

Alümina (Al_2O_3) Takviyeli Petek Çekirdekli Sandviç Panellerin Yüksek Hızlı Darbe Tepkisi: Sayısal Analiz Çalışması

İsmail TÜRKDÖNMEZ¹  Yusuf Tansel İÇ^{2*} 

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Bölümü, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

²Endüstri Mühendisliği Bölümü, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 08/12/2024
Revision: 02/01/2025
Accepted: 06/01/2025

Keywords

Honeycomb sandwich panels, High velocity impact resistance, Core material behavior, Perforation resistance, Penetrator behavior, Finite element analysis (FEM).

Makale Bilgisi

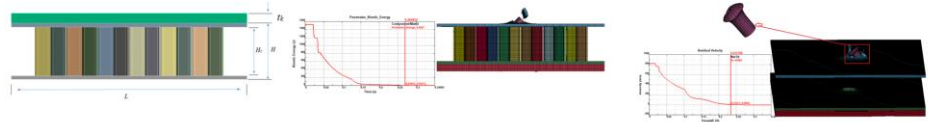
Araştırma makalesi
Başvuru: 08/12/2024
Düzeltilme: 02/01/2025
Kabul: 06/01/2025

Anahtar Kelimeler

Petek sandviç paneller,
Yüksek hızlı darbe direnci,
Çekirdek malzeme
davranışı, Perforasyon
direnci, Penetratör
davranışı, Sonlu elemanlar
analizi (FEM).

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışma, Alümina (Al_2O_3) kaplamalı petek çekirdekli sandviç panellerin yüksek hızlı darbe tepkisini analiz etmektedir. Sayısal analizler LS-DYNA kullanılarak gerçekleştirilmiş ve çekirdek malzemelerinin performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. / This study analyzes the high-speed impact response of alumina (Al_2O_3) coated honeycomb core sandwich panels. Numerical simulations were performed using LS-DYNA, and the effect of core materials on performance was investigated.



Şekil A: Sandviç panel yüksek hızlı penetratör çarpma etkileri / **Figure A:** Effects of high-velocity penetrator impact on sandwich panel

Önemli noktalar (Highlights)

- Alümina (Al_2O_3) kaplamalı sandviç panellerin yüksek hızlı darbe tepkisi sayısal olarak analiz edilmiştir. / The high-speed impact response of alumina (Al_2O_3) coated sandwich panels was numerically analyzed.
- 304 paslanmaz çelik ve AA 3003 çekirdek malzemeleri karşılaştırılmıştır. / 304 stainless steel and AA 3003 core materials were compared.
- Sonlu elemanlar analizleri LS-DYNA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. / Finite element analyses were performed using LS-DYNA.

Amaç (Aim): Yüksek hızlı darbelere karşı petek çekirdekli sandviç panellerin mekanik performansını analiz etmek. / To analyze the mechanical performance of honeycomb core sandwich panels against high-speed impacts.

Özgünlük (Originality): Alümina kaplamalı ve farklı çekirdek malzemelerine sahip panellerin yüksek hızlı darbe direncine etkisi ilk kez incelenmiştir. / The effect of alumina-coated panels with different core materials on high-speed impact resistance was investigated for the first time.

Bulgular (Results): 304 paslanmaz çelik çekirdekli paneller daha yüksek balistik direnç gösterirken, AA 3003 çekirdekli paneller daha fazla enerji emme kapasitesine sahiptir. / 304 stainless steel core panels exhibited higher ballistic resistance, while AA 3003 core panels had a greater energy absorption capacity.

Sonuç (Conclusion): Alümina kaplamalı petek çekirdekli sandviç panellerin balistik performansı çekirdek malzemesine bağlıdır ve paslanmaz çelik çekirdek, daha yüksek direnç sunmaktadır. / The ballistic performance of alumina-coated honeycomb core sandwich panels depends on the core material, with a stainless-steel core providing higher resistance.



Alümina (Al_2O_3) Takviyeli Petek Çekirdekli Sandviç Panellerin Yüksek Hızlı Darbe Tepkisi: Sayısal Analiz Çalışması

İsmail TÜRKDÖNMEZ^{1*} Yusuf Tansel İÇ^{2*}

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Bölümü, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

²Endüstri Mühendisliği Bölümü, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/12/2024
Düzeltilme: 02/01/2025
Kabul: 06/01/2025

Anahtar Kelimeler

Petek sandviç paneller,
Yüksek hızlı darbe direnci,
Çekirdek malzeme
davranışı, Perforasyon
direnci, Penetratör
davranışı, Sonlu
elemanlar analizi (FEM).

Öz

Balistik koruyucu tasarımında, çok sayıda faktörün yanı sıra, sağlamlık ve hafiflik iki temel ve vazgeçilmez unsur olarak öne çıkmaktadır. Özellikle savunma sanayine yönelik araçlarda, dış tehditlere karşı koruma sağlamak amacıyla geliştirilen zırh tasarımlarında bu iki faktörün önemi daha da artmaktadır. Hareketli ve dinamik yapılarda olduğu kadar, statik yapıların tasarımında da zırh özelliklerinin dikkate alınması büyük bir gerekliliktir. Farklı modellerde, kalınlıklarda ve geometrilere üretilen bu sandviç paneller, performans ve etkinlik açısından geniş bir araştırma konusu oluşturmuş, literatürde bu konuda çok sayıda detaylı çalışma yapılmıştır. Sandviç panellerin sunduğu çözümler, yalnızca mekanik dayanıklılığı artırmakla kalmaz, aynı zamanda yapıların ağırlık yükünü minimize ederek enerji verimliliğine ve kullanım ömrüne de önemli katkılarda bulunur. Bu nedenle, zırh sistemlerinde kullanılan sandviç panellerin optimizasyonu, mühendislikte hem teorik, hem de pratik açıdan yenilikçi bir çalışma alanı olarak kabul edilmektedir. Bu makalede, Alümina (Al_2O_3) plaka kaplamalı, 304 paslanmaz çelik yüzey tabakaları ile 304 paslanmaz çelik ve Alüminyum Alaşım (AA 3003) çekirdeklerden oluşan balpeteği sandviç panellerin yüksek hızlı penetratör çarpmasına karşı mekanik davranışları incelenmiştir. Ayrıca, farklı çekirdek malzemelerinin performansa etkisi vurgulanmıştır.

High Speed Impact Response of Alumina (Al_2O_3) Reinforced Honeycomb Core Sandwich Panels: Numerical Analysis Study

Article Info

Research article
Received: 08/12/2024
Revision: 02/01/2025
Accepted: 06/01/2025

Keywords

Honeycomb sandwich
panels, High velocity
impact resistance, Core
material behavior,
Perforation resistance,
Penetrator behavior,
Finite element analysis
(FEM).

Abstract

In addition to many other factors, robustness, and lightness are two fundamental and indispensable elements in the design of ballistic protection. The importance of these two factors increases even more in armor designs developed to protect against external threats, especially in vehicles for the defense industry. It is a great necessity to consider armor properties in the design of static structures as well as in moving and dynamic structures. These sandwich panels, which are produced in different models, thicknesses, and geometries, have been the subject of extensive research in terms of performance and effectiveness, and many detailed studies have been conducted in the literature. The solutions offered by sandwich panels not only increase mechanical durability but also make significant contributions to energy efficiency and lifetime by minimizing the weight load of structures. Therefore, the optimization of sandwich panels used in armor systems is considered an innovative field of study in engineering, both theoretically and practically. In this paper, the mechanical behavior of honeycomb sandwich panels consisting of 304 stainless steel surface layers and 304 stainless steel and Aluminum Alloy (AA 3003) cores against high-speed penetrator impact is investigated. Also, the effect of different core materials on the performance is emphasized.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Balpeteği sandviç paneller, hafiflik ve yüksek mukavemet dengesini sağlayan yenilikçi yapısal bileşenlerdir. Yüksek hızlı çarpma senaryolarında özellikle savunma, havacılık ve otomotiv

sektörlerinde kritik öneme sahiptirler [1-3]. Bu makale, 304 paslanmaz çelik yüzey tabakaları ve çekirdekler ile alüminyum çekirdekler arasındaki performans farklarını ortaya koymayı hedeflemektedir.

Literatür incelendiğinde, darbe yüzeyine yerleştirilecek malzemelerin özelliklerinin, sandviç panellerin balistik performansı üzerinde kritik bir rol oynadığı görülmektedir. Özellikle, mukavemet, sertlik ve kırılma tokluğu gibi mekanik parametreleri yüksek olan hafif malzemelerin kullanımı, çekirdek materyalden bağımsız olarak panelin darbe dayanımını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu tür malzemelerin eklenmesi, yapının enerji absorpsiyon kapasitesini ve darbe sonrası bütünlüğünü iyileştirerek, panellerin yüksek hızlı çarpma koşullarında performansını optimize etmektedir. Literatür bulguları, bu stratejinin yalnızca ağırlık avantajı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda panelin genel balistik direnç ve deformasyon kontrolünü de geliştirdiğini ortaya koymaktadır [4,5].

Alümina (Al_2O_3) seramikler, yüksek sertlik, aşınma direnci ve düşük yoğunluk gibi üstün mekanik özellikleri nedeniyle balistik koruma sistemlerinde sıkça tercih edilmektedir. Özellikle savunma sanayinde hafif, yüksek mukavemetli ve darbe dayanımı yüksek malzemelere duyulan ihtiyaç alümina seramiklerin kullanımını artırmıştır. Bu çalışmada maliyet ve ulaşılabilirlik anlamında büyük avantajları olan yüzey plakası olarak 304 paslanmaz çelik, çekirdek malzemesi olarak 304 Paslanmaz çelik ve alüminyum alaşım (AA 3008) ve yüzey kaplama malzemesi olarak da Alümina (Al_2O_3) seramik plaka tercih edilmiştir.

Balpeteği paneller, iki ince ve sert yüzey tabakası ile hafif bir çekirdek katmandan oluşur. Çekirdek katmanının petek (balpeteği) yapısı, darbe enerjisini yaymada ve sönmülemde etkilidir. Çekirdek malzemesi olarak alüminyum ve 304 paslanmaz çelik gibi malzemeler sıkça kullanılmaktadır.

Sandviç panellerin performans spektrumunu oluşturmak için önerilen protokol, bu yapıların karmaşık mekanik davranışlarını kapsamlı bir şekilde anlamayı ve optimize etmeyi hedeflemektedir.

Balpeteği çekirdeklerin yoğunluğu, çarpma sonrası enerji sönmüleme performansını doğrudan etkiler. Yüksek yoğunluklu çekirdekler, daha fazla sertlik sağlayarak penetrasyona karşı direnç gösterir. Buna karşılık, düşük yoğunluklu çekirdekler daha geniş yüzeyde deformasyon oluşturarak enerji dağıtımını artırır. Araştırmalar, yoğunluk gradyanı uygulamalarının, çekirdeğin farklı bölgelerinde enerjiyi daha verimli şekilde dağıtabileceğini göstermektedir [6]. Mikroyapısal özellikler deformasyon mekanizmalarının türünü belirler. Paslanmaz çelik çekirdeklerde, hücre duvarlarında

çatlak ve kırılmalar baskınken, alüminyum çekirdekler daha esnek yapısıyla hücrelerin burkulma ve katlanma modunda enerji absorbe eder. Mikroyapıdaki tanelerin boyutu ve yönelimi, deformasyon direncini etkileyen kritik faktörlerdir [7].

