



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makale

Metal Esaslı Sandviç Kompozitlerin Balistik Performansının İncelenmesi

 Erdal CAMCI ^{a,*},  Fehim FINDIK ^b,  Özgecan BARLAY ERGÜ ^c

^a Motorlu Taşıtlar ve Ulaştırma Bölümü Tek. Bölümü, Arifiye MYO, SUBÜ, Sakarya, TÜRKİYE

^b Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, SUBÜ, Sakarya, TÜRKİYE

^c Kimya Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: erdalcamci@subu.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.619423

ÖZET

Mermi gibi hızlı parçacıkların, karşısında ki bir yapıyı delip geçmesini önlemeye yönelik çalışmalar, ilk çağlardan beri insanlık için süregelen uğraşı olmuştur. Mermi ve delici parçalara karşı zırh tasarımı çalışmaları ilgi odağı olmaya devam etmektedir. Bu amaçla yüzlerce çalışmada onlarca malzeme denenmiştir. Çeşitli yapılar, birçok geometrik varyasyonlar ve formlarda tasarlanmakta, test ortamlarında balistik davranışları ölçülmektedir. Levhalı tasarımlar ağırlıklı olarak alüminyum, seramik ve zırh çeliği levhalarla oluşturulmuşlardır. Ön ve arka destek katmanları olarak bu malzemeler kullanılmıştır. Bazı çalışmalarda, polietilen, fiber, kevlar kumaş gibi malzemelerle bileşik ve kompozit yapılar meydana getirilmiştir. Kompozit yapıların bazılarında, mermi ve delici parçacık yönünü değiştirebilecek farklı geometrik yapılar tasarlanmıştır. Bu sert metal malzemeli yapı, kumaş içine alınarak kolay hareket ve taşınabilirlik ihtiyacı karşılanmaya çalışılmıştır. Bazı çalışmalarda seçilen metal levha malzeme, çeşitli kalınlık ve sıralamalarla test edilmiş, balistik performansları ve darbe etkisine karşı dayanım özellikleri tespit edilmiştir. Bu derleme çalışmasında son yıllarda yapılan çalışmaların bir kısmının özetleri sunulmakta, gelecekte yapılabilecek çalışmalara bir hedef ve perspektif oluşturulmak istenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Zırh Çelikleri, Mermi-Mühimmat, Balistik Performans, Fiber-Metal, Lamine, Polimer Matris Kompozitler, Darbe Davranışı, Balistik Panel.

Investigation of Ballistic Performance of Metal Based Sandwich Composites

ABSTRACT

Fast particles like bullets are trying to pierce the structures in front of it. Studies to prevent this effect have been an ongoing effort of humanity since the early ages. Armor design studies against bullets and piercing pieces continue to be the focus of attention. For this purpose, tens of materials have been tried in hundreds of studies. Various structures are designed in many geometric variations and forms, and ballistic behavior is measured in test environments. Plate designs are predominantly formed with aluminum, ceramic and armor steel plates. These materials are used as the front and back support layers.

Geliş: 12/09/2019, Düzeltme: 26/02/2020, Kabul: 06/03/2020

This hard metal material structure has been tried to meet the need for easy movement and portability by including it in the fabric. In some studies, selected metal sheet materials have been tested with various thicknesses and sequences, ballistic performances have been determined, and impact resistance properties have been determined. In this review article, summaries of some of the studies conducted in recent years are presented, and it is aimed to create a target and perspective for future studies.

Key Words: Armor Cuttings, Bullet-Ammunition, Ballistic Performance, Fiber-Metal, Laminated, Polymer-Matrix Composites, Impact Behavior, Ballistic Panel

I.GİRİŞ

İnsanlık, tarihi boyunca korunma ihtiyacı içinde olmuştur. Gerek günlük hayatında gerekse savaş durumlarında, bu ihtiyacının bir sonucu olarak daha iyiyi keşfetmek için sürekli çalışma içinde olmuştur. Bunun için taş ve sopaların kullanımı ile başlayan silahları geliştirmiştir. Silahlanmanın yayılması silah tehdidine karşı korunma ihtiyacını meydana getirmiştir. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda insanoğlu kişisel koruyucu kalkan ve zırhlar kullanmak durumunda kalmıştır. Eski zamanlarda sert cisimlerle savaşan insanlar, yine sert ve dayanıklı cisimlerle kendisini korumuştur. Tarih boyunca savaşlar geçirmiş ve gelişen teknoloji ile birlikte ürettiği yeni silah ve zırh donanımları kullanmıştır. Hızla gelişen silah teknolojisi barutun ve ateşli silahların icadıyla yeni bir boyut kazanmıştır. Silahların ağırlığı azalıp, boyutları küçülürken etki ve menzilleri artmıştır. Buna paralel olarak gerek bina ve araç gerekse kişisel koruyucu zırhlarında yüksek başarı ve düşük yoğunluk hedefi kaçınılmaz olmuştur ve tüm bu gelişmeler balistik biliminin ortaya çıkmasını sağlamıştır [1].

Bu çalışmada, vücut ve zırh koruma sistemlerinde ağırlıktan tasarruf edilmekle birlikte, hızlı deformasyon özelliklerinde yapılan iyileştirmeler özetlenmiştir. Hangi yapı ve üretim teknikleri ile ne kadar koruma sağlanabileceği değerlendirilmiştir. Gelecekte balistik kumaşlar, seramikler ve lamine kompozitler, modern vücut zırh tasarımlarında kullanılan önde gelen malzemeler arasındadır ve nano-parçacık ve doğal elyafla dolu kompozitler yeni nesil vücut zırh sistemleri için aday malzemelerdir. Karbon nanotüp (KNT) lerin kullanım ve araştırmalarında henüz başlangıç aşamaları yaşanmaktadır. Malzemelerde balistik özelliklerin iyileştirilmesine yönelik yapılan her çalışma zırh üretiminde bu malzemelerin yer bulması anlamına gelmektedir. Yani zırh teknolojilerinin hafifletilmesi ile kişisel korunma için daha uygun hale getirilmesi hedeflenmektedir [2].

Modern askeri operasyonlar, teknoloji güdümlü savaş taktikleri ve şu andaki sokak silahları ve mühimmatlar, hasarlara dayanıklı, esnek, hafif ve büyük enerji emilim kapasitesine sahip gelişmiş balistik koruma vücut zırh sistemlerinin geliştirilmesini gerektirmektedir. Yeni talepleri karşılamak için son yirmi yılda, vücut zırhı materyallerinin (doğadan türetilen veya esinlenenler de dâhil olmak üzere) yeni konseptleri ve tasarımları ile ilgili bir dizi çalışma yapılmıştır. Balistik kumaşlar, seramikler ve lamine kompozitler, modern vücut zırh tasarımlarında kullanılan önde gelen malzemeler arasındadır ve nano-parçacık ve doğal elyafla dolu kompozitler yeni nesil vücut zırh sistemleri için aday malzemelerdir.[2]Savunma sistemlerinde balistik tehditlere karşı hafif zırh kullanılması, enerji tasarrufu ve hareketliliğin artması açısından çok önemlidir [3].

Son yıllarda ateşli patlayıcı ve mermi kullanımı arttıkça, sivil ve askeri hedeflerin korunmasıyla ilgili yapıların optimize edilmesi araştırılması da artmıştır. Zırh kalkanları normalde tekli yüksek mukavemetli plakalardır. Bununla birlikte çoklu plakalı zırh konfigürasyonları kullanılmaktadır. Bunun nedeni üretilen zırh malzemelerinin tasarım gerektirmelerine uymayan kalınlık ve

geometrilerde olmamasıdır. Çoklu plakalı zırhların balistik davranışları üzerine birçok araştırma yapılmış olmasına rağmen tek levhali zırhlar için yapılmış araştırmalara göre daha az ve sınırlıdır. Dahası, son araştırmalarda belirtildiği gibi, çoklu levhaların araştırmaları hala devam etmektedir. Çünkü hala niteliksel bir hedef çıktıya ulaşan araştırma bulunmamaktadır [4].

Savaş alanlarının vazgeçilmez unsurlarından birisi olan zırh, kullanım açısından tarihin ilk savaşlarından beri önemini giderek artıran bir savunma aracı olmuştur. İnsanlık tarihi boyunca, silahla tanışılan zamanlarla paralel olarak silahtan korunma konusunda da araştırmalar yapılmış, böylece modern zırh tasarımı alanında hızlı adımlar atılmıştır. Özellikle askeri amaçlarla kullanılan zırh sistemleri modern silahlara karşı koruma sağlayabilecek şekilde tasarlanmak zorundadır. Bu nedenle, ele alınan zırhın yapısal olarak belirli mühimmatın çarpmasından kaynaklanan yükler altında işlevini etkin olarak yerine getirip getirmediği, yaygın bir araştırma konusudur [5].

Son on yılda, personel, taşıt, helikopter ve yapısal uygulamalar için hafif zırh sistemlerinin geliştirilmesi ve balistik özellikleri ve performanslarının artırımı, için yoğun çalışmalar yapılmıştır. İleri seramikler, en önemli modern zırh sistemlerinin bileşenleridir. Zırh sistemlerinin bir bileşeni olarak, gelişmiş seramikler balistik çarpma enerji yayılımı yoluyla mermilerin hasarlarının üstesinden gelmesine yardımcı olur. Seramik ve metal zırhlarda balistik koruma mekanizmaları önemli ölçüde farklıdır [6].

II. MALZEMELER

A. LAMİNE KOMPOZİTLER VE ENTEGRE ZIRHLAR

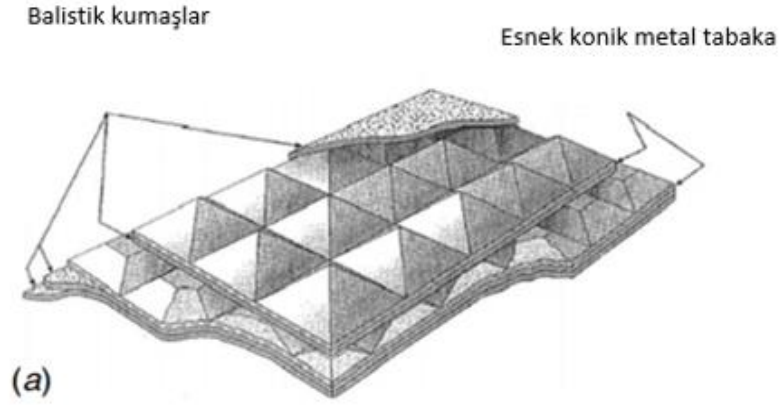
Lamine kompozitler hafif vücut zırhı tasarımı için optimal bir çözüm sağlar. Seramik partikül ve epoksi kompozit katmanlarından oluşan kompozit zırh sistemi gibi zırh tasarımlarının, sağlam seramik levhaların ağırlık, balistik limit ve esneklik açısından öne çıkan avantajları tespit edilmiştir. Geleneksel mühendislik malzemeleri ile kompozitler arasında önemli bir fark, anti-balistik malzemelerin performansı ile önemli ilişkili, iki yönlü olan deformasyon ve enerji emilimi özelliklerinin varlığıdır. Farklı kompozit malzeme sistemlerinin darbe davranışı ve enerji emilim özelliklerini açığa çıkarmaya yönelik çeşitli çalışmalar yakın zamanlarda gerçekleştirilmiştir. Seramik ön katman ve metalik veya kompozit destek tabakası içeren lamine kompozit zırhlar, aynı balistik tehdit için çelik ile karşılaştırıldığında, ağırlıktan tasarruf etme konusunda önemli bir potansiyele sahiptir [3].

Yapılan diğer bir çalışmada [7], lamine kompozitler kullanılmışlardır. Burada Al₂O₃/Al₂O₂₄ (alüminyum/alümina) lamine kompozitlerin 7,62x51 mm mermiye karşı çarpma davranışı incelenmiştir. Dahası, kopma yüzeylerinin ve deformasyon modlarının taramalı elektron görüntülü (SEM) mikroskobu ile araştırılmıştır.

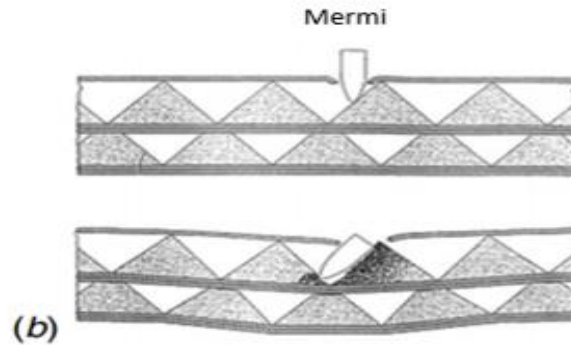
B. FİBER METAL LAMİNATLAR (FML)

Son yıllarda kompozit malzemelerin uygulanması çeşitli yapılarda giderek daha popüler hale gelmiştir. Özellikle havacılık yapılarında, kompozitler, yüksek özgül dayanım ve yüksek yorulma direncinin avantajları nedeniyle geleneksel malzemelerin yerine tercih edilmektedir. Malzeme özelliklerini

iyileştirmek için gerekenler, ince metal tabakalardan ve fiber takviyeli yapıştırıcılardan oluşturulan hibrit malzemelerle sonuçlanmıştır. Fiber-Metal Laminatlar (FML) alternatif olarak istiflenmiş metal ve elyaf takviyeli kompozit tabakalardan oluşur, böylece elyaf takviyeli kompozit malzemelerle ilişkili üstün yorulma ve kırılma dayanım özellikleri birçok metal tarafından sunulan üstün plastik davranış ve dayanım ile birleştirilebilir. FML'ler, hibrid kompozit ailesindedir. Fiber takviyeli plastik tabaka ve sandviç metal tabakaların birleşiminden oluşan bir yapıdır



Şekil 1a) Vücut zırhının bileşik tasarımı [2]



Şekil 1 b) Merminin ilk konumu ve yönünü değiştirmesi [2]

Hâlihazırda kullanılan metal; alüminyum, magnezyum ya da titanyumdur. Elyaf takviyeli tabaka ise, cam takviyeli, karbon takviyeli ya da kevlar takviyeli kompozitlerdir. 1950 yılında, Hollanda'nın Fokker Aerostructures, bu gibi bağlanmış lamine yapıların, tekli malzemelere göre hızlı yorulma çatlağı oluşumunu başarılı bir şekilde önlediğini bulmuştur. İkinci Dünya Savaşı'nın hemen öncesinde, araştırmalar belirli bir süre sonlanmış, 1970'lerde ilk fiziksel test fiber takviyeli metal laminatlarla gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, 1980'lerin başında Arall® (aramid takviyeli alüminyum levhanın kısaltılmış yazımı) adı verilen Delft Üniversitesi tarafından bir FML geliştirilmiştir. Yapılan çalışma ile, savunma sanayinde kullanılan kişisel koruyucu zırhlarının, kompozit kumaşlar ve epoksili

sistemler yardımıyla, deneysel ve nümerik metotlarla yeniden tasarımının yapılarak zırh teknolojisinin geliştirilmesi amaçlanmıştır [2].

Seramik ve metalik zırh için plastik deformasyon koruma mekanizmaları önemli ölçüde farklıdır. Metalik zırh, plastik deformasyon mekanizması ile merminin kinetik enerjisini emerken, kırılma yoluyla dağılır. Genellikle seramik zırh sistemleri, balistik naylonla kaplanmış tekli bir seramik veya kompozit seramik-metal gövdeden oluşur ve arkasına yerleştirilen kevlar, twaron, spectra, dynemea gibi yüksek gerilme mukavemetli fiber astar veya lamine polietilen ile birleştirilir. Bazı yumuşak metaller (örneğin alüminyum ince levhalar) bir destek malzemesi olarak da kullanılır. Bazı durumlarda, zırhın önyüzünde bir sivri kalkan bulunur [6].

Tekil alüminyum yerine, aramid takviyeli alüminyum levha (Arall®) kullanılarak bir FML ile yaklaşık %20 ağırlık tasarrufunun mümkün olduğu bulunmuştur. Arall endüstride uygulamasını ilk olarak, C17 kargo uçak kapıları için denenmiştir. İzotropik, plastik davranış, dayanıklılık karakteristiği, darbe dayanımı, metallerin kolay onarımı ve üstün mukavemet, sertlik, mükemmel yorulma dayanımı, kompozit malzemelerin kırılma özelliklerinin birleştirilmesi için, FML, düşük yoğunluklu ve yeterli korozyon, üstün yorulma direnci ve mükemmel darbe özelliklerine sahip bir malzeme olarak geliştirilmiştir [8].

Yapılan bir diğer çalışmada [9], yüksek performanslı aramid (Kevlar® 29) lifli çekirdeğin 1000 Denier lineer yoğunluğunda üç katlı dokuma yapıya sahip kumaşları incelemiştirler. Bunlar, 2D-düz dokuma (2D-P), 3D-ortogonal (3DO) ve 3D-açılı kilitleme (3D-A), meç atkı yerleştirme mekanizmasına sahip örneklemeli dokuma makinesi (CCI) kullanılarak hazırlanan kumaşlardır. Bu kumaşlar, biri bağlama iplikleri ve diğeri de zemin iplikleri içeren iki çözümlü kumaş ile üretilmiştir.

Bosco ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada [14], cam elyaf takviyeli zırh çelik lamine yapıları incelemiştirler. Bu yapılar, askeri araçlar, tanklar ve otomobillerde korozyon dayanımıyla birlikte darbe enerjisinin de yüksekliği nedeniyle tercih edilmektedir. İmalat esnasında, özellikle delme işleminin lamine yapı üzerindeki etkisi gözlemlenmiş, kesici takımın yüksek baskı yükünün levha ayrışmasını artırdığı, hızlı ve küçük çaplı tığların levha ayrışmasına etkisinin düşük olduğunu gözlemlenmiştir.

İnce tabakalı metal levha ile elyaf takviyeli kompozitlerin kombinasyonu olan hibrit malzemeleri geliştirmek için, geleneksel alaşımlar ile bu kompozitleri bir araya getirme çalışmalarına olan ilgi giderek artmaktadır. Yapılan bir çalışmada Santiago ve arkadaşları [16], fiber metal laminatların çoğu metal alaşımları ile karşılaştırıldığında üstün yorulma ve darbe dayanımı özelliğini farketmişlerdir. 1980 lerde Delft Teknoloji üniversitesi'nde geliştirilmiş olan cam elyaf takviyeli epoksi ile alüminyum alaşım levhalardan oluşan GLARE nin üstün performansına dikkat çekmişlerdir.

C.METAL LAMİNE ZIRHLAR

Alüminyum levhalar uçak yapıları, gemi, bina ve köprü gibi çok çeşitli uygulamaların yanında, hareket halindeki cisimlerin hafif korunma sistemlerinde de kullanım alanı bulmaktadır. Çarpma veya yüksek hızlı yükleme şartları, zırh sistemleri ile ilgili uygulama alanlarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu tip uygulamalarda, yapının ağırlığı önemli bir tasarım ölçütüdür. Bu nedenle, ağırlığının yüksek olduğu geleneksel çelik ya da beton gibi malzemeler yerine, daha hafif olan alüminyum alaşımların sıklıkla tercih edildikleri bilinmektedir [3].

Balistik tehditlere karşı zırh malzemeleri seçiminde sadece balistik korunma amaçlı değil aynı zamanda ağırlıktan tasarruf edilmesi gerekmektedir. Bu tasarım kriteri özellikle uçak ve otomobillerde önemini hissettirecektir. Bununla birlikte zırh malzemesi seçiminde birçok faktör etkilidir. Bunlar; maliyet, tasarım, balistik performans, özel uygulamalar, bakım ve ağırlık gibi kriterlerdir. Yüksek dayanımlı çelikler koruyucu yapı malzemesi olarak seçilmeye birinci aday olmalarına rağmen, Al7075 ve Al7017 gibi mühendislik alüminyum alaşımları da mükemmel dayanım, düşük yoğunluk gibi özelliklerinden dolayı çekici bir zırh malzemesi adaydır [4].

Katmanlı yapılarda, destek katmanı olarak kullanılan yapının malzeme özellikleri kadar, oluşturulan zırh konfigürasyonu da balistik performansı etkilemektedir. Zırh çelikleri, titanyum ve alüminyum alaşımlı malzemeler, kullanılan en yaygın metal zırh malzemeleridir. Bu malzemelerin sertlik değerleri, oldukça yüksek seviyelere kadar çıkmaktadır.

Yüksek performanslı polietilen, aramid, kevlar ve S2 cam, zırh uygulamalarında kullanılan en önemli ileri kompozit malzemelerdir. Bu malzemelerin tek başlarına kullanılmasıyla, normal çekirdekli tehditlere karşı en hafif çözümleri elde etmek mümkündür. Ayrıca, katmanlı zırhlarda destek katmanı olarak kullanılmaları ile zırh delici mermi tehditlerine karşıda hafif tasarımlar elde edilir [10].

Yapılan diğer bir çalışmada [11], yüksek sertlikteki malzemeden yapılmış delikli levhaların 7.62x54 zırh delici mühimmatına karşı hasar mekanizmaları incelenmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlar, delikli zırh plakaları üzerinde etkili olan üç asimetric mekanizmayı belirlemiştir; bunlar asimetric kuvvetler, mermiyi hedef yörüngesinden, mermi çekirdeği kırığından ve mermi göbeği burun erozyonunun dan sapmaktadır. Simülasyon ve malzeme model parametrelerinin aslına uygunluğunu doğrulamak için ilk testler 9 ve 20 mm kalınlığındaki tekli zırh plakaları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Delikli zırh plakaları üzerindeki balistik testlerin rastlantısal (stokastik) doğası, deliklere göre mermi darbe bölgesine dayalı olarak analiz edilmiştir.

D.SERAMİK LEVHALAR

Yapılan bir araştırmada [6], daha çok geliştirme aşamasında elde edilen farklı zırh seramiklerin balistik performansının yanı sıra diğer tanınmış zırhlı seramik üreticileri tarafından üretilen malzemelerin ve tasarlanmış seramik tabanlı zırh sistemlerinin kapsamlı çalışmalarının sonuçları özetlenmektedir. İncelenen zırhlı seramikler arasında homojen oksit ve karbür seramikler ve heterojen seramik malzemeler bulunmaktadır. Ele alınan seramiklerin balistik performansını etkileyen bileşimi, yapısı ve ana özellikleri incelenir ve analiz edilir. Seramik zırhın doğru seçilmesi ve değerlendirilmesi için, balistik enerjiyi dağıtma ve üretim işlemlerinin optimizasyonu gibi tüm ilgili fiziksel özelliklerin ve mikro yapının bir kombinasyonu düşünülmelidir. İncelenen seramiğin yapı ve özellikleri, zırh sistemi tasarımı ve merminin türü olarak balistik performansı tartışılmıştır.

E. HİBRİT KOMPOZİTLER

Bir tek polimerik matristeki (aynı zamanda hibrit kompozitler olarakta bilinirler) iki veya daha fazla elyafın kombinasyonu, tek tek güçlendirilmiş polimer kompozitlere göre daha fazla sertlik ve dayanım özelliği verir. Hibrit kompozitler, matris-hibrit kompozitler veya fiber-hibrit kompozitler olarak karakterize edilirler. Termoplastik lifler, sertleştirme işlemi sırasında termoset matrisinde eridiğinde, buna matris-hibrit kompozit denir. Termoplastik lifler kürlendikten sonra lif formunda kaldığında buna

fiber-hibrit kompozit denir. Termoplastik elyaf için plastik deformasyon, hibrid kompozitlerin enerji emilimini arttıran önemli bir husustur. Termoset matris içine eriyen termoplastik elyaflar tarafından emilen toplam enerji, düz cam elyaf kompozitler ile hemen hemen aynıdır. Bu, fiberin özelliklerinin, matriste kıyasla kompozit tarafından emilen toplam enerjiyi etkilediğini kanıtlar. Bundan önce, farklı matrisler, toplam emilen enerji açısından hibrit kompozitlerde küçük farklılıklar sergilemiştir. Pozitif veya negatif bir hidrit etki üç farklı faktörle tanımlanır: yükleme konfigürasyonu, fiber düzenlemesi ve iki fiberin nispi hacim oranıdır. Hibrit kompozitlerin davranışı, her bir lif için dezavantajlar ve avantajlar arasında bir dengeleme hareketidir. Hibridizasyon ayrıca farklı doğal elyafların bir araya getirilmesiyle veya farklı sentetik elyafların bir kombinasyonu veya hem doğal hem de sentetik elyafların birleştirilmesiyle gerçekleştirilebilir. Hibrit kompozitler yüksek sertlik ve mukavemet sağlayabilir, darbe ve yorulma direncini artırabilir ve hafiflik avantajları gibi kazanımlar verebilirler [19].

II.DENEYSEL METODLAR

Yapılan bir çalışmada [3], Übeyli ve arkadaşları, üç farklı alan yoğunluğu (51, 66 ve 89 kg / m²) olan çelik plakalar hazırlamışlardır. Bu değerler daha önceki yapılan bir çalışmada incelenen lamine kompozit plakalar ile aynıdır, t ve d sırasıyla zırh bileşenlerinin kalınlığı ve yoğunluğudur. Lamine edilmiş kompozitlere kıyasla, balistik olarak test edilmek üzere yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) çelik, yani 50CrV4 seçilmiş ve bu plakalar 8 x 8 cm boyutlarında numune olarak kesilmiştir. Çeliğin balistik performansını etkileyen mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla bu çelik, üç farklı sertlik değeri, yani 40 HRc, 50 HRc ve 60 HRc elde edilecek şekilde temperlenmiştir. Atmosfer kontrollü bir fırında östenitleme işleminden sonra, örnekler martensitik yapı elde etmek için bir yağ banyosunda soğutulmuştur. Daha sonra, temperli martensit elde etmek için belirlenen sıcaklıklarda temperleme, bir tuz banyosunda yapılmıştır. Örneğin 40 HRc sertlikte, akma dayanımı $\sigma_a = 1130 \text{ Mpa}$, 550 °C'de yağ banyosunda 2 saat temperlenmiştir. Çeliğin temperlenmesi ile ilgili çelik numunelerin mekanik karakterizasyonu sertlik ve çekme testleri kullanılarak belirlenmiştir. 550, 400 veya 200°C'de temperlemede çok çeşitli mekanik özellikler elde edilmiştir. 200°C de temperlenmiş numune gevrek davranış durumu temsil ederken, 550 °C'de temperlenmiş numune en sünek olanını temsil eder. Çelik numunelerin, MKE Silahsan A.Ş. balistik laboratuvarında 7.62 x 51 mm M61 tipi AP mermilere karşı balistik testleri yapılmış ve hedef zırh örnekleri, mermi çıkış bölgesinden 15 m uzaktaki hedefe yerleştirilmiştir. Merminin hızı 805 ± 15 m / s olarak ölçülmüştür. Her bir örnek tipi için altı test istatistiksel olarak balistik davranış elde etmek için yapılmıştır [3].

Tablo1: Test edilen kompozit levhalar [3]

Numune Adı	Ön Levha Alümina Kalınlık (mm), t	Arka Levha Al2024-T6 Kalınlık (mm), t	Alansal Yoğunluk (kg/m ²), d
R1	10	4.75	51
R2	14	4.75	66
R3	20	4.75	89
	Ön Levha Alümina Kalınlık (mm)	Arka levha Al2024-T0 Kalınlık (mm)	
R4	10	4.75	51
R5	14	4.75	66

Tablo 1 devamı : Test edilen kompozit levhalar

R6	20	4.75		89
	Ön Levha Al2024-T6 Kalınlık (mm)	Orta Katman Alümina Kalınlık (mm)	Arka Levha Al2024-T6 Kalınlık (mm)	
R7	2.00	10	3.17	52
R8	2.00	14	3.17	68
R9	2.00	20	3.17	90
	Ön Levha Alümina Kalınlık (mm)		Arka Levha Al2024- T6 Kalınlık (mm)	
R10	8		7.92	52
R11	12		7.92	68
R12	18		7.92	90
	Ön Levha Kalınlığı Alümina (mm)		Arka Levha Kalınlığı Al2024-T6 (mm)	
R13	12		3.17	54
R14	16		3.17	70
R15	22		3.17	92

Tablo2. Balistik test için hazırlanan çelik numuneler [3]

Numune Adı	Kalınlık (mm)	Sertlik (HRc)	Alansal yoğunluk (kg/m²)
S1	6.5	40	51
S2	6.5	50	51
S3	6.5	60	51
S4	8.5	40	66
S5	8.5	50	66
S6	8.5	60	66
S7	11.4	40	89
S8	11.4	50	89
S9	11.4	60	89

Yapılan bir çalışmada [5]; alüminyum levhaların yüzeye dik gelen yüksek hızlı çarpma (darbe) yükleme şartları altındaki dayanımlarına mermi hızı, levha kalınlığı gibi girdilerle birlikte, çeşitli performans artırıcı yöntemlerin (yüzey kaplama, destek katmanı eklenmesi) etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada, levhaların ön yüzlerine, ısı püskürtme yöntemiyle uygulanan kaplamaların, balistik dayanıma etkilerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen atışlardan sonra, levhaların ön ve arka yüzlerinde oluşan deformasyon miktarları ölçülmüştür.

Yossifon ve diğerleri [10], rijit bir delicinin çok katmanlı bir yapıya çarpmasını, kuramsal ve sayısal olarak incelemiş, analitik bir model geliştirerek sonuçlarını sayısal bulgularla karşılaştırmışlardır. Park ve diğerleri, balistik çarpmaya maruz kalan katmanlı bir yapının sonlu elemanlar yöntemi ile

optimizasyonunda kullanılabilecek unsurları içeren bir çalışma yapmışlardır. Kim ve diğerleri ise; kırılğan malzemeler için destek katmanının etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Özellikle hasar oluşum biçimