırh sistemi yapılarının tarihsel gelişimine baktığımızda, geleneksel monolitik metalik zırh malzemelerinin sınırlı mühendislik özellikleri nedeniyle seramik ve seramik yüzü kompozitler, güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş polimer kompozitler ve katmanlı ve lamine fonksiyonel zırh yapıları gibi yeni malzemelere yer bıraktığı gözlemlenmektedir [6]. Ayrıca kullanım kolaylığı için malzeme ağırlığı da önemlidir. Malzemenin ağırlığını azaltmak için güç ve özelliklerinden ödün vermeden malzemeler de geliştirilmektedir, bu nedenle kullanıcının hareketi çok fazla etkilenmemelidir. Polimer matris esaslı kompozit malzemeler, hafifliği ve iyi balistik özellikleri nedeniyle metal ve alaşımlı ve seramik malzemelere göre avantajlara sahiptir [7,8]. Balistik özellikler, kinetik enerjinin kişiye zarar vermeden sönmünebilirliğinin ortalaması olarak değerlendirilir. Gelişmiş zırh yapıları, mermiyi aşındırmak ve deforme etmek, sonraki katmanlardaki şok dalgası etkisini azaltmak ve darbe enerjisinin bir kısmını sönmülemek için genellikle yüksek empedanslı ön plakaya sahip çok katmanlı kompozitler olarak tasarlanır. Zırh sistemlerinin balistik performansı, mermiden zırha aktarılan enerjiye bağlı olarak ölçülür. Bu enerji kullanılan malzemeler, katman kalınlığı, malzemelerin sıralanışı ve yönlerinden etkilenir. Bir mermi zırha ne kadar direnebilirse ve enerjisini olabildiğince küçük bir alanda saklayabilirse merminin zırhı delme ihtimali yükselir. Bu sebeple yapılan zırh çalışmalarındaki amaç merminin enerjisini geniş alanlara dağıtabileceği bir tasarım yapmaktır.

Sandviç yapılar, heyecan verici özellikleri (düşük ağırlık, yüksek enerji emme kapasitesi, yüksek sertlik ve mukavemet / ağırlık oranları, mükemmel ısı yalıtımı, akustik sönmüleme, yangın geciktirme, üretim ve onarım kolaylığı) nedeniyle ileri mühendislik uygulamaları için büyük potansiyel sunmaktadır. Sandviç yapının kompozit bir bileşeni, nispeten ince, yüksek mukavemetli iki yüzey tabakası veya kaplama arasına yerleştirilmiş hafif bir çekirdekte oluşur. Yüz levhaları bükülme yüklerine dayanacak şekilde tasarlanmıştır ve genellikle alüminyum veya elyaf takviyeli polimerlerden yapılır [9-11]. Sandviç yapıların bir diğeri önemli özelliği, büyük enerji sönmüleme kapasitesi ve yüksek hasar toleransıdır. Yüzey levhaları, çekirdek ve her iki bileşenin sayısız kombinasyonu için çeşitli malzeme türleri vardır [12]. Sandviç yapının kompozit bir bileşeni, nispeten ince, yüksek mukavemetli iki yüz levhası veya kaplaması arasına yerleştirilmiş hafif bir çekirdekte oluşur. Fiber metal tabakalı serbest parçacık köpük çekirdekli sandviç yapı malzemeler yüksek enerjili mermilere karşı balistik performans açısından oldukça etkilidir. Literatürde sandviç yapıların kullanıldığı çalışmalar incelenecek olursa bazı araştırmacılar, kompozit plakaların, üç boyutlu katı sonlu elemanlar kullanılarak darbe yüklemesine tepkisini ve sandviç yapıların bu noktada etkisini araştırmışlardır [13,14]. Caliskan ve Apalak [13] yapmış olduğu karbon fiber takviyeli PVC köpük çekirdekli kompozit sandviç kirişlerin eğilme darbesi araştırılması çalışmalarında, eğilme yönüne dik yöndeki fiber açısının daha sert ve mukavemetli olduğu bilinmekle birlikte, diğeri fiber açılarına sahip kirişlerin bükülme darbe yükleri altında hasar toleransları belirlenmiştir. Ayrıca, katman sayısı arttıkça, kompozit yüzey levhalarının hasar mekanizması ve yük taşıma kapasitesi tamamen değişerek eğilme dayanımını arttırdığı görülmüştür. Bu araştırma, yüzey tabakasının fiber açısı ve kalınlığı değiştikçe hasar mekanizmalarının değişimi ve farklı hasar kriterleri kullanılarak sonlu elemanlar yardımıyla yorumlanması açısından temel bilgiler sunmaktadır. Chengjun ve diğlerinin [14] yapmış oldukları "Alüminyum levhalar ve düz dokuma E cam elyaf kompozit katlardan oluşan alüminyum (AL) köpük çekirdekli ve metal elyaf laminat (FML) kaplamalı yeni tasarlanmış sandviç panellerin yüksek hızlı darbe tepkileri" isimli çalışmada sandviç panellerin düşük hızda darbe altında tepkilerinin analiz etmedeki etkinliğini ve doğruluğunu kanıtlamak için deneylere karşı bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiş ve doğrulanmıştır.

Yaghoubi ve Liaw [15] çeşitli kalınlıklardaki Glare 5 fiber-metal lamine (FML) kirişlerin balistik darbe davranışları üzerine deneysel ve sayısal araştırmalar yapmışlardır. Darbe ve kalan/geri tepme hızlarını ölçmek ve ayrıca FML'lerdeki hasar gelişimini değerlendirmek için yüksek hızlı bir kamera kullanmışlardır. Kalan hızı karşı gelen mermi çarpma hızını ve balistik limit hızı V_{50} 'nin belirlenmesi için klasik Lambert-Jonas denkleminde göre sayısal olarak hesapladılar. Sonuçlar, V_{50} 'nin metal hacim fraksiyonuna ve numune kalınlığına göre parabolik bir trend içinde değiştiğini gösterdi. Alüminyum katmanlardaki eğilme ve esnemenin yanı sıra ara yüzeydeki ayrılma, GLARE 5 FML kirişlerinde darbe enerjisinin dağıtılmasında önemli roller oynadı. Deneysel olarak elde edilen sonuçları modellemek ve doğrulamak için 3B sonlu elemanlar (FE) kodu, LS-DYNA kullanıldı. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyum sağlandı. Belirli bir numune konfigürasyonu için, mermi geliş hızını V_{50} 'sine kadar artırarak maksimum temas kuvvetinin arttığı bulundu. Mermi hızını V_{50} 'sinin üzerine daha da artırarak, maksimum temas kuvveti, mermi geliş hızındaki artışa göre nispeten değişmediği sonucunu buldular. Silva vd. [16] Kevlar ile güçlendirilmiş ince kompozit lamine plakalar üzerindeki balistik darbe problemlerini deneysel ve sayısal simülasyonlar ile araştırmışlardır. Balistik etki, farklı kalınlıktaki plakalar üzerinde STANAG-2920'ye uygun olarak tasarlanmış simüle edilmiş parçalarla uygulanmıştır. Limit delme hızı (V_{50}) için bir tahmin elde etmek ve hasar modlarını ve hasarı simüle etmek için sayısal modelleme geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Hesaplamalar ticari bir kod kullanılarak sonlu farklara dayalı olarak yapılmış ve elde edilen değerler deneysel verilerle karşılaştırılarak simülasyonun performansı değerlendirilmiştir. Hesaplamalı simülasyon ve deneysel sonuçlar arasında laminatların hem deformasyonu hem de hasarı açısından iyi bir korelasyon elde edilmiştir. Gelecekteki çalışmalar, bir dış seramik katmanın araya yerleştirilmesinin yanı sıra kuru-ıslak ve sıcaklık döngülerinin plakaların mekanik mukavemeti üzerindeki etkisini ve hızlandırılmış yaşlanma altında zamansal gelişimlerini inceleyecek şekilde geliştirilmiştir. Kosedag ve Ekici [17] SiC takviyeli Al6061 metal matris kompozitlerin farklı takviye hacim oranlarında düşük hızlı ve balistik darbe tepkilerini araştırmışlardır. SiC parçacık hacim oranları %0, %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 olan numunelerde düşük hızlı darbe (LVI) testleri, %0 %10, %20 ve %30 hacim fraksiyonlarına sahip numuneler ile balistik testler yapılmıştır. Ortalama 500 m/s hızla fırlatılan mermi ile tüm numuneler üzerinde aynı koşullar altında balistik testler yapılmıştır. Numunelerin balistik direncinin belirlenmesinde, tanık yapılarıdaki mermi penetrasyonları dikkate alınmıştır. Kompozitlerde hem düşük hızlı darbe hem de balistik testin neden olduğu hasar ve deformasyonlar incelenmiştir. Düşük hızlı darbe test sonuçlarına göre, kompozit

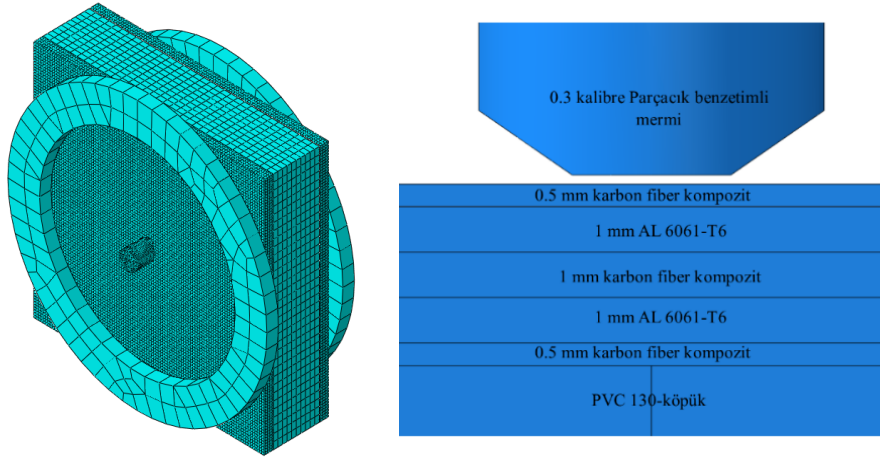
numuneler hacim oranları arttıkça daha az darbe enerjisi absorbe etmiş ve ayrıca takviyesiz örneklere göre üstün performans göstermiştir. Ayrıca çatlak oluşumu ağırlıklı olarak %30 takviye içeren numunelerde gözlenirken, hacim oranı %40 olan kompozit malzeme tamamen kırılmıştır. Takviye hacim oranı artışla birlikte numunelerin balistik direnci önemli ölçüde artmıştır. Kosedag vd. [18] polimer matrisli kompozit malzemelerin darbe direncini artırmak için fiber metal laminat (FML) olarak bilinen yeni bir hibrit malzeme geliştirmişlerdir. Fiber metal laminatlarda (FML'ler) istifleme sırasının, metal hacim oranının ve katman sayısının balistik direnç üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sıcak pres ve vakum ile farklı sekanslarda ve farklı hacim oranlarında dört tip FML üretilmiştir. Balistik testler tek kademeli gaz tabancası sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Soğurulan enerji, FML'lerin merminin giriş ve çıkış hızı ve mermi kütlesi dikkate alınarak oluşan enerji farkından hesaplanmıştır. Balistik testlerin ardından hasar türleri incelenmiştir. Mermi ile ilk karşılaşan metal tabakanın polimer matrisli kompozite göre FML'lerin darbe dayanımı üzerinde daha etkili olduğu ve metal hacim oranının artmasıyla darbe dayanımının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca üst katlar aynı kalırsa kat sayısındaki artış darbe dayanımını olumsuz etkilemiştir. Metal hacim oranı miktarı arttıkça balistik darbe dayanımı artmaktadır.

Bu çalışmada ise karbon fiber/epoksi alüminyum metal tabakalı çelik serbest parçacık takviyeli köpük çekirdekli sandviç yapı malzemeler kullanılarak, sayısal yöntemlerle simüle edilmiş optimum koruyucu balistik zırh tasarımı oluşturulmuştur. Fiber-metal plakalı, serbest parçacık takviyeli-köpük çekirdekli sandviç yapıların balistik performansının iyileştirilmesi üzerine yapılan olan çalışmada, en iyi performansı veren sandviç yapısı tasarlanmıştır. Balistik analizler parçacık benzetimli mermi kullanılarak gerçekleştirilmiş olup 3 farklı mermi hızı altında araştırılmıştır. 3 boyutlu sonlu elemanlar kodu kullanılarak yapılan analizlerde tüm malzeme modelleri için hasar kriterleri modellenmiştir.

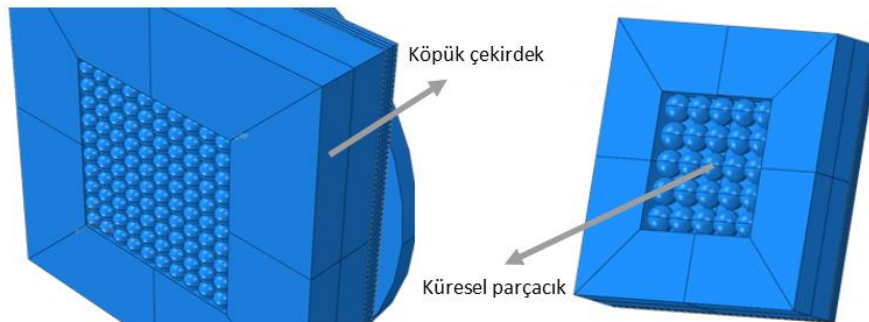
2. Sayısal Model

Fiber-metal tabakalı serbest parçacık-köpük çekirdekli sandviç yapıların balistik performansının iyileştirilmesi için parametreler belirlenmiş ve sayısal model şu şekilde oluşturulmuştur:

- Kompozit plakaların sayısal modeli
- Metal plakaların sayısal modeli
- Köpük malzemesinin sayısal modeli
- Serbest parçacıkların sayısal modeli
- 0.3 kalibre parçacık benzetimli merminin sayısal modeli



Şekil 1. Sayısal model



Şekil 2. a) 1. Tip, b) 2. Tip numune sayısal modeli

Numunelerin balistik davranışlarının sayısal analizleri ABAQUS/Explicit (versiyon 6.14) kullanılarak incelenmiştir. Balistik testler yaklaşık olarak 515, 650 ve 770 m/s mermi hızları altında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 2 tip numune kullanılmış olup, 1. Tip numune 20 mm köpük kalınlığı ve 5 mm çapında çelik bilye içermektedir. 2. Tip numune 20 mm köpük kalınlığı içerisinde 10 mm çapında çelik bilye içermektedir. Numune boyutları 100x100 mm boyutlarında ve plaka kalınlıkları 4 mm olarak üretilmiştir. Fiber-metal plakalar sırası ilse 0.5mm karbon fiber-1mm Al 6061-1mm karbon fiber-1 mm Al 6061-0.5mm karbon fiber içermektedir (Şekil 1 ve 2).

2.1. Kompozit Plakaların Sayısal Modeli

Bu çalışmada 3 boyutlu lineer olmayan sonlu elemanlar metodu kullanılmış ve her bir malzemenin malzeme modeline karar verilerek gerekli çalışmalar yapılmıştır. Kompozit malzemelerin elastik özelliklerinin tespitinde lamina teorisi kullanılmıştır. Bu çalışmada Abaqus/Explicit sonlu elemanlar yazılımında yer alan ve tabakalı kompozit malzemelerin modellenmesinde çok kullanışlı bir eleman tipi olan continuum shell elemanlar kullanılmıştır. Hesaplama formülasyonu, kabuk eleman teorisine göre çalışan ancak modelle yönteminde katı elemanlar kullanılan ve bu sayede fiziksel katmanları modelleme imkanı veren bir eleman tipidir. Fiber takviyeli kompozit malzemeleri sayısal olarak modellemek için mikro ve makro mekanik analizlerinin yapılması gerekmektedir.

2.1.1. Mikro Mekanik Analiz

Tabakalı kompozitlerin bir tabakanın mikro mekanik analizinde, kompozit yapıyı oluşturan fiber ve matris malzemeleri, malzemenin temel iki yapısını oluşturur. İzotropik malzemelerin aksine bir kompozit malzemedeki davranışı tahmin etmek için matris ve fiber malzemesinin davranışının tahmin edilmesi gerekmektedir. Eğer bir tabakalı ve fiber takviyeli kompozitin mikro mekanik analizi yapılmak isteniyorsa şu varsayımlar yapılmalıdır;

- Matris malzemesi elastik bir davranışa sahiptir ve izotropiktir.
- Fiber malzemesi elastik bir davranışa sahiptir, homojendir ve matrisle benzer şekilde izotropiktir,
- Fiberler kompozit malzeme içerisinde düzenli bir dağılıma sahipken benzer şekilde kusursuz da bir yönlenebilirliktedir.
- Tabakalı ve fiber takviyeli kompozit malzeme genel olarak ortotropiktir ve elastik bir malzeme davranışı göstermektedir.
- Kompozit malzemenin fiber ve matris yapılarında iç gerilmeler bulunmamakta ve bu malzeler arasında kusursuz ara yüzey bağları bulunmaktadır.

Kompozit malzemedeki mikro mekanik analiz yapılarak elastiklik modülü, poisson oranı ve kayma modülü gibi mekanik özellikler şu şekilde hesaplanır:

a) Tek yönlü bir katmanın fiber yönündeki elastiklik modülünün (E_1) hesaplanması

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (1)$$

b) Poisson oranının (ν_{12}) hesaplanması

$$\nu_{12} = \nu_f \nu_f + \nu_m \nu_m \quad (2)$$

c) Fiber eksenine dik yöndeki elastiklik modülünün (E_2) hesaplanması

$$\frac{1}{E_2} = \frac{1}{E_f} V_f + \frac{1}{E_m} V_m \quad (3)$$

d) Kayma modülünün (G_{12}) hesaplanması

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G_f} V_f + \frac{1}{G_m} V_m \quad (4)$$

2.1.2. Makro Mekanik Analiz

Fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin makro mekanik analizi adını da aldığı tabakaların katman katman yapısal davranışları ile ilgilidir. Yapısal davranışlar ise mikro mekanik analizde anlatılan ortotropik davranışın gerilme-şekil değiştirme analizleri ile açıklanabilmektedir. Tabakaların gerilme-şekil değiştirme analizleri bu bölüme açıklanmaktadır. Yapılan bu analizler kompozitlerin katman katman rijitlik analizleri ile açıklanabilir. Bu analiz esnasında yapılan analizlerde şu esaslar dikkate alınmalıdır;

- Küçük deformasyonlar teorisi dikkate alınır.
- Lineer elastisite teorisi dikkate alınır.
- Düzlem gerilme hali mevcuttur.
- Makroskobik ölçekte katman homojen kabul edilir.

2.1.3. Kompozit Tabakaları için Gerilme-Şekil Değiştirme Bağlılıkları

Yapısal malzemelerin mekanik özelliklerini anlamak için gerilme ve şekil değiştirme dağılımlarını ölçmek önemlidir. Gerilme-şekil değiştirme diyagramı, yük altındaki malzemeleri anlamaya yardımcı olur. Bu diyagramları elde etmek için iki yöntem vardır: temaslı ve temassız; eski durumda mekanik, üniversal makineye bir malzemenin yerleştirildiği, üzerine sürekli bir yük uygulandığı ve ortaya çıkan deformasyonun ölçüldüğü basma testi gibi fiziksel testler yapmaktan üstündür. Optik yöntemler, 1930'da geliştirilen, delik delmenin en çok kullanılan tekniklerden biri olduğu artık gerilme, alan içi yer değiştirmeler ve şekil değiştirmeyi belirlemek için bir yol olarak da kullanılmaktadır. Günümüzde bu teknikler ASTM tarafından standardize edilmiştir.

Bir kompozit malzemede fiber doğrultularında yüksek dayanım mevcuttur. Fiberin tek yönlü veya iki yönlü olması durumuna göre eksenel simetrisi malzeme içerisinde mevcut olabilmektedir. Oluşan bu ilişkiler ile gerilme şekil değiştirme ilişkileri indis notasyonunda şu şekilde yazılabilir;

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (5)$$

burada σ_{ij} gerilme tensörü, ε_{kl} şekil değiştirme tensörü ve C_{ijkl} rijitlik tensörüdür. Elastiklik matrisi mühendislik sabitleri cinsinden yazılacak olursa;

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Ortotropik bir malzeme için rijitlik matrisi elemanları ise mühendislik sabitleri cinsinden;

$$C_{1111} = \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} \quad (7)$$

$$C_{1122} = \frac{\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}}{E_2 E_3 \Delta} \quad (8)$$

$$C_{1133} = \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Delta} \quad (9)$$

$$C_{2222} = \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} \quad (10)$$

$$C_{2233} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{E_1 E_3 \Delta} \quad (11)$$

$$C_{3333} = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Delta} \quad (12)$$

$$C_{1212} = G_{12} \quad (13)$$

$$C_{1313} = G_{13} \quad (14)$$

$$C_{2323} = G_{23} \quad (15)$$

Burada;

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3} \quad (16)$$

2.1.4. Hasar Kriterleri

Bir kompozit plakanın mekanik bir etki altında nasıl bir deformasyona maruz kaldığı ve bu deformasyon sonucu plakada oluşabilecek hasarların biçiminin tespiti önem arz etmektedir. Eğer yükleme sonrası plaka üzerinde oluşabilecek hasarlar biliniyorsa kompozit malzeme içeren sistemin tamamen hasara uğramadan önce gerekli önlemler alınabilir. Kompozit malzemelerin hasar modellerinin geliştirilmesi uzun yıllar süren geçmişe sahiptir ve literatürde kullanılabilir birçok teori mevcuttur. Hasar tipleri daha çok tek bir tabakanın gerilme bileşenleri üzerine kurulmuş modellerdir. Bu çalışmada iki boyutlu hasar kriterleri kullanılmıştır [21] ve Tablo 1’de kullanılan kompozit malzemenin mekanik özellikleri verilmiştir.

Fiber çekme hasarı ($\widehat{\sigma}_{11} \geq 0$)

$$F_f^t = \left(\frac{\widehat{\sigma}_{11}}{X^T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\widehat{\tau}_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (17)$$

Fiber basma hasarı ($\widehat{\sigma}_{11} < 0$)

$$F_f^c = \left(\frac{\widehat{\sigma}_{11}}{X^C}\right)^2 \quad (18)$$

Matris Çekme ($\widehat{\sigma}_{22} \geq 0$)

$$F_m^t = \left(\frac{\widehat{\sigma}_{22}}{Y^T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\widehat{\tau}_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (19)$$

Matris Basma ($\widehat{\sigma}_{22} < 0$)

$$F_m^c = \left(\frac{\widehat{\sigma}_{22}}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \frac{\widehat{\sigma}_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\widehat{\tau}_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (20)$$

$\widehat{\sigma}_{11}, \widehat{\sigma}_{22}, \widehat{\tau}_{12}$ efektif stres tensörünün bileşenleridir, $\widehat{\sigma}$, başlatma kriterlerini değerlendirmek için kullanılan ve aşağıdakilerden hesaplanan [21]:

$$\widehat{\sigma} = M\sigma \quad (21)$$

σ gerçek stres ve hasar operatörü olduğunda:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_f)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_s)} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$d_f, d_m,$ and d_s hasar değişkenlerinden türetilen fiber, matris ve kesme hasarını karakterize eden dahili (hasar) değişkenlerdir. $d_f^t, d_f^c,$ and d_m^c daha önce tartışılan dört moda karşılık gelen, aşağıdaki gibi [21]:

$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \text{if } \widehat{\sigma}_{11} \geq 0 \\ d_f^c & \text{if } \widehat{\sigma}_{11} < 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t & \text{if } \widehat{\sigma}_{22} \geq 0 \\ d_m^c & \text{if } \widehat{\sigma}_{22} < 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$d_s = 1 - (1-d_f^t)(1-d_f^c)(1-d_m^t)(1-d_m^c) \quad (25)$$

Tablo 1. Kompozit malzemelerin (Karbon fiber/epoksi) mekanik özellikleri [20]

Özellik	Karbon fiber/epoksi
Boyuna elastisite modülü, E_{11}	150.9 (GPa)
Enine elastisite modülü, $E_{22} = E_{33}$	11.2 (GPa)
Düzlem içi kayma modülü, $G_{12} = G_{13}$	5.3 (GPa)
Düzlem dışı kayma modülü, G_{23}	1.4 (GPa)
Hacim oranı, V_f	0.54
Poison oranı, $\mu_{12} = \mu_{13}$	0.29
Poison oranı, μ_{23}	0.33
Yoğunluk	1710 (kg/m ³)
Boyuna çekme mukavemeti, X_T	1858.3 (MPa)
Enine çekme mukavemeti, $Y_T = Z_T$	25.4 (MPa)
Boyuna basma mukavemeti, X_C	576.8 (MPa)
Enine basma mukavemeti, $Y_C = Z_C$	107.3 (MPa)
Düzlem içi kayma mukavemeti $S_{12} = S_{13}$	79.5 (MPa)
Interlaminar kayma mukavemeti, S_{23}	22.9 (MPa)

2.2. Metal Plakaların Sayısal Modeli

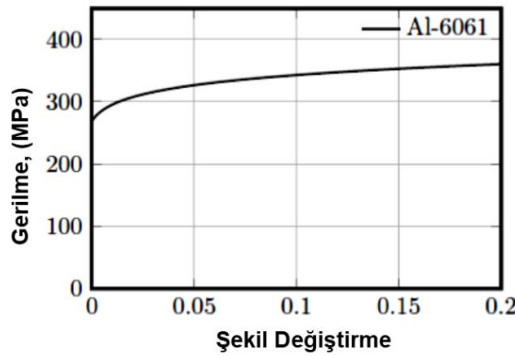
Bu çalışmada kullanılan metal malzemelerin hasar modeli bu bölümde açıklanmıştır. Metal plaka plastik davranışı, penetrasyon ve perforasyon davranışı için Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmıştır. Johnson-Cook dinamik hasar modeli, metallerin ABAQUS/Explicit'de sünek hasar kriterini tanımlaması için uygundur. Bu modelin açıklamalarıyla birlikte parametreler, Tablo 2'de verilmiştir. Denklem 1, Johnson-Cook malzeme modeli için akış gerilimini ampirik olarak tanımlar [21].

$$\sigma = [A + B(\varepsilon_p)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_a}{T_f - T_a} \right)^m \right] \quad (26)$$

Johnson-Cook dinamik hasar modeli, eleman düğüm noktalarındaki eşdeğer plastik şekil değiştirme değerine dayanmaktadır; hasar parametresi 1'i aştığında arızanın meydana geldiği varsayılır. Hasar parametresi şu şekilde tanımlanır;

$$w = \sum \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{\Delta \varepsilon_{p,f}} \right) \quad (27)$$

burada $\Delta \varepsilon_p$, eşdeğer plastik gerinim artışı, $\Delta \varepsilon_{p,f}$ hasar anındaki şekil değiştirme, ve toplama, analizdeki tüm artışlar üzerinden gerçekleştirilir. Hasar anındaki şekil değiştirmenin, $\Delta \varepsilon_{p,f}$, boyutsuz bir plastik şekil değiştirme hızına bağlı olduğu varsayılır.



Şekil 3. AA 6061 – T6 gerilme şekil değiştirme diyagramı.

$$\varepsilon_{p,f} = \left[d_1 + d_2 \exp \left(d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left(1 + d_5 \left(\frac{T - T_a}{T_f - T_a} \right) \right) \quad (28)$$

burada d_1 - d_5 hasar parametreleridir. Bu hasar kriterinin karşılanması durumunda, deviatorik gerilme bileşenleri sıfıra ayarlanır ve analizin geri kalanı için sıfır kalır. Şekil 3'de AA 6061 – T6 gerilme şekil değiştirme diyagramı verilmiştir.

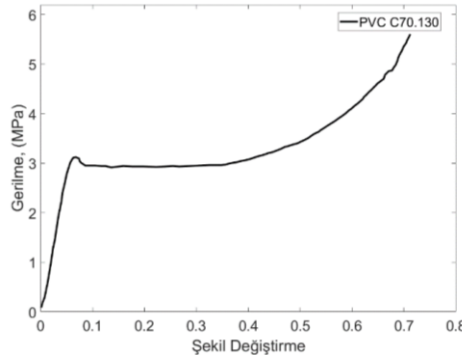
Tablo 2. Alüminyum 6061 T6 malzemesi için Johnson Cook malzeme modeli parametreleri [21]

Alüminyum 6061 T6	Johnson-Cook Model
ρ (kg/m ³), Yoğunluk	2700
E (GPa), Elastiklik modül	70
ν , Poisson oranı	0.33
C_p (J/kgK), Özgül ısı kapasite	910
α (K ⁻¹), Termal rezistans	2.30×10^{-5}
$\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹), Referans şekil değiştirme hızı	597.2
A (MPa), Elastik limit	270
B (MPa), Plastik davranış için sabit	154.3
C, Şekil değiştirme hızı hassasiyeti	0.1301
n, Plastik davranış için sabit	0.2215
m, Sıcaklık bağımlılığı içeren sabit	1.34
Tf (K), Malzeme erime sıcaklığı	925
d1, Model parametresi	-0.77
d2, Model parametresi	1.45
d3, Model parametresi	0.47
d4, Şekil değiştirme hızına bağlı hasar parametresi	0.0
d5, Sıcaklığa bağlı hasar parametresi	1.6

2.3. PVC Köpük Malzemesinin Modellenmesi

Katı bir polimerik köpük, kapalı veya açık hücrelerden oluşabilir. Kapalı hücreli köpükler, sürekli bir makromoleküler faz içinde bitişik hava kabarcıklarının tutulduğu hücrel bir yapıya sahiptir. Örneğin köpük polistiren, tamamen kapalı köpük hücrelerden oluşur. Öte yandan, açık hücreli köpükler, katı makromoleküler faz boyunca "havanın istendiği gibi akması için sürekli kanalların mevcut olduğu bir hücrel ağa sahiptir. Poliüretan koltuk minderleri, açık hücreli köpüğün çok iyi bir örneğidir. Kapalı hücreli köpükler genellikle serttir, açık hücreli köpükler ise genellikle esnekler. Polimerik köpüklerin çoğu, ekstrüzyon, sıkıştırılmalı kalıplama, enjeksiyonlu kalıplama, reaksiyon enjeksiyonlu kalıplama, katı hal yöntemi bilinen birkaç köpükleme tekniğinden biri ile üretilir.

Günümüzde sandviç malzemelerin çekirdek yapısını oluşturan malzemeler oldukça popüler hale gelmiştir. Sandviç malzemelerin dayanımı arttırırken hafiflikte sağlamak ileri mühendislik malzemeler ile mümkündür. Bu çekirdek malzemeler arasında ise geniş bir kullanım alanına sahip olan en önemli malzemelerden biri ise polimerik köpük malzemeleridir. Polimerik köpük malzemelerinin geniş bir kullanım alanına sahip olmasına neden olan en önemli özellikleri; elastikiyet, hafiflik, rijitlik, yüksek gözeneklilik, yüksek çarpışma ve iyi enerji sönmleme yeteneğidir. Polimerik köpük malzemelerinin mekanik özellikleri köpük yapısına, köpük yoğunluğu ve geometrik özelliklerine göre değişim göstermektedir. Sandviç yapılarda kullanılan polimerik köpük malzemeleri ile ilgili elastik ve plastik davranışı modellemek üzere farklı sonlu elemanlar malzeme modelleri mevcuttur. PVC C70.130 köpük malzemesinin tek eksenli basma testi sonucu gerilme şekil değiştirme eğrisi Şekil 4'de verilmiştir. Bu çalışmada kapalı hücreli PVC köpük malzemesi ABAQUS'ta modellemek için, 'Crushable Foam' modeli kullanılmıştır. Bir kapalı hücreli köpük malzemesinin akma yüzeyi şu şekilde tariflenmiştir [21].

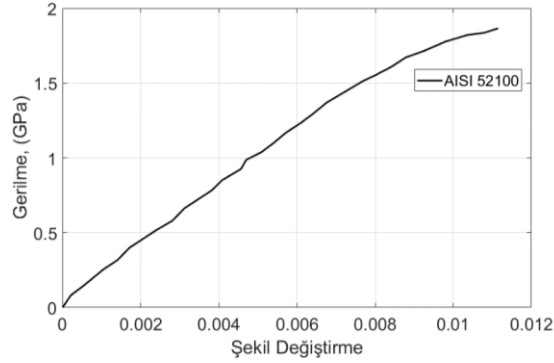


Şekil 4. PVC C70.130 köpük malzemesinin gerilme şekil değiştirme diyagramı

2.4. Çelik Bilyelerin ve Parçacık Benzetimli Merminin Sayısal Modeli

Savunma sanayisi sahip olduğu güç nedeniyle büyük önem taşıdığından teknolojik gelişmelere paralel olarak sürekli iyileştirme, yenilik ve modernizasyon gerektirmektedir. Zırh teknolojilerine yönelik artan ve yeni tehdit seviyeleri, zırh sistemlerinin daha çözüm odaklı ve yenilikçi olmasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, savunma teknolojilerindeki sivil ve

askeri aktörler, düşük ağırlığın yanı sıra yüksek performans ve hareket kabiliyeti elde etmek için yeni zırh sistemleri geliştirmek için durmaksızın çalışıyorlar. Yüksek performanslı balistik koruma sistemleri genellikle farklı malzeme katmanlarından oluşur ve her katman mermi enerjisinin zayıflamasında belirli bir rol sağlar. Tipik olarak, mermi çarpma yüzüne seramik veya yüksek sert çelik gibi sert bir malzeme yerleştirilir ve arka plaka olarak daha yumuşak bir polimer matris kompoziti kullanılır. Vuruş yüzünün rolü, mermiyi erozyon, kırılma ve yuvarlanma yoluyla yavaşlatmak ve düşürmektir, daha yumuşak arka plaka ise merminin ve parçalarının artık kinetik enerjisini emerek onu hareketsiz hale getirmektedir.

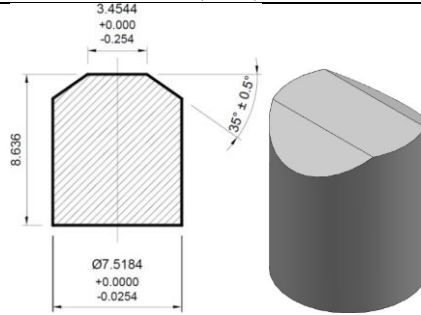


Şekil 5. AISI 52100 çelik malzemesinin gerilme şekil değiştirme eğrisi

Çelik bilyeler AISI 52100 çeliğinden imal edilmiş olup mekanik özellikleri tedarik edici firmadan temin edilmiştir. Katı elemanlar ile modellenen yapının davranışı elasto-plastik modellenmiş olup gerilme-şekil değiştirme tarif edilmiştir (Şekil 5). Hasar şekil değiştirmesi tariflenmiştir. 0.3 kalibre parçacık benzetimli mermi (FSP) 4340 çeliğinden imal edilmiş olup teknik resmi ve katı modeli Şekil 6'da verilmiştir. Mekanik özellikleri ise Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Parçacık benzetimli mermi mekanik özellikleri

Özellik	Değer
Yoğunluk, kg/m ³	7850
Elastiklik Modülü, GPa	200
Poisson Oranı	0.29
Akma Gerilmesi, (MPa)	745

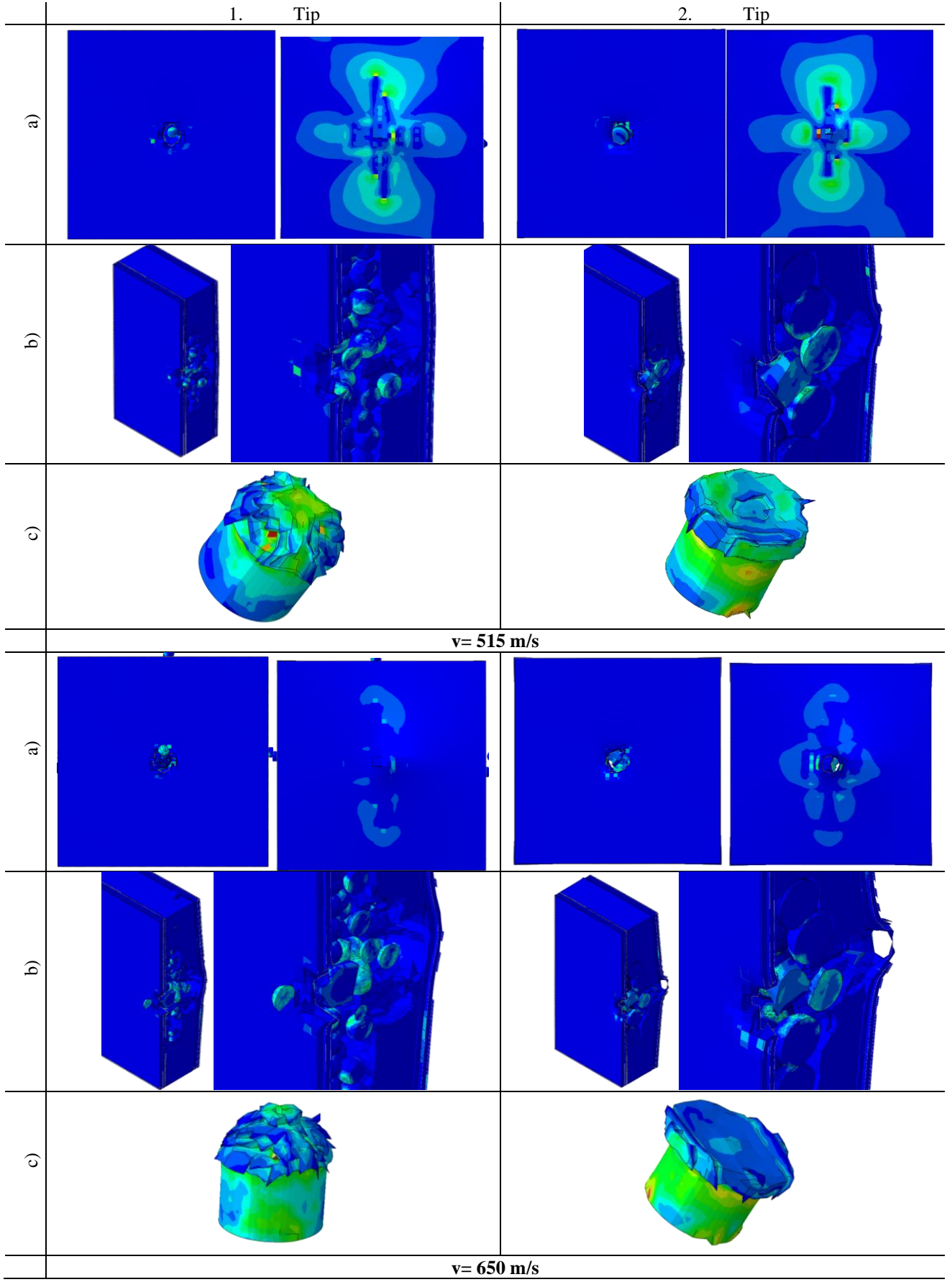


Şekil 6. Parçacık benzetimli mermi teknik resmi ve katı modeli

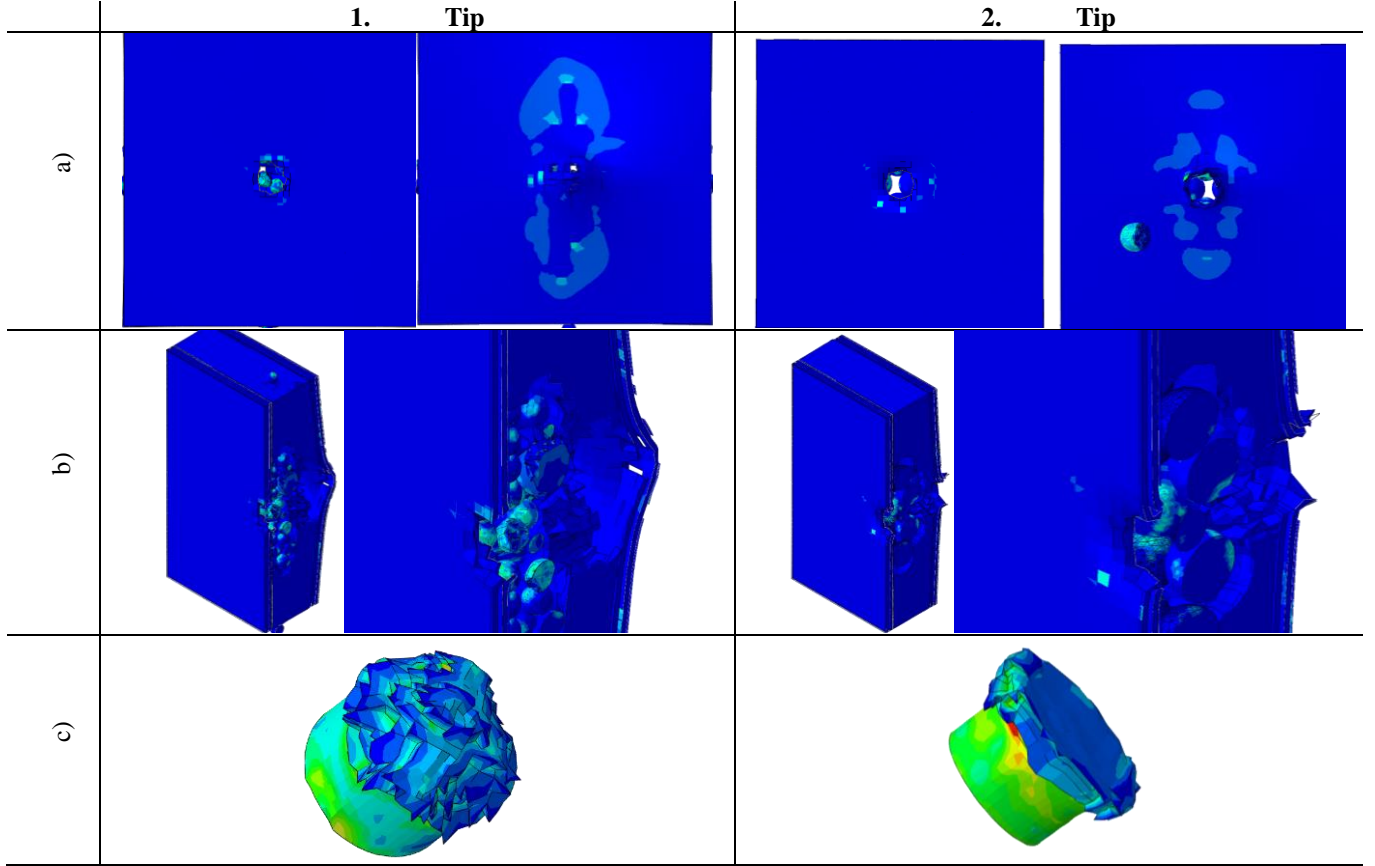
3. Sayısal Sonuçlar

Yüzey plakaları karbon fiber/epoksi kompozit-alüminyum metal plaka olan serbest küresel çelik parçacık takviyeli köpük çekirdekli sandviç yapıların balistik davranışları bu araştırma kapsamında sayısal olarak araştırılmıştır. Balistik davranış araştırmasında 0.3 kalibre parçacık simule mermi (FSP) kullanılmıştır. Analizde kullanılan tüm malzemelerin sonlu elemanlar malzeme modelleri yukarıdaki bölümlerde açıklanmıştır. Oluşturulan 2 farklı tipteki yapının 515, 650 ve 770 m/s hızları altında analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapıların tasarım parametrelerinin başında yüksek hızda gelen merminin yön değiştirerek tahrip gücünün azaltılması amaçlanmaktadır.

Şekil 7, 515 m/s mermi hızı için 1. ve 2. Tip numunenin, mermi yönünden, arkadan, kesit, yakın kesit, ve merminin gerilme dağılımları ve deformasyon görüntülerini göstermektedir. 1. Tip numunede yüksek yoğunluklu köpük malzeme içerisinde 5 mm çapında çelik bilyeler mevcuttur. 2. Tip numunede ise 10 mm çelik bilyeler mevcuttur. Yüzey plakalarının metal ve çelik olması perforasyon davranışının önlenmesinde önemli bir role sahiptir. Merminin ilk temas ettiği bilyenin konumu balistik davranışın belirlenmesi açısından yüksek öneme sahip olan diğer husustur.



Şekil 7. 515 ve 650 m/s mermi hızı için 1. ve 2. Tip numunenin, a) mermi yönünden ve arkadan, b)kesit, c)mermi gerilme dağılımları ve deformasyon görüntüleri



Şekil 8. 770 m/s mermi hızı için 1. ve 2. Tip numunenin, a) mermi yönünden ve arkadan, b)kesit, c)mermi gerilme dağılımları ve deformasyon görüntüleri

515 m/s mermi hızı altında yüksek çapa sahip olan numunenin arka yüzeyinde kısmi penetrasyon ortaya çıkmıştır. Mermi geometrisi incelendiğinde ise daha küçük çaplı parçacıklı numunede mermi her yönden etkiye maruz kalmış ve deforme olmuştur. Daha yüksek çaplı numunede ise mermi tek yönlü deformasyona maruz kalmış ve çelik bilyeleri hareket ettirerek numune dış yüzeylerine hasar vermesini sağlamıştır. Detaylı kesit görüntülerinde hasar mekanizmaları görülmektedir. Renklendirme spektrumu gerilme dağılımını göstermektedir. Her iki numunenin arka yüzeyinde hasar meydana gelse de 10 mm çaplı parçacıklı numunenin arka yüzeyinde daha yüksek hasar meydana gelmiştir.

Şekil 7’de 650 m/s hızında 0.3 kalibre simüle mermi ile 1. ve 2. Tip numunelerin balistik analizlerinin gerilme dağılımlarını ve deformasyon görüntüleri göstermektedir. Hız artışı ile 2. Tip numunede (10 mm çaplı parçacıklı numune) tam perforasyon meydana gelmiştir ve numune delinmiştir. Daha küçük çaplı numunede ise parçacık amaçlanan etkiyi göstermiştir. Küresel parçacık hareketleri ile mermi hızı azaltılmıştır. Köpük malzemesindeki hasarlar bu hız seviyesinde daha yüksektir. 2. Tip numunedeki delinmenin bir diğer nedeni yüksek çaplı bilyenin numune içerisindeki hareketi sayesinde. Yapıdan mermi çıkışı olmamıştır. Küçük çaplı bilyeler hareket ederek enerjileri sönmülmüş yapı dışına çıkış olmamıştır. 1. Ve 2. Tip numunelerin 770 m/s mermi hızı altındaki analizleri Şekil 8’de verilmiştir. Hız artışı etkisi bu yapılarda daha belirgin bir şekilde gözükmemektedir. 2. Tip numunede malzemenin arka yüzünde hasar artmıştır ve mermi deformasyonu artmıştır. Ancak bu hız altında 1.tip numunede hala tam perforasyon meydana gelmemiştir. Fiber-metal yüzey plakasının etkisinin önemi bu hız altında daha belirgindir. Köpük malzemesinin deformasyonu üst seviyededir, parçacıkların yüksek hızlı hareketi ile köpük malzemesi deforme olmuştur. 1. Tip numunenin arka yüzeyinde hız artışı ile penetrasyon artmıştır, hasar oluşumu daha belirgindir. Yapılan tasarım ile dayanımı düşük olan malzemelerinin bir araya gelmesi ve kısmi parçacık kullanımı ile balistik davranışının üst seviyede geliştiği açıktır.

4. Tartışma ve Yorum

Sayısal yöntemde analizler ABAQUS/Explicit 3 boyutlu sonlu elemanlar yazılımında gerçekleştirilmiştir. Metal plakalar, küresel parçacıklar ve köpük malzemesi non-linear olarak modellenerek gerilme ve şekil değiştirme diyagramları kullanılmıştır. Kompozit plakalar kabuk eleman teorisine göre modellenmiş olup Hashin hasar kriterleri kullanılmıştır. Köpük malzemesi olarak PVC AIREX C.130 köpük malzemesi seçilmiş olup, ‘crushable foam’ malzeme modeli ile modellenmiştir. Yapıştırıcı malzemesinin balistik açıdan etkisinin çok küçük olduğu ön çalışmalar neticesinde belirlenmiş olup, modellenmesi gerekli görülmemiştir. Balistik davranışlar 0.3 kalibre parçacık simüle mermi kullanılarak 515, 650 ve 770 m/s hızları altında araştırılmıştır. 2 farklı tip yapı tasarlanmıştır. Yüzey plakaları fiber-metal plaka ile sandviç yapı oluşturulmuştur. Oluşturulan

sandviç yapının köpük çekirdek içerisine gömülü farklı çaptaki (5 ve 10 mm) küresel parçacıklar ile balistik performansı sayısal olarak incelenmiştir. Analizler sonucunda 5 mm çapı küresel parçacıklara sahip yapının (1. Tip) daha iyi perforasyon davranışı gösterdiği görülmüştür. Büyük çaplı parçacıklar yapıdan çıkış göstermiştir. Mermi çıkışı olmamıştır ancak küresel parçacıklar mermi etkisi ile yapıyı perfore etmiştir. Küçük çaplı parçacıkların kendi içerisinde hareketleri ile mermi enerjisi ve parçacıkların enerjisi sönümlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 2209-A programı kapsamında desteklenmiş olup, yazarlar çalışmanın gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a teşekkür eder.

Referanslar

- [1] H. N. Long, R. Shannon, J. C. Stephen, P. M. Adrian and C. O. Adrian, "The effect of target thickness on the ballistic performance of ultra high molecular weight polyethylene composite", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 75, p. 174-183, 2015.
- [2] C. Sipei, L. Jun, Z. Pan, L. Chunpeng and C. Yuansheng, "Dynamic response of sandwich panels with multi-layered aluminum foam/ UHMWPE laminate cores under air blast loading", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 138, p. 103475, 2020.
- [3] R. M. Jones, "Mechanics of composite materials". London: Taylor & Francis, 1999.
- [4] K. Krishnan, S. Sockalingam, S. Bansal and S. D. Rajanb, "Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact", *Composites Part B: Engineering*, vol. 41, p. 583-593, 2010.
- [5] M. L. Wilkins, "Mechanics of penetration and perforation", *International Journal of Engineering Science*, vol. 16, p. 793-807, 1978.
- [6] I. Crouch, "12 - the future of armour materials", *The Science of Armour Materials*, Woodhead Publishing in Materials, Woodhead Publishing, p. 675-692, 2017.
- [7] T. Nieberle, S. R. Kumar, A. Patnaik and C. Goswami, "Review: Composite Materials for Armour Application", in: *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer Singapore, p. 239-248, 2021.
- [8] T. Singh, A. Patnaik, B. K. Satapathy and M. Kumar, "Performance analysis of organic friction composite materials based on carbon nanotubes-organic-inorganic fibrous reinforcement using hybrid AHP-FTOPSIS approach", *Composites: Mech., Comput. Appl. Int. J. Vol. 3*, p. 189-214, 2012.
- [9] H. Wang, K. R. Ramakrishnan and K. Shankar, "Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores". *Mater Design*, vol. 99, p. 68-82, 2016.
- [10] J. Zhou, M. Z. Hassan and Z. Guan, "The low velocity impact response of foam-based sandwich panels", *Compos Sci Technol*, vol. 72, p. 1781-1790, 2012.
- [11] Y. Chen, S. Hou and K. Fu, "Low-velocity impact response of composite sandwich structures: modelling and experiment", *Compos Struct.* vol. 168, p. 322-334, 2017.
- [12] V. Crupi, E. Kara and G. Epasto, "Prediction model for the impact response of glass fibre reinforced aluminium foam sandwiches", *Int J Imp Eng*, vol. 77, p. 97-107, 2015.
- [13] U. Caliskan and M. K. Apalak, "The response of pin-clamped carbon fibre-reinforced plastics composite sandwich beams with polyvinylchloride foam core under bending impact", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 39, p. 384-405, 2020.
- [14] L. Chengjun, Y. X. Zhang, Jing Li, "Impact responses of sandwich panels with fibre metal laminate skins and aluminium foam core", *Composite Structures*, vol. 182, p. 183-190, 2017.
- [15] A.Seyed Yaghoubi and B.Liaw, "Thickness influence on ballistic impact behaviors of GLARE 5 fiber-metal laminated beams: Experimental and numerical studies", *Composite Structures*, vol. 94, p. 2585-2598, 2012.
- [16] M.A.G.Silva, C. Cismaşiu, C. and G. Chiorean, "Numerical simulation of ballistic impact on composite laminates", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 31, p. 289-306, 2005.
- [17] E. Kosedag ve R. Ekici, "Low-velocity and ballistic impact resistances of particle reinforced metal-matrix composites: An experimental study", *Journal of Composite Materials*, vol. 56(7), p. 991-1002, 2022.
- [18] E. Kosedag, M. Aydin, R. Ekici, "Effect of stacking sequence and metal volume fraction on the ballistic impact behaviors of ARALL fiber-metal laminates: An experimental stud", *Polymer Composites*, vol. 43(3), p. 1536-3545, 2022.
- [19] Abaqus/Explicit (version 6.14), User's manual, finite element software. available from <http://www.simulia.com>.
- [20] K. K. Namala, P. Mahajan and N. Bhatnagar, "Digital image correlation of low-velocity impact on a glass/epoxy composite", *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, vol. 15, p. 203-217, 2014.
- [21] A. Manes, F. Serpellini, M. Pagani, M. Saponara, and M. Giglio, "Perforation and penetration of aluminium target plates by armour piercing bullets". *International Journal of Impact Engineering*, vol. 69, p. 39-54, 2014