Yüksek hızlı çarpmalar için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri Sonlu Elemanlar Analizi (FEA)'dir. Bu analizlerde, çekirdek ve yüzey tabakalarının etkileşimleri simüle edilerek deformasyon modları ve enerji absorpsiyon mekanizmaları incelenir. Explicit dinamik analizler, kısa süreli ve yüksek şiddetli çarpmalar için tercih edilir [6].

Yüksek hızlı çarpma gibi karmaşık ve ani değişimlerin yaşandığı olaylarda, explicit sonlu elemanlar analizi (FEA), geçici (transient) ve yüksek hızdaki fenomenlerin simülasyonu için daha uygundur. Bu yöntemde zaman adımları çok küçük tutulur ve dinamik denklemler doğrudan çözülür. Çarpma sırasında malzemelerin deformasyonu, gerilme dağılımı ve enerji absorpsiyonu gibi kritik parametreleri çözümlemek için explicit analiz gereklidir [13].

Bu yöntem özellikle, yüksek oranda doğrusal olmayan malzeme davranışlarının (örneğin, plastik deformasyon ve kopma) ve büyük geometrik deformasyonların analiz edilmesinde tercih edilir. Ek olarak, hesaplama sürecinde, global matrislerin türetilmesine ihtiyaç duyulmadığı için çözüm daha kararlı ve hızlıdır [32].

Explicit dinamik analizler, hareket denklemlerinin doğrudan zaman integrasyonu yöntemiyle çözülmesini ifade eder. Bu yöntem, çarpışma, patlama, ve balistik test gibi çok kısa süreli olayların modellenmesinde kullanılır. Her bir zaman adımında, sistemin durumunu tanımlayan kuvvetler ve hızlar hesaplanır. Bu analizler, küçük zaman aralıklarında çözümleme yaparak, sistemdeki hızlı enerji aktarımını ve ani deformasyonları doğru bir şekilde tahmin edebilir. Sonuç olarak explicit yöntem, yüksek hızda çarpma durumlarının analizinde ani enerji aktarımını, gerilme dalgası yayılımını ve malzeme hasarını modellemek için daha uygundur. Implicit yöntem ise genellikle uzun süreli ya da düşük hızlı olaylarda enerji dengelemeleri açısından avantajlıdır [13].

Bu çalışmada 304 paslanmaz çelik yüzey tabakaları ile 304 paslanmaz çelik ve Alüminyum Alaşım (AA 3003) çekirdeklerden oluşan balpeteği sandviç panellerin yüksek hızlı penetratör çarpmasına karşı mekanik davranışları incelenmiştir. Gerçekleştirilen

çalışmalara ilişkin detaylar ilerleyen bölümlerde sunulmuştur.

Son yirmi yılda, yarı statik yüklemeler için monolitik yapıya göre yapısal avantaj gösteren sandviç paneller için bir dizi yeni çekirdek topolojisi ortaya çıkmıştır [4]. Bunlara metalik köpükler [8], piramidal ve dörtyüzlü düzenlemenin kafes malzemeleri [9], dokuma malzeme [10] ve yumurta kutusu [11] dâhildir. Metalik sandviç yapılar 2000'li yılların başında hafif ve çok işlevli özellikleri ile patlamaya karşı dirençleri için araştırılmıştır. Literatüre sunulan çalışmalardan birinde Zok vd. [3] metalik sandviç panellerin yapısal performansını karakterize etmek için bir protokol önermiştir. Yaklaşımın faydaları, piramidal kafes çekirdekli paneller için gösterilmiştir. Ölçümleri, mekanizma haritalarını, sonlu eleman simülasyonlarını ve optimizasyonu birleştirmiştir. Zhu vd. [18] çalışmalarında, çeşitli yükleme koşulları altında hücre malzemelerin çekirdeğine sahip sandviç yapıların davranışı hakkında bir inceleme sunmaktadır. Mikro yapıların türüne bağlı olarak, burada ele alınan hücre malzemeler arasında metal köpükler, petek ve prizmatik malzemeler ile kafes ve tekstil malzemeleri yer alır. Yükler, yarı statik sıkıştırma veya girinti, düşük hızlı darbe veya oldukça yoğun, yani balistik perforasyon, yüksek hızlı sıkıştırma ve patlama etkisi olabilir. Her tür yükleme koşulunda, plastik deformasyon modları ve mekanizmaları, arıza gelişimi ve enerji sönmüleme kabiliyetine odaklanılarak sandviç yapıların tepkisi gözden geçirilmiştir. Bu konuda uygulanan ana metodolojiler, yani deneysel araştırmalar, analitik modelleme ve sayısal simülasyonlar da özetlenmiştir. Imbalzano vd. [21] lokal darbe direnci uygulamaları için metalik yüzeyler arasında sınırlandırılmış kafes çekirdekli sandviç panellerin performanslarını, hıza bağlı etkileri dikkate alarak sayısal olarak incelemiştir. Li vd. [1] çalışmalarında burulma yüküne maruz kalan sandviç yapı için bir minimum ağırlık optimizasyon yöntemi geliştirmiştir. Bu makalede sunulan optimizasyon çalışması, minimum burulma rijitliği seviyesine ulaşması gereken sandviç yapıların ağırlığını azaltmayı amaçlamaktadır. Optimum tasarım sonuçları, verilen burulma sertliğine göre çekirdek ağırlığının tatmin edici ağırlık koşulunun tüm sandviç yapının ağırlığının %66,7'si olduğunu göstermektedir. Evans vd. [2], köpük hücre malzemeleri, panellerin, tüplerin ve kabukların çekirdekleri olarak yapılandırılmış periyodik hücrelere sahip malzemelerin öngörülen yetenekleriyle karşılaştırmıştır. Fleck ve Deshpande [12] yaptıkları çalışmada temel amaçlarının, suda

veya havada yüksek yüklemeye maruz kalan bir sandviç kirişin yapısal tepkisini karakterize etmek için analitik formüller geliştirmek olduğunu ifade etmişlerdir. Ashby vd. [8] çalışmalarında, metal köpüklerin yeni mekanik, fiziksel, termal ve akustik özellikleri, performansları, imalatları ve çeşitli endüstrilerde ağırlığa bağlı uygulamalarda kullanımları hakkında bilgi sağlamışlardır.

Petek sandviç paneller, hafiflik ile dayanıklılığı birleştiren yapıları sayesinde enerji emme performansı gerektiren uygulamalarda kritik bir çözüm sunar. Biyolojik esinli tasarımlar, hiyerarşik yapılar ve köpük takviyeleri gibi yenilikçi yaklaşımlar, bu panellerin gelecekte daha geniş bir yelpazede kullanılmasını sağlayacaktır. Performansı optimize etmek için geliştirilen protokoller ve yeni malzeme teknolojileri, özellikle savunma, uzay ve otomotiv sektörlerinde çığır açıcı gelişmelere olanak tanıyacaktır. Bu çalışmada da petek sandviç paneller üzerine bir çalışma yapılması ve mekanik davranışların analizi hedeflenmektedir.

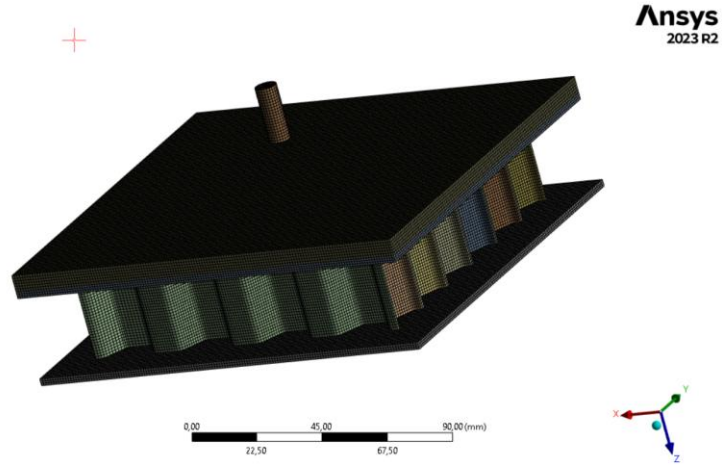
2. MALZEME VE YÖNTEMLER (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada, basit bir yapı olan ve literatürde darbe enerjisini plastik deformasyonla dağıtmak için enerji emici sistemlerde yaygın olarak kullanılan sandviç paneller, darbe yüzü Alümina seramik (Al_2O_3) kaplı olarak, künt uçlu penetratörün hızına bağlı etkiler göz önünde bulundurularak, bal peteği şeklindeki çekirdek tipinin 304 paslanmaz çelik ve Alüminyum alaşımdan (AA 3003) üretilmiş şekli sayısal olarak incelenecektir. Burada amaç farklı tipte malzemeden üretilen çekirdeklerin yüksek hızlı çarpma etkisi karşısında gösterdikleri tepkiyi tespit etmektir. İki farklı tipte sandviç panel modeli bulunmakta olup, çalışmada kullanılmak üzere verilen kodlar şu şekildedir:

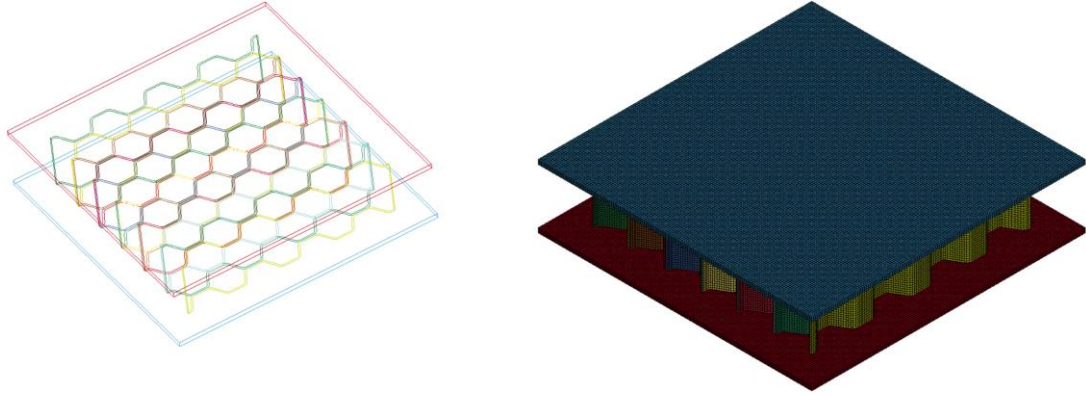
Al_2O_3 Kaplamalı, 304 paslanmaz çelik çekirdekli balpeteği sandviç panel: **SP304**

Al_2O_3 Kaplamalı, Alüminyum alaşım (AA 3003) çekirdekli balpeteği sandviç panel: **SP3003**

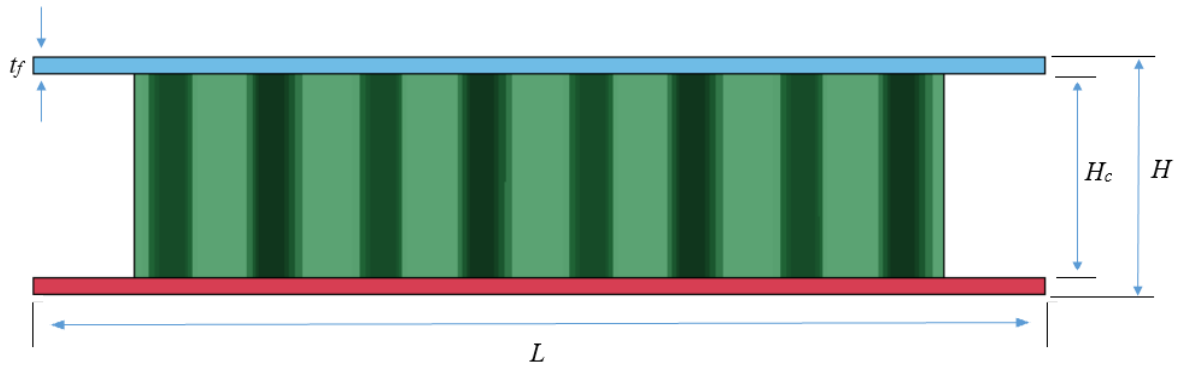
Sandviç paneller için modeller CATIA 3D Modelleme araçları kullanılarak oluşturulmuş ve ilgili modeller için penetrasyon simülasyonları 2023R2 Ansys Workbench LS-DYNA kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Numune boyutları simülasyon zaman maliyeti (eleman sayıları) ve literatürdeki boyutlar [14] göz önüne alınarak belirlenmiştir.



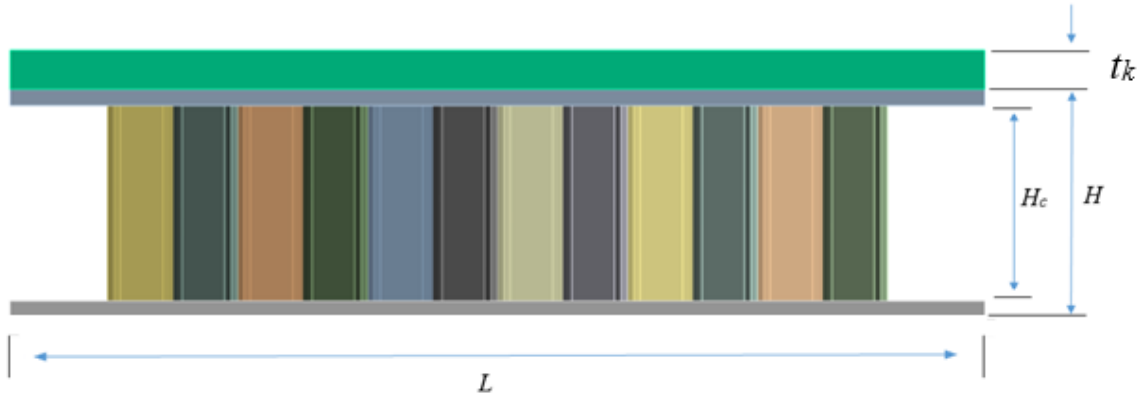
Şekil 1. LS-DYNA ortamında sandviç panel ve penetratör eleman yapısının görünümü
(View of sandwich panel and penetrator element structure in LS-DYNA environment)



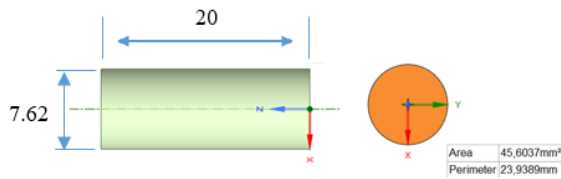
Şekil 2. a) Sandviç panelin çizgi modunda gösterimi b) Sandviç yapı elemanlarının izometrik görünümü (
a) Representation of sandwich panel in line mode b) Isometric view of sandwich structural elements)



Şekil 3. Sandviç panelin geometrik gösterimi (Geometric representation of the sandwich panel)



Şekil 4. Al₂O₃ Kaplı Sandviç Panel Gösterimi (Al₂O₃ Coated Sandwich Panel Illustration)



Şekil 5. Künt burunlu delici [14] (Blunt nose penetrator [14])

Tamamen özgün olarak belirlenen bal peteği yapısına sahip çekirdeğin yüksekliği (H_c) 30 mm, et kalınlığı (t_c) ise 1 mm olarak tasarlanmıştır. Ön ve arka levhaların kalınlığı (t_f) 2,5 mm, en x boy ölçüsü ise 150x150 mm olarak belirlenmiştir. Yüzey panelleri ve çekirdek et kalınlıkları belirlenirken literatürde kullanılan malzeme kalınlıkları [14] dikkate alınmış olup, çekirdek yapıyı oluşturan sinüzoidal bileşenler üretim kolaylığı (abkant kalıp büküm özellikleri vb.) göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Çarpma yüzeyine ilave edilen Al₂O₃ kaplamanın kalınlığı (t_k) 6 mm olarak seçilmiş ve testlerde bu kaplama da değerlendirilmiştir. Sandviç panel tüm kenarlarından sabitlenmiş olup, simülasyonda tüm kenarlara ait yüzeyler “fixed

support” olarak belirlenmiştir. Penetratörün sandviç panelde oluşturduğu hasarın incelenmesi için penetratör “rijit”, penetratörde yaşanan değişiklik sonucunda gerçekleşecek etkileşim için ise penetratör ‘flexible’ olarak seçilmiştir. Deforme olabilen sandviç plakanın kenarlarında serbestlik dereceleri kısıtlanmıştır, ilk adımda rijit/flexible mermi için sadece numuneye doğru hareket ($V_x = V_y = 0$; $V_z = V$) sağlanmıştır. Penetratörün çarpma hızı ile ilk hızı birbirine eşittir.

Çelik malzemeler için Johnson-Cook (J-C) malzeme modeli gerinim oranını yakalamak için seçilmiştir. 304 ve 4340 çeliklerinin mekanik özellikleri ve J-C malzeme parametreleri Tablo 1’de gösterilmiştir. LS-DYNA’da ilgili atamalar MAT_015 *MAT_JOHNSON_COOK kodu ile sağlanmıştır. Hem 4340 çeliği (delici) hem de 304 paslanmaz çelikleri (sandviç panel) ve alüminyum alaşımlı çekirdeğe sahip sandviç paneli tanımlamak için elastoplastik bir kurucu denklem kullanılmıştır. Johnson-Cook malzeme modeli, izotropik malzemeler için penetrasyon problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [13]. Modelde kullanılan parametre değerleri Tablo 1 ve 2’de sunulmuştur.

Tablo.1 304 paslanmaz çelik, 4340 çelik [14] ve AA 3003 [6] için malzeme modeli parametre değerleri
(Material model parameter values for 304 stainless steel, 4340 steel [14], and AA 3003 [6])

Parametre (Parameter)	304 paslanmaz çelik (304 stainless steel)	4340 çeliği (4340steel)	AA 3003 (AA 3003 aluminum alloy)
Young modülü E (GPa) (Young's modulus, E (GPa))	200	200	67.6
Yoğunluk, ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) (Density, ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$))	7800	7830	2680
Poisson oranı, μ (Poisson's ratio, μ)	0.3	0.29	0.3
Statik akma gerilmesi, A (MPa) (Static yield stress, A (MPa))	310	792	214
Şekil değiştirme sabiti, B (MPa) (Strain hardening coefficient, B (MPa))	1000	510	143
Specifik ısı, C_r ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) (Specific heat, C_r ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$))	440	477	893
Şekil değiştirme üsteli, n (Strain hardening exponent, n)	0.65	0.26	0.36
Erime sıcaklığı, T_m ($^{\circ}\text{C}$) (Melting temperature, T_m ($^{\circ}\text{C}$))	1673	1793	775
Referans şekil değiştirme hızı, $\dot{\epsilon}_0$ (s^{-1}) (Reference strain rate, $\dot{\epsilon}_0$ (s^{-1}))	1	1	1
Şekil değiştirme sabiti, C (Strain rate sensitivity coefficient, C)	0.07	0.014	0.02
Termal yumuşama üsteli, m (Thermal softening exponent, m)	1	1,03	1.7
Hasar sabiti, D_1 (Damage constant, D_1)	0.6	0.05	0.096
Hasar sabiti, D_2 (Damage constant, D_2)	0	3,44	0.049
Hasar sabiti, D_3 (Damage constant, D_3)	0	-2,12	-3.463
Hasar sabiti, D_4 (Damage constant, D_4)	0	0.002	0.016
Hasar sabiti, D_5 (Damage constant, D_5)	0	0.61	1.09

Tablo.2 Al_2O_3 için malzeme modeli parametre değerleri[15][16] (Material model parameter values for Al_2O_3 [15][16])

Parametre (Parameter)	Al_2O_3
Yoğunluk, ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) (Density, ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$))	3715
Kayma Modülü G [MPa] (Shear modulus, G [MPa])	152,400
Normalize gerilme parametresi a [-] (Normalized stress parameter, a [-])	0,93
Kırılma normalize gerilme parametresi b (Fracture normalized stress parameter, b)	0,31
Dayanım parametresi c [-] (Strength parameter, c [-])	0
Basınç genleşme parametreleri, m ve n [-] (Pressure expansion parameters, m and n [-])	0,6
Referans şekil değişim hızı EPS0 (Reference strain rate, EPS0)	1
Maksimum çekme gerilmesi dayanımı T [MPa] (Maximum tensile strength, T [MPa])	200
Maksimum normalize kırılma dayanımı SFMAX [-] (Maximum normalized fracture strength, SFMAX [-])	0,2
Hugoniot elastik limit HEL [MPa] (Hugoniot elastic limit HEL, [MPa])	19,000
Hugoniot elastik limit basıncı PHEL [MPa] (Hugoniot elastic limit pressure, PHEL [MPa])	1460
Enerji kaybının hidrostatik enerjiye dönüşmesiyle oluşan kırılma β [-] (Fracture due to conversion of energy dissipation into hydrostatic energy, β [-])	1
Kırılmaya karşı plastik gerilme parametresi $d1$ [-] (Plastic stress parameter for fracture, $d1$ [-])	0,005
Kırılmaya kadar plastik gerinim parametresi (üstel) $d2$ [-] (Plastic strain parameter until fracture (exponential), $d2$ [-])	1
İlk basınç katsayısı (hacim modülü) $k1$ [MPa] (First pressure coefficient (bulk modulus), $k1$ [MPa])	254,000
İkinci ve üçüncü basınç katsayıları, $k2$ ve $k3$ [MPa] (Second and third pressure coefficients, $k2$ and $k3$ [MPa])	0

Bu çalışmada, Alümina (Al_2O_3) seramiklerin balistik performansı, LS-DYNA'da Johnson-Holmquist-2 (JH-2) malzeme modeli kullanılarak simüle edilmiştir. JH-2 modeli, özellikle kırılma ve seramik malzemeler için geliştirilmiş bir plastisite ve hasar modelidir. Bu model, yüksek hızda çarpma durumlarında malzemenin davranışını simüle etmek için etkili olup, hasar birikimi ve kırılma mekanizmalarını dikkate alır. JH-2 modelinin özellikleri aşağıda sıralanmıştır [13]:

- **Hasar Birikimi:** Model, malzemenin maruz kaldığı gerilmeye bağlı olarak ilerleyen bir hasar birikim mekanizması içerir.
- **Plastisite ve Kırılma:** JH-2, malzemenin plastisite özelliklerini ve çarpma sırasında oluşan kırılma süreçlerini hesaplar.
- **Dinamik Gerilme-Eğilme İlişkisi:** Çarpma hızı ve yükleme koşullarına göre malzeme sertliğindeki değişimleri dikkate alır.

LS-DYNA'da, JH-2 modeli MAT_110 (*MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS) kartı kullanılarak tanımlanır. Bu parametreler arasında malzemenin başlangıç dayanımı, maksimum hasar seviyeleri ve kırılma enerjisi gibi veriler bulunur. Özellikle, çarpma simülasyonlarında Alümina'nın delici aşındırma ve şekil değiştirme etkisini artırmak için doğru parametrelerin kullanımı kritik önem taşır. İlgili kurucu model için girdi değerleri Tablo 2'de verilmiştir (Tablo 2).

Alümina seramikler, sandviç panelin ön yüzeyine entegre edilerek deliciye karşı bir bariyer görevi görür. Alümina'nın yüksek sertliği (15-20 GPa) ve aşınma direnci, delicinin aşınmasını ve deformasyonunu sağlar ve böylece delme derinliğini önemli ölçüde azaltır. Bu strateji, panelin genel balistik performansını artırmayı hedefler. Gerçekleştirilen simülasyonla ilgili detaylı olarak açıklanan yöntemler şunlardır:

i. Mesh Yapısı ve Eleman Tipleri: (i. Mesh Structure and Element Types:)

Dengeli hesaplama maliyeti ve doğruluk için, her panel için darbe/arka yüz, honeycomb çekirdek, düz uçlu mermi ve kaplama seramiği için Solid Element (Hexahedral), ELFORM 2 elemanlar kullanılarak modellenmiştir [14]. Eleman boyutları belirlenirken tüm bileşenler bazında eleman kaliteleri ve aspect ratio oranları dikkate alınarak mesh optimizasyon çalışması yapılmıştır. Yapılan bu çalışma neticesinde dengeli hesaplama maliyeti ve doğruluk

için en uygun olan eleman boyutları tercih edilmiştir. Eleman kalitesi maksimum 1 minimum da 0,82 olarak tespit edilmiş olup, ağırlıklı kısmı 0.98-0.96 düzeylerinde gözlemlenmiştir. Penetratör için Multizone method tercih edilmiş olup, linear element order belirlenmiştir. Eleman boyutları ortalama 1 mm-0.6 mm arasında tercih edilmiş ve diğer boyutlara göre daha doğru ve hızlı sonuç verdiği teyit edilmiştir. Kaplamalı modelde toplam 330.560 adet eleman ile mesh yapısı oluşturulmuştur. Ayrıca çözümün doğruluğu hourglass energy ve contact enerji grafikleri ile de teyit edilmiştir. Tüm enerji grafiklerinde doğruluğun sağlanması adına hourglass enerjinin, internal enerjinin %10'undan az olması kontrol edilmiştir.

Hexa Elemanlar: Panellerin düzlemsel ve çok bölgeli yapısından dolayı hexa (altı yüzlü) elemanlar tercih edilmiştir. Bu tür elemanlar, özellikle doğrusal olmayan analizlerde ve çarpma simülasyonlarında daha istikrarlı sonuçlar verir.

Eleman Boyutu: Simülasyon doğruluğunu artırmak amacıyla, mesh boyutu 1 mm ile 0,6 mm arasında değişen ince detaylara uygun şekilde oluşturulmuştur.

Çok Bölgeli Yöntem: Penetratörün künt uçlu yapısı nedeniyle, farklı bölgelerde farklı yoğunlukta mesh kullanılması gerekmiştir [13].

ii. Temas Tipleri ve Temas Koşulları: (ii. Contact Types and Contact Conditions:)

Literatürde çarpma sırasında kritik olan temas tipleri uygulanmıştır:

Penetratör ile Al_2O_3 Teması: “Yüzeyden Yüzeye Aşınan Temas” (Eroding Contact) türü kullanılmıştır. Bu temas tipi, malzemenin aşındığı ve elemanların arızalandığı durumlarda teması yeniden düzenlenmesine izin verir. LS-DYNA'da bu tip temas, çarpma sonrası materyal kopmasını simüle etmek için idealdir.

Bağlı Temas (Tied Contact): Yüzey tabakaları, çekirdek ve Al_2O_3 arasındaki temas için kullanılmıştır. Bu temas türü, temas düğümlerini birbirine bağlayarak bağıl hareketi sınırlar. Özellikle yüksek deformasyonlara rağmen temas yüzeylerinin birbirine sabit kalması gereken durumlarda etkilidir. Eroding Contact ve Tied Contact gibi farklı temas türleri, yüksek hızda çarpma ve deformasyon analizlerinde LS-

DYNA'nın sıkça kullandığı araçlardır. Bu yöntemler, eleman arızalarını ve malzeme kopmalarını simüle etmek için idealdir ve sayısal analizlerin doğruluğunu artırır [17].

Bu parametrelerin seçimi, çarpma simülasyonlarının gerçekçi sonuçlar vermesi için kritik öneme sahiptir. Balistik direnci artırmak için tasarım ve malzeme seçiminde bu simülasyonlardan elde edilen sonuçlar büyük rol oynar.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. 304 SS Çelik Çekirdekli ve AA 3003 Çekirdekli Sandviç Panel Darbe Sonuçları (3.1. Impact Results of Sandwich Panel with 304 SS Steel Core and AA 3003 Core)

Penetratör tipi Wang et.al.[14] çalışması referans alınarak, farklı çekirdek tiplerinin aynı penetratör

karşısında tepkisini tespit etmek amacıyla tercih edilmiştir. Hazırlanan test ortamında, künt burunlu penetratörler, sandviç panellere 428 m/s ile 828 m/s arasında değişen hızlarla ateşlenmiştir. Bu hızlar literatürde yapılan çalışmalarda [14] gerçekleştirilen atış hızları referans kabul edilerek, balistik limit hızın tespiti amacıyla seçilmiştir. Bu hızlar, balistik limit hızın altında olduğunda, mermiler paneli germiş ancak delme gerçekleşmeden panel içinde kalmıştır. Balistik limit hız, malzemenin delinme eşiğini temsil eder ve zırh performansı için kritik bir parametredir. Çalışmada iki farklı delici tipi analiz edilmiştir:

Penetratörün sandviç panelde oluşturduğu hasarın incelenmesi için penetratör “rijit”, penetratörde yaşanan değişiklik sonucunda gerçekleşecek etkileşim için ise penetratör flexible olarak seçilmiştir [14].

Tablo.3 Rigid/Flexible Mermi Karşılaştırması (Rigid/Flexible Projectile Comparison)

Kriter	Rigid Mermi	Flexible Mermi
Hesaplama Süresi	Daha hızlı	Daha yavaş
Fiziksel Gerçekçilik	Mermi deformasyonu göz ardı edilir	Mermi deformasyonu ve kırılması dikkate alınır
Zırh Davranışı	Zırh deformasyonuna odaklanır	Zırh ve mermi arasındaki çift taraflı etkileşimi inceler
Kullanım Durumu	Sert çekirdekli mühimmat (ör. tungsten)	Yumuşak çekirdekli mühimmat (ör. kurşun)
Zırha Etkisi	Enerji absorpsiyon kapasitesi değerlendirir	Zırh ve merminin karşılıklı etkilerini analiz eder

Rijit Penetratör (Rigid penetrator) : Yapısal deformasyona uğramadan çarpan penetratörler.

Deforme Olabilen Penetratör (Flexible penetrator): Çarpma sırasında şekil değiştiren penetratörler.

Bu modeller, LS-DYNA yazılımında Explicit Dynamics yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Sayısal modellerde, mesh kalitesinin kontrolü için hourglass enerjisinin toplam enerjinin %10'u ile sınırlı tutulması önemli bir kriterdir. Simülasyon sonuçları, enerji dengeleme kriterlerinin bu sınırlar içinde olduğunu ve modellerin doğruluğunu teyit etmiştir.

Temas ve Enerji Modellemesi olarak sürtünmesiz gövde etkileşim modeli kullanılmıştır. Wang ve diğerlerinin [14] çalışmalarına dayalı olarak benimsenen bu

model, çarpma anında sürtünmenin etkisini ihmal eder ve simülasyon çözümleri bu yaklaşıma göre elde edilmiştir. Enerji grafikleri, toplam enerji ve kum saati enerjisi arasında dengeli bir dağılım göstererek model doğruluğunu desteklemektedir.

3.2. Rijit Penetratör Darbe Sonuçları (Rigid Penetrator Impact Results)

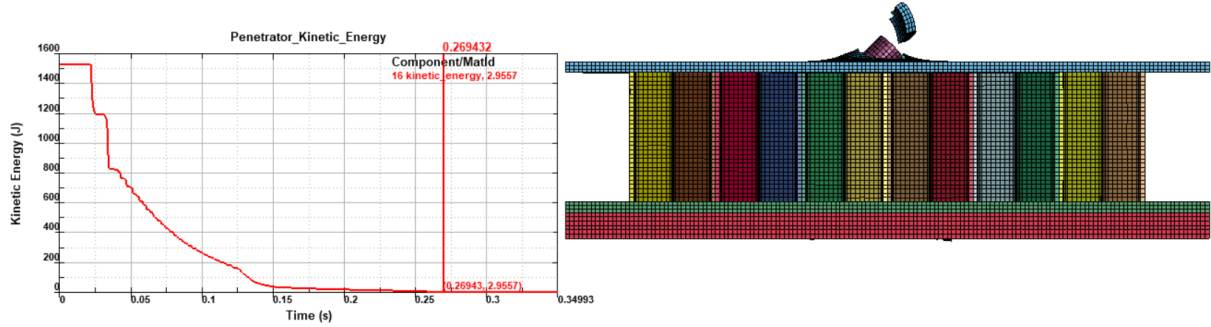
LS-DYNA ortamında, Johnson-Cook malzeme modeli kullanılarak eşdeğer plastik gerilme hesaplanmıştır. Johnson-Cook modeli, özellikle yüksek hızda çarpma analizlerinde, sıcaklık ve şekil değiştirme oranını dikkate alarak gerilme davranışlarını tahmin eden bir modeldir.

Şekil 6'dan görülebileceği gibi, penetratör sandviç panele ilk çarpmasından sonra kinetik enerjisi 1532 J'den yaklaşık 1175 J'e geriler. Yaklaşık olarak 357 J'lük enerjisini seramik

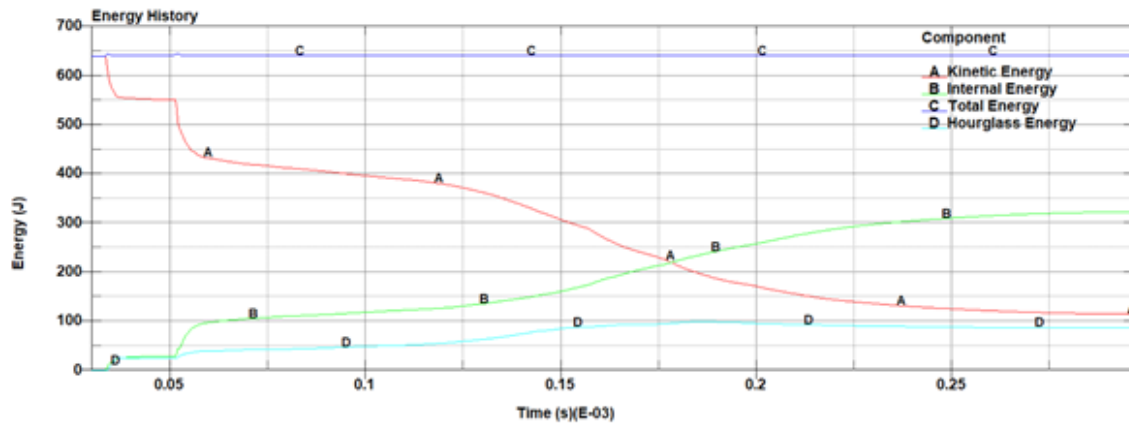
plakadan çıkana kadar kaybeder. Penetratör ön çelik yüzeye nüfuz ettikten sonra $t=0.04E-03$ sn'de yaklaşık 781 J'lük enerji ile çekirdek bölgesine girer. Rijit penetratör yaklaşık $t=0.12E-03$ sn'de 163 J kinetik enerji ile sandviç panelin arka yüzeyine çarpar ve arka yüzeyi perfore ederek taç yapraklanma yapar. Ancak enerjisinin tamamını bu aşamada

kaybederek panel içerisinde kalır. (Şekil 6). Bu analizle birlikte söz konusu konfigrasyona ait balistik limit hızı yaklaşık olarak $V_{bl}=658$ m/s olarak tespit edilmiştir.

Sonraki analiz SP3003 alüminyum alaşım çekirdeğe sahip model için yapılmış olup, sonuçları Şekil 7'te verilmiştir.



Şekil 6. Penetratör konumuna göre enerji/zaman grafikleri (Zaman (s) (E-03)) (Energy/time plots according to penetrator position (Time (s) (E-03)))



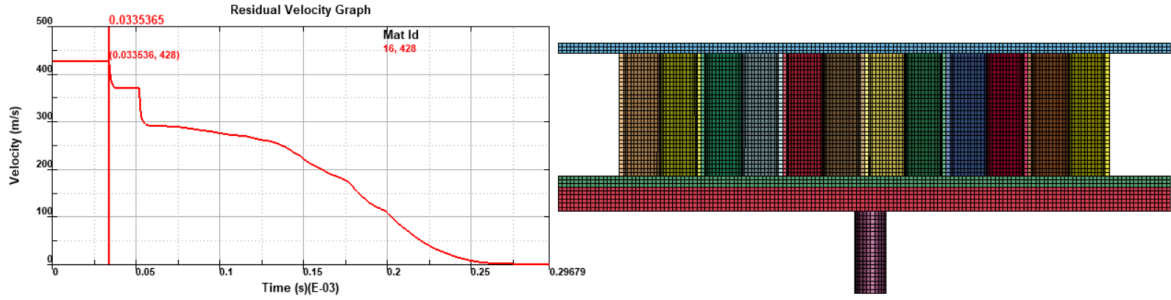
Şekil 7. SP3003 için sayısal olarak tahmin edilen enerji geçmişleri ($V_1 =428$ m/s, Rigid Penetrator)

(Numerically estimated energy histories for SP3003 ($V_1 =428$ m/s, Rigid Penetrator))

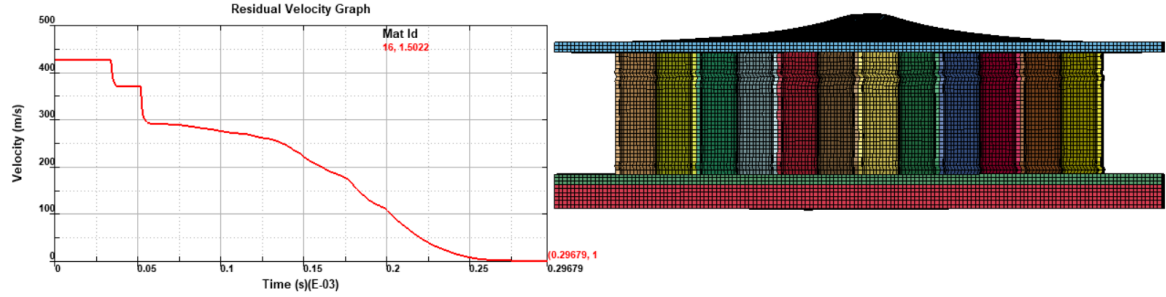
Şekil 8'den görülebileceği gibi, penetratör sandviç panele $t=0.03(E-03)$ sn'de çarpmakta, seramik bölgeyi tamamen geçtiğinde hızı yaklaşık olarak 370 m/s' ye düşmekte olup, çekirdek bölgeye girdiğinde hızı yaklaşık 289 m/s seviyesindedir. Yaklaşık $t=0.16(E-03)$ sn'de arka plakaya yaklaşık $v=187$ m/s hızla çarpmakta ancak tam perforasyon yapmadan arka yüzeyde şişkinlik oluşturarak durmaktadır (Şekil 9).

Penetratör ilk çarpmasından sonra kinetik enerjisi 640 J'den yaklaşık 480 J'e geriler. Yaklaşık olarak

160 J'lük enerjisini seramik plakadan çıkana kadar kaybeder. Penetratör ön çelik yüzeye nüfuz ettikten sonra $t=0.05E-03$ sn'de yaklaşık 306 J'lük enerji ile çekirdek bölgesine girer. Rijit penetratör yaklaşık $t=0.16E-03$ sn'de 142 J kinetik enerji ile sandviç panelin arka yüzeyine çarpar ve arka yüzeyde şişkinlik oluşturur ancak perfore edemeden durur. Bu analizle birlikte söz konusu konfigrasyona ait balistik limit hızı yaklaşık olarak $V_{bl}=450$ m/s olarak tespit edilmiştir.



Şekil 8. Penetrator Hız/Zaman Grafiği/Ön yüzeye çarpma (Penetrator Velocity/Time Graph/Front surface impact)

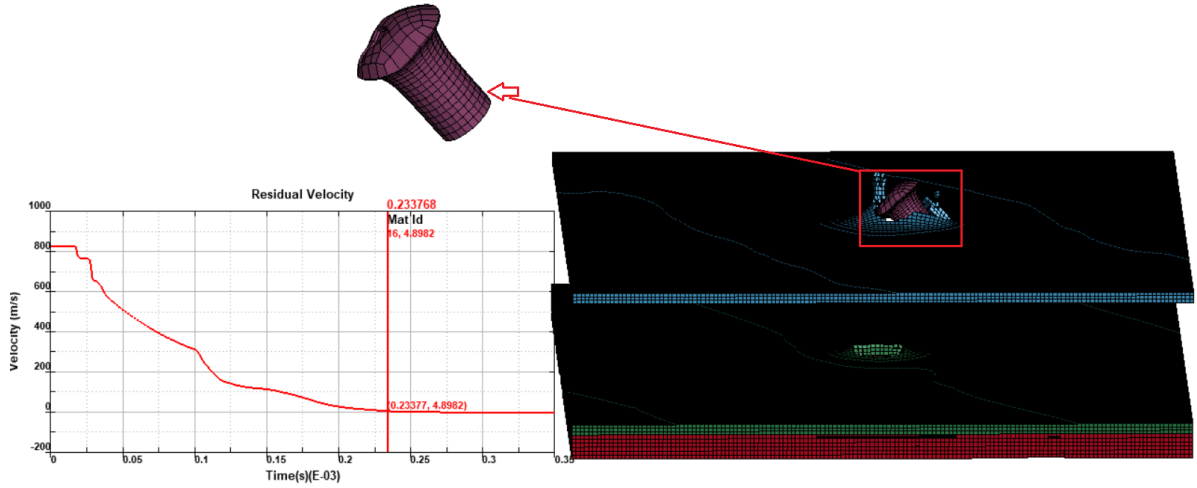


Şekil 9. Penetrator Hız/Zaman Grafiği/Arka yüzeye çarpma ve durma anı (Penetrator Velocity/Time Plot/Moment of impact on the back surface and stopping)

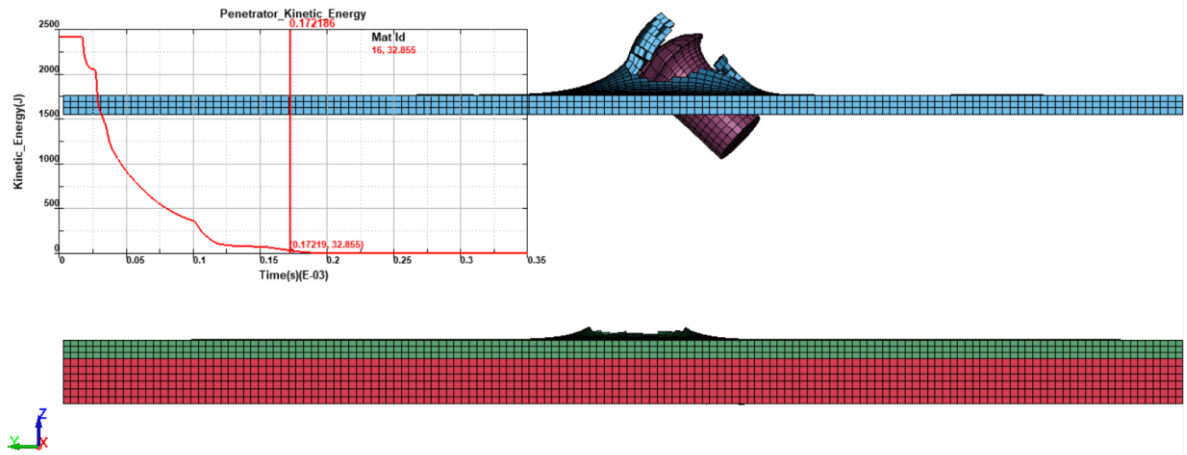
3.3. Deforme Olabilen Penetratör (Flexible) Darbe Sonuçları (Deformable Penetrator (Flexible) Impact Results)

Simülasyon, delicinin z yönünde hareket ederek başlangıç hızında sandviç panele çarpmasını modellemektedir. Delici, çarpma anında oluşan kuvvetler nedeniyle şekil değiştirir ve bu deformasyon, panel tarafından emilen enerji miktarını artırabilir. Delicinin esnek olması, kinetik enerjisinin bir kısmını deformasyon enerjisine dönüştürerek panele aktarılan enerjiyi azaltır. Böylece, sandviç panelin enerji emme kapasitesinde artış sağlanır ve penetrasyon derinliği düşer. Deforme olabilen penetratörler, rijit penetratörlere kıyasla daha az penetrasyon derinliğine neden olur. Bunun nedeni, darbe sırasında enerjinin bir kısmının delicinin iç deformasyonuna harcanmasıdır. Sandviç panel, delicinin deformasyonundan kaynaklanan ek enerji emilimi ile daha verimli bir şekilde darbe enerjisini absorbe eder. Bu durum, panelin balistik dayanımını artırır ve hasar seviyesini düşürür. SP304 sayısal analizinde, penetratör sandviç panele $t=0.017(E-03)$ sn'de 828 m/s hız ile çarpmakta, seramik bölgeyi tamamen geçtiğinde hızı yaklaşık olarak 751 m/s'ye düşmekte ve penetratör büyük oranda erozyona uğramış hale gelmektedir. Penetratör çekirdek

bölgeye girdiğinde hızı yaklaşık 615 m/s seviyesindedir. Yaklaşık $t=0.09(E-03)$ sn'de arka plakaya penetratör hem büyük oranda erozyona uğramış hem de dik yörüngesinden büyük ölçüde yataya kayacak şekilde sekme açısıyla yaklaşık $v=316$ m/s hızla çarpmaktadır. Penetratör yan dönerek arka paneli perfore etmiş ancak paneli tamamen terkedememiştir (Şekil 10). Penetratör ilk çarpmasından sonra kinetik enerjisi 2420 J'den yaklaşık 1628 J'e geriler. Yaklaşık olarak 792 J'lük enerjisini seramik plakadan çıkana kadar kaybeder aynı zamanda sert seramik bölgeden büyük deformasyona uğrayarak ayrılır. Penetratör ön çelik yüzeye nüfuz ettikten sonra $t=0.03E-03$ sn'de yaklaşık 1460 J'lük enerji ile çekirdek bölgesine girer. Flexible penetratör yaklaşık $t=0.10E-03$ sn'de 368 J kinetik enerji ile sandviç panelin arka yüzeyine bozulmuş şekliyle yaklaşık 80°'lik açıyla çarpar. Erozyona uğramış uç kısmının da etkisiyle sapma açısının arka yüzeye etkileşim esnasında giderek artması sonucu yan bölgesiyle arka sac yüzeyi perfore etmekte ancak perforasyon neticesinde tamamen enerjisini tüketerek panel içerisinde kalmaktadır (Şekil 11). Bu analizle birlikte söz konusu konfigürasyona ait balistik limit hızı yaklaşık olarak $V_{bl}=828$ m/s olarak tespit edilmiştir.



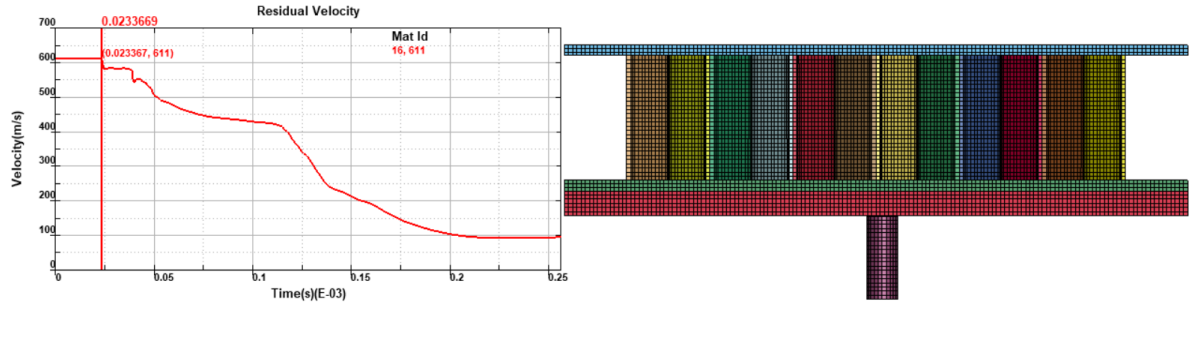
Şekil 10. Penetrator Hız/Zaman Grafiği/Arka yüzeye çarpma-durma (çekirdekler kaldırılarak görüntü alınmıştır) (Penetrator Velocity/Time Graphic / Rear surface impact-stop (image taken by removing the cores))



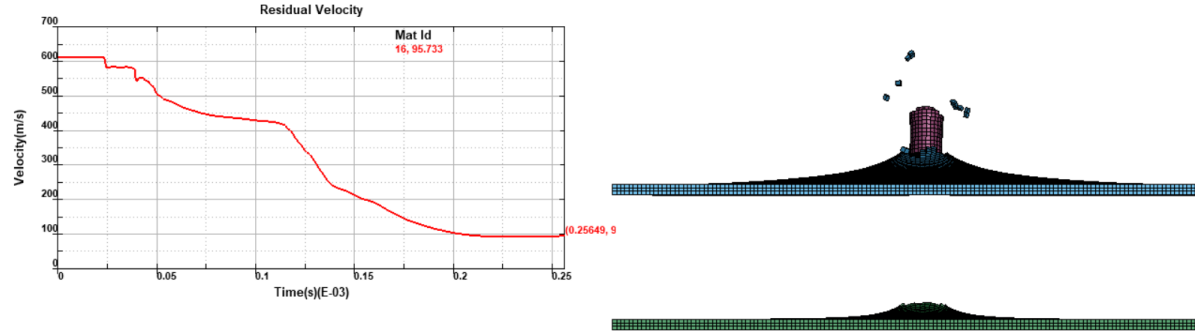
Şekil 11. Penetrator Enerji Grafiği- Arka yüzeye çarpma-durma (çekirdekler kaldırılarak görüntü alınmıştır) (Penetrator Energy Graph - Back surface impact-stop (image taken by removing the cores))

Şekil 12'den görülebileceği gibi, penetratör sandviç panele $t=0.02(E-03)$ sn'de 611 m/s hız ile çarpmakta, seramik bölgeyi tamamen geçtiğinde hızı yaklaşık olarak 549 m/s' ye düşmektedir, aynı zamanda penetratör büyük ölçüde erozyona uğramıştır. Penetratör çekirdek bölgeye girdiğinde hızı yaklaşık 503 m/s seviyesindedir. Yaklaşık $t=0.11(E-03)$ sn'de arka plakaya penetratör hem büyük oranda erozyona uğramış hem de dik

yörüngesinden büyük ölçüde yataya kayacak şekilde sekme açısıyla yaklaşık $v=417$ m/s hızla çarpmaktadır. Penetratör yan dönerek arka paneli perfore etmiş ve yaklaşık $v=90$ m/s hızla arka sac yüzeyi perfore ederek panelden ayrılmıştır (Şekil 13).



Şekil 12. Penetrator Hız/Zaman Grafiği (Penetrator Speed/Time Graph)

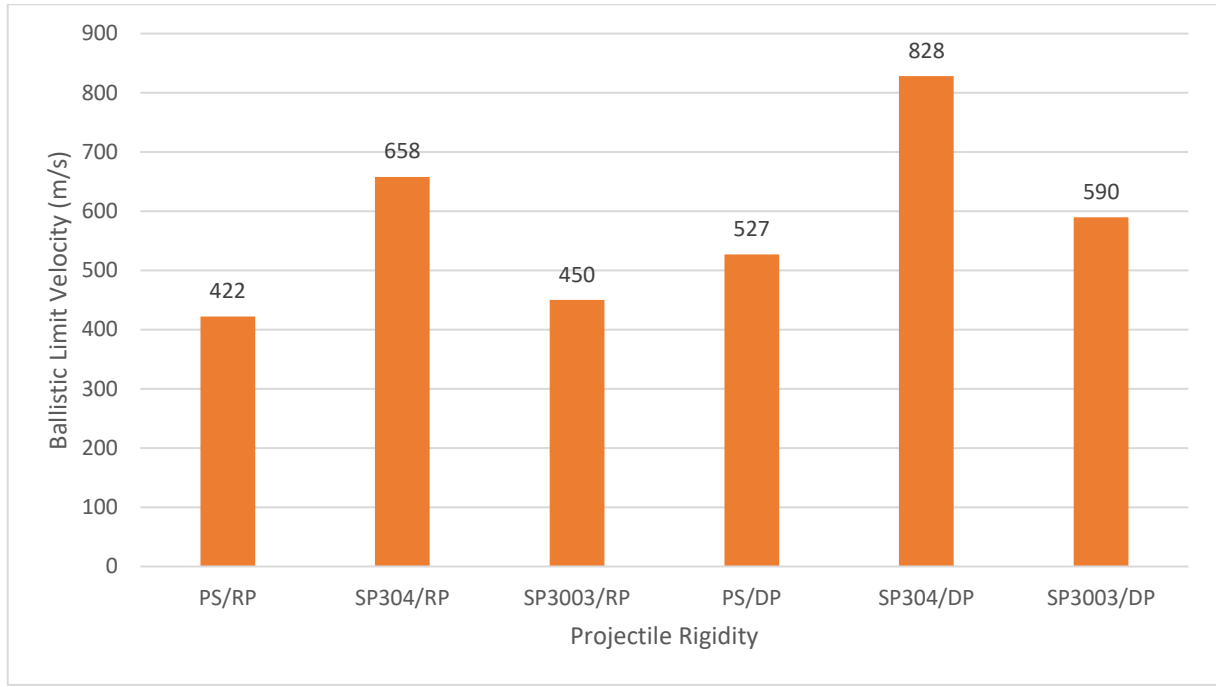


Şekil 13. Penetrator Hız/Zaman Grafiği (çekirdekler kaldırılarak görüntü alınmıştır) (Penetrator Speed/Time Graph (image taken by removing the cores))

Penetratör ilk çarpmasından sonra kinetik enerjisi 1312 J'den yaklaşık 1070 J'e geriler. Yaklaşık olarak 242 J'lük enerjisini seramik plakadan çıkana kadar kaybeder aynı zamanda sert seramik bölgeden büyük deformasyona uğrayarak ayrılır. Penetratör ön çelik yüzeye nüfuz ettikten sonra yaklaşık 600 J'lük enerji ile çekirdek bölgesine girer. Flexible penetratör yaklaşık 390 J kinetik enerji ile sandviç panelin arka yüzeyine bozulmuş şekliyle yaklaşık 75-80°'lik açıyla çarpar. Erozyona uğramış uç kısmının da etkisiyle sapma açısının arka yüzeyle etkileşim esnasında giderek artması sonucu yan bölgesiyle arka sac yüzeyi perfore etmiştir. Yaklaşık 27 J enerji ile paneli terk etmiştir. Bu analizle birlikte söz konusu konfigürasyona ait

balistik limit hızı yaklaşık olarak $V_{bl}=590$ m/s olarak tespit edilmiştir.

Elde edilen simülasyon verileri toplu olarak Şekil 14'de verilmiştir. Esnek penetratörlerin kullanıldığı durumlarda sandviç panelin darbe direncinin önemli ölçüde arttığını ve penetrasyon derinliğinin azaldığını göstermektedir. Deformasyon sırasında oluşan enerji kaybı, panelin koruyucu performansını olumlu yönde etkiler ve enerji soğurma mekanizmalarını destekler. Bu bulgular, farklı delici tiplerinin balistik performansa etkisini analiz etmek için kritik öneme sahiptir.



RP: Rigid projectile, DP: Deformable projectile

PS: Corrugated core sandwich panel with 15 mm polyurea coating (Wang et al., 2023)[14]

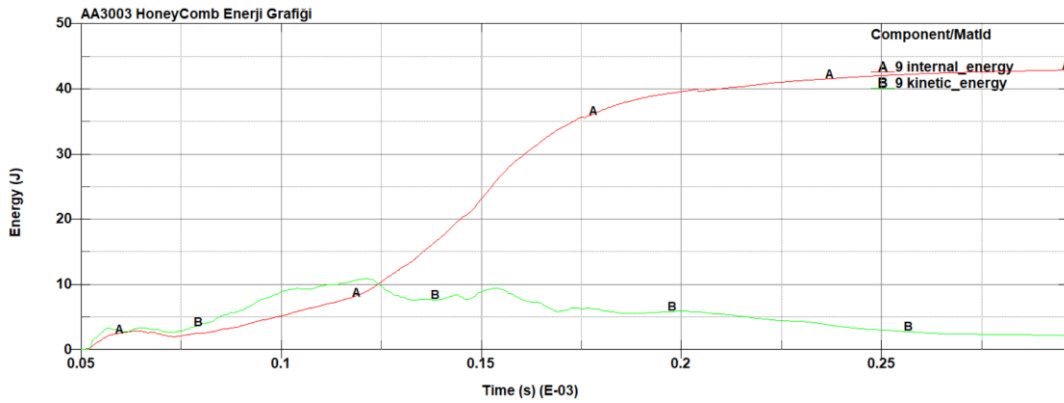
SP304: 304 paslanmaz çelik çekirdekli honeycomb sandviç panel,

SP3003: AA 3003 alüminyum alaşımlı çekirdekli honeycomb sandviç panel

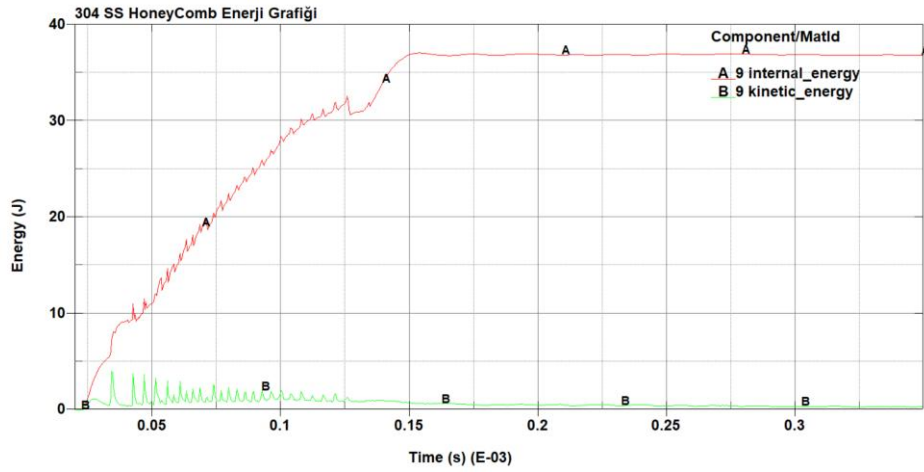
Şekil 14. Tüm konfigürasyonların balistik limit hızının karşılaştırılması (Comparison of ballistic limit speed of all configurations)

AA3003 Alüminyum Çekirdeğe Sahip Sandviç Panelde iç enerji (internal energy), zamanla sürekli artış göstermekte ve 0.25 ms'de 42 Joule'e ulaşmaktadır. Bu durum, AA3003 çekirdeğin çarpma sırasında enerji absorpsiyon kapasitesinin yüksek olduğunu ve bu enerjiyi plastik deformasyon yoluyla sönümlediğini göstermektedir. Kinetik enerji 11 Joule'den başlayıp hızla 3 Joule'e kadar düşmektedir. Bu da, çarpma sırasında kinetik enerjinin büyük kısmının malzeme tarafından absorbe edilerek şekil değiştirme enerjisine dönüştüğünü işaret eder.

Johnson-Cook malzeme modeline göre, AA3003 alüminyum alaşımı düşük akma gerilmesi ve daha düşük sertleşme katsayısına sahiptir. Bu, malzemenin daha kolay plastik deformasyona uğrayarak enerjiyi absorbe ettiğini açıklar. Akma gerilmesi ve sertleşme katsayısı nedeniyle malzeme, çarpma sırasında şekil değiştirme hızına duyarlıdır. Şekil 15, alüminyumun çarpma sırasında kinetik enerjiyi iç enerjiye etkin bir şekilde dönüştürdüğünü ve bu nedenle çarpma sonrası hasarın daha geniş bir alana yayıldığını göstermektedir.



Şekil 15. AA3003 Alüminyum çekirdeğin enerji-zaman grafiği (Energy-time graph of AA3003 Aluminum core)



Şekil 16. 304SS Alüminyum çekirdeğin enerji-zaman grafiği (Energy-time plot of 304SS Aluminum core)

Şekil 16.'ya göre 304 Paslanmaz Çelik Çekirdeğe Sahip Sandviç Panel iç enerji, 0.12 ms'de 31.3 Joule, 0.15 ms'de 36.8 Joule, ve 0.25 ms'de 37 Joule olarak sabitlenmektedir. Bu, paslanmaz çelik çekirdeğin enerji absorpsiyon kapasitesinin daha düşük olduğunu ancak deformasyona karşı daha dirençli olduğunu gösterir. Kinetik enerji, 4 Joule ile 0.9 Joule arasında dalgalanmaktadır. Bu durum, paslanmaz çeliğin enerjisi daha yavaş absorbe ettiğini ve daha yüksek elastik geri tepme (rebound) davranışı gösterdiğini ifade eder.

Johnson-Cook malzeme modeline göre, 304 paslanmaz çelik daha yüksek akma gerilmesine ve sertleşme katsayısına sahiptir. Bu, malzemenin çarpma sırasında daha fazla direndiğini ve plastik deformasyona daha zor geçtiğini açıklar. Sertleşme etkisi nedeniyle malzeme, çarpma sırasında kinetik enerjisi daha az iç enerjiye dönüştürmektedir. Bu, malzemenin yüksek dayanımını ve düşük deformasyon kabiliyetini ortaya koyar. Şekil değiştirme hızına duyarlılık çeliğin davranışında önemli bir rol oynar; bu durum, kinetik enerjinin dalgalanmasıyla uyumludur.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Alümina (Al_2O_3) seramik kaplamalı, 304 paslanmaz çelik balpeteği çekirdekli ve alüminyum alaşımlı (AA 3003) balpeteği çekirdekli sandviç panellerin, rijit ve flexible penetratör darbesi altındaki balistik performansları incelenmiştir. Yüksek hızlı penetrasyon simülasyonlarından elde edilen veriler, her iki konfigürasyonun enerji emme kapasitesi, darbe dayanımı ve penetrasyon davranışları açısından önemli farklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Penetratörlerin esnek yapısı nedeniyle yaşanan

deformasyon, enerji kayıpları ve çarpma sonrası davranışlar detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Rijit Penetratör Darbeleri için 304 paslanmaz Çelik Çekirdekli Panelin Performansı değerlendirildiğinde, penetratörün seramik tabakaya çarpması sonrası, kinetik enerjisi 1532 J'den 1175 J'e düşerek yaklaşık 357 J'lik bir enerji kaybı yaşamıştır. Bu enerji kaybı, seramiğin yüksek sertlik ve kırılma özelliği sayesinde penetratörün hızını ve etkinliğini azaltmıştır. Penetratör, ön çelik yüzeyi aştıktan sonra çekirdek bölgeye 781 J enerjiyle giriş yapmış ve $t=0.12E-03$ sn'de arka yüzeye 163 J enerji ile çarpmıştır. Panelin arka yüzeyinde taş yapraklanma meydana gelmiş, ancak penetratör enerjisini tamamen kaybederek panel içinde kalmıştır. Bu yapı için balistik limit hızı yaklaşık 658 m/s olarak tespit edilmiştir. Yüksek mukavemetli paslanmaz çelik çekirdek, darbe direncini artırarak panelin genel balistik performansını güçlendirmiştir.

Rijit Penetratör Darbeleri için alüminyum alaşım AA 3003 balpeteği çekirdekli panelin performansı değerlendirildiğinde penetratör, ilk çarpma sonrası enerjisini 640 J'den 480 J'e düşürmüştü ve seramik tabakadan çıkana kadar 160 J'lik bir enerji kaybı yaşamıştır. Çekirdek bölgesine girişte enerji seviyesi 306 J'ye düşmüş ve arka yüzeye 142 J ile çarpmıştır. Ancak bu durumda tam perforasyon gerçekleşmemiş, yalnızca panelin arka yüzeyinde bir şişkinlik oluşmuştur.

AA 3003 Alüminyum çekirdekli yapı için balistik limit hızı yaklaşık 450 m/s olarak belirlenmiştir. Alüminyum çekirdeğin hafif ve enerji emme kapasitesinin yüksek olması, darbe sonrası oluşan deformasyonu artırmış, ancak penetrasyon derinliğini sınırlamıştır.

Esnek Penetratör Darbeleri kapsamında 304 paslanmaz Çelik Çekirdekli Panelin Performansı değerlendirildiğinde penetratör, panele 828 m/s hızla çarptıktan sonra seramik tabakayı geçtiğinde hızı 751 m/s'ye düşmüş ve yaklaşık 792 J'lik bir enerji kaybı yaşamıştır. Çekirdek bölgesine girişte penetratör hızı 615 m/s seviyesine gerilemiş, bu sırada büyük ölçüde erozyona uğramıştır. Yaklaşık 316 m/s hızla ve 80°'lik bir açıyla arka plakaya çarparak sekmiş, fakat tamamen perforasyonu gerçekleştirilmeden panel içinde kalmıştır. Bu yapı için balistik limit hızı 828 m/s olarak tespit edilmiştir. Paslanmaz çelik çekirdeğin yüksek mukavemeti, penetratörün hızını yavaşlatmış ve perforasyonu sınırlandırmıştır.

Esnek Penetratör Darbeleri kapsamında AA 3003 Alüminyum Petek Çekirdekli Panelin Performansı değerlendirildiğinde esnek penetratör, panele 611 m/s hızla çarptıktan sonra seramik bölgeyi geçerken hızı 549 m/s'ye düşmüş ve yaklaşık 242 J enerji kaybı yaşamıştır. Çekirdek bölgesine 503 m/s hızla giriş yapan penetratör, erozyon nedeniyle sapma açısı kazanmış ve yaklaşık 75-80° açıyla arka plakayı perfore etmiştir. Paneli terk ederken penetratör hızı 27 m/s'ye kadar düşmüştür. Bu yapı için balistik limit hızı 590 m/s olarak ölçülmüştür. Alüminyum petek çekirdek, penetratörün enerjisini daha fazla dağıtarak deformasyonu artırmış, ancak perforasyonu tamamen engelleyememiştir.

Sonuç olarak, esnek penetratörlerin erozyon ve sapma eğilimleri, enerji dağılımını doğrudan etkileyerek arka plakada farklı deformasyonlar oluşturmuştur. 304 paslanmaz çelik çekirdek, penetratörü daha etkin bir şekilde yavaşlatmış, ancak tam perforasyonu önleyememiştir. Alüminyum çekirdek ise hafif yapısıyla enerji yayılımını artırmış, penetratör paneli düşük hızla terk etmiştir. Paslanmaz çelik çekirdekli panelin daha yüksek balistik limit hızı, sert çekirdeklerin darbe dayanımını artırma potansiyelini göstermektedir. Buna karşılık, Alüminyum çekirdekli panel hafifliği ile enerji emme kapasitesini yükseltmiş, ancak tam perforasyonu engelleme konusunda yetersiz kalmıştır. Esnek penetratörler, sert seramik yüzeyle etkileşim sonrası büyük ölçüde erozyona uğrayarak sapma açısını artırmış ve bu durum, arka plakanın perforasyonunda farklı mekanizmalar doğurmuştur. Paslanmaz çelik çekirdekli panel, daha yüksek mukavemet özellikleri sayesinde darbe enerjisini

daha iyi absorbe ederek penetratörün paneli delme yeteneğini sınırlandırmıştır. Buna karşılık, Alüminyum alaşımlı çekirdek hafifliği ile öne çıkmış, ancak deformasyon etkisine daha duyarlı olduğu için penetrasyon derinliğini tam olarak engelleyememiştir.

Rijit penetratör etkisinde paslanmaz çelik çekirdekli panelin balistik limit hızı (658 m/s), alüminyum alaşımlı çekirdekli panele (450 m/s) göre belirgin şekilde daha yüksektir. Bu sonuç, paslanmaz çelik çekirdeğin daha yüksek darbe dayanımı sunduğunu göstermektedir.

Bu bulgular, sandviç panellerin çekirdek malzemesinin balistik performans üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Hafiflik ve maliyet açısından avantaj sunan alüminyum alaşım (AA 3003) çekirdek, orta seviyede balistik koruma sağlarken, 304 paslanmaz çelik çekirdek daha üstün balistik direnç sunmuştur. Alümina seramik kaplamanın delinmeye karşı sağladığı katkı, her iki konfigürasyonda da belirgin olmuş, ancak çarpma sonrası enerji yönetimi, çekirdek malzemesine bağlı olarak değişmiştir.

Esnek penetratörlerin çarpma sonrası deformasyonu ve erozyonu, sandviç panellerin balistik performansında kritik bir rol oynamaktadır. 304 paslanmaz çelik çekirdekli paneller, daha yüksek balistik direnç sağlarken, Alüminyum çekirdekli paneller hafiflik avantajı sunarak enerji emme kapasitesini artırmıştır.

AA3003 Alüminyum Alaşım ve 304 paslanmaz çelik çekirdeklere ilişkin bir karşılaştırma yapacak olursak;

a. Enerji absorpsiyonu (Energy absorption):

- AA3003 alüminyum çekirdek daha fazla enerji absorbe etmektedir. Bu, malzemenin daha düşük akma gerilmesine ve yüksek deformasyon kapasitesine sahip olduğunu gösterir.

b. Kinetik enerji davranışı (Kinetic energy behavior):

- 304 paslanmaz çelik çekirdek ise enerjiyi daha az absorbe eder, çünkü yüksek dayanımı nedeniyle plastik deformasyona daha geç ulaşır.

- AA3003 kinetik enerjiyi hızlı bir şekilde iç enerjiye dönüştürürken, 304 paslanmaz çelik kinetik enerjiyi daha az sönmekle ve elastik geri tepme eğilimi göstermektedir.
- Alüminyumun daha düşük akma gerilmesi, sertleşme katsayısı ve şekil değiştirme hızına duyarlılık değerleri, şekil değiştirme hızı ve sıcaklığa daha duyarlı bir enerji absorpsiyon kapasitesine yol açar.
- Paslanmaz çeliğin daha yüksek akma gerilmesi ve sertleşme katsayısı değerleri, daha yüksek dayanım ve daha düşük deformasyon kapasitesini temsil eder.

AA3003 alüminyum çekirdeğe sahip sandviç paneller, çarpma sırasında enerjiyi daha etkili bir şekilde absorbe ederek darbe dayanımı açısından daha avantajlıdır. Öte yandan, 304 paslanmaz çelik çekirdek, deformasyona daha dirençli bir yapı sergileyerek yüksek dayanım gerektiren uygulamalar için uygundur. Johnson-Cook modeli, bu farklılıkları malzeme parametreleri üzerinden doğru bir şekilde açıklayabilir.

Son olarak, yapılan simülasyon çalışmasında önerilen her iki konfigürasyon, daha önce aynı penetratör tipiyle yüksek hızlı çarpma etkisinin incelendiği çalışmada sunulan oluklu sandviç panel tasarımına [14] kıyasla daha üstün bir performans sergilemiştir. Bu bulgular, gelecekte yapılacak deneysel çalışmalarla doğrulanabilir ve önerilen tasarımların etkisi, gerçek testlerle desteklenerek daha sağlam bir şekilde ortaya konulabilir.

Elde edilen simülasyon sonuçları ileri zırh tasarımlarında çekirdek ve kaplama malzemelerinin seçimine yönelik önemli ipuçları sunmaktadır. Gelecekteki tasarımlarda bu tür konfigürasyonların optimizasyonu için daha fazla sayısal ve deneysel çalışma yapılmasının yararlı olacağı düşünülmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

İsmail TÜRKDÖNMEZ: Bu çalışma yayınlanmamış Doktora tezinin bir bölümünü oluşturmakta olup, ilk yazar tez sahibidir. Deneysel çalışmanın planlanması, veri analizi ve deneysel çalışmanın yürütülmesinden sorumludur.

This study constitutes a part of an unpublished PhD dissertation, with the first author being the dissertation's author. The corresponding author is responsible for the planning of the experimental study, data analysis, and execution of the experiments.

Yusuf Tansel İÇ: Tez çalışması danışmanı olup, deney sonuçlarının analizi ve ilgili makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He was the thesis advisor, analyzed the experimental results, and wrote the related manuscript.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST) Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] X. Li, G. Li, C.H. Wang, M. You, "Minimum-weight sandwich structure optimum design subjected to torsional loading", *Applied Composite Materials*, 19 (2): 117–126, 2010
- [2] A.G. Evans, J.W. Hutchinson, N.A. Fleck, M.F. Ashby, "The topological design of multifunctional cellular metals", *Progress in Materials Science* 46, 309–327 : H.N.G., 2001
- [3] F.W. Zok, S.A. Waltner, Z. Wei, H.J. Rathbun, R.M. McMeeking and A.G. Evans, "A protocol for characterizing the structural performance of metallic sandwich panels: application to pyramidal truss cores" *Int. Journal of Solid and Structures*, 41 (22–23) , pp. 6249-6271, 2004
- [4] V. Madhu, K. Ramanjaneyulu, T. Bhat, N. Gupta, "An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact", *International Journal of Impact Engineering*, 32, 337-350, 2005
- [5] M. Vural, M. Erim, C. Bindal, S. Zeytin, A. Ucisik, "Traumatological and Ballistic Aspects of Alumina Ceramics", *Key Engineering Materials*, 240-242, 623 – 628, 2002

- [6] A.U. Haq, S.K.R. Narala, , “Dynamic response of honeycomb cored sandwich panels under high velocity impact: A numerical study”, *Materials Today: Proceedings*, Article in Press
- [7] Y.Yao, J. Waters, A. Shneidman, J. Cui, X. Wang, N. Mandsberg, S. Li, A. Balazs, J. Aizenberg, “Multiresponsive polymeric microstructures with encoded predetermined and self-regulated deformability”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115, 12950 – 12955, 2018
- [8] M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, H. Wadley, “*Metal Foams: A Design Guide*”, Butterworth Heinemann, London, 2000
- [9] G. Sun, D. Chen, H. Wang, P. Hazell, Q. Li, “High-velocity impact behaviour of aluminium honeycomb sandwich panels with different structural configurations”, *International Journal of Impact Engineering*, 2018
- [10] N. Ha, G. Lu, X. Xiang, “Energy absorption of a bio-inspired honeycomb sandwich panel”, *Journal of Materials Science*, 54, 6286-6300, 2019
- [11] H. Tan, Z. He, E. Li, X. Tan, A. Cheng, Q. Li, “Energy absorption characteristics of three-layered sandwich panels with graded re-entrant hierarchical honeycombs cores”, *Aerospace Science and Technology*, 2020
- [12] N.A. Fleck, , V.S. Deshpande, “The resistance of clamped sandwich beams to shock loading”, *Journal of Applied Mechanics* 71(3), 386–401, 2004
- [13] Livermore Software Technology Corporation (Lstc), *Ls-Dyna® Keyword User's Manual Volume II Material Models*, LS-DYNA R13, Michigan, 2014
- [14] X. Wang, Z. Yue, X. Xu, Z. Zhao, H. Ji, M. Zhu, P. Wan, Q. Zhang, , T.J. Lu , "Ballistic impact response of elastomer-retrofitted corrugated core sandwich panels", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 175, 104545, 2023
- [15] R. Scazzosi et al., “Experimental and numerical evaluation of the perforation resistance of multi-layered alumina/aramid fiber ballistic shield impacted by an armor piercing projectile”, *Composites Part B: Engineering*, Volume 230, 109488, ISSN 1359-8368, 2022
- [16] H. A. Abou-Elela et al., “Numerical Investigation of Projectile Penetration into Ceramic/Steel Targets”, *Conference Paper in the International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering*, May 2010
- [17] M. M. Shokrieh,, G. H. Javadpour, "Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armour," *Composite Structures*, Vol. 82 No.2, pp. 269-276, 2008
- [18] F. Zhu, G. Lu, D. Ruan, Z. Wang, "Plastic deformation, failure and energy absorption of sandwich structures with metallic cellular cores", *International Journal of Protective Structures*, 1 (4): 507–541, 2010
- [19] T. Bitzer, “Introduction: History”, in *Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*, 1st ed. Springer-Science+Business Media, pp. 1–3, 1997
- [20] H.J. Rathbun, Z. Wei, M.Y. He, F.W. Zok, A.G. Evans, D.J. Syceck, H.N.G. Wadley, “Measurements and simulations of the performance of metallic sandwich structures with a near optimal tetrahedral truss core”, *Journal of Applied Mechanics*, 2004
- [21] G. Imbalzano, P. Tran, T.D. Ngo, P.V.S. Lee, "Three-dimensional modelling of auxetic sandwich panels for localised impact resistance", *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 19 (3): 291–316, 2017
- [22] M. Khan, M. Iqbal, V. Bratov, N. Morozov, N. Gupta, “An investigation of the ballistic performance of independent ceramic target”, *Thin-walled Structures*, 154, 106784, 2020
- [23] J. Liu, G. Wang, Z. Lei, “Comparisons on the Local Impact Response of Sandwich Panels with In-Plane and Out-Of-Plane Honeycomb Cores. Sustainability”, 2023
- [24] A. Ferreira, B. Buitrago, C. Santiuste, S. Sanchez-Saez, E. Barbero, C. Navarro, “Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact”, *Composite Structures*, 92, 2090-2096, 2010
- [25] Y. Yasui, “Dynamic axial crushing of multi-layer honeycomb panels and impact tensile behavior of the component members”, *International Journal of Impact Engineering*, 24, 659-671, 2000

- [26] F. Roudbeneh, G. Liaghat, H. Sabouri, H. Hadavinia, "High-velocity impact loading in honeycomb sandwich panels reinforced with polymer foam: a numerical approach study" *Iranian Polymer Journal*, 29, 707-721, 2020
- [27] M. Mahmoudabadi, M. Sadighi, "Experimental investigation on the energy absorption characteristics of honeycomb sandwich panels under quasi-static punch loading", *Aerospace Science and Technology*, 2019
- [28] L. Vargas-Gonzalez, R.F. Speyer, J. Campbell, "Flexural strength, fracture toughness, and hardness of silicon carbide and boron carbide armour ceramics", *International Journal of Applied Ceramic Technology*, Vol. 7 No. 5, pp. 643-651, 2010
- [29] D.L. Orphal, R.R. Franzen, A.C. Charters, T.L. Menna, A.J. Piekutowski, "Penetration of confined boron carbide targets by tungsten long rods at impact velocities from 1.5 to 5.0 km/s", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 19 No.1, pp. 15-29, 1997
- [30] R. Scazzosi, M. Giglio, A. Manes, "FE coupled to SPH numerical model for the simulation of high-velocity impact on ceramic based ballistic shields", *Ceramics International*, 46, 23760-23772, 2020
- [31] F. Grace, N. Rupert, "Analysis of long rods impacting ceramic targets at high velocity", *International Journal of Impact Engineering*, 20, 281-292, 1997
- [32] T. Belytschko, W. K. Liu, B. Moran, K. Elkhodary, "Nonlinear finite elements for continua and structures", John Wiley & sons, 2nd edition 2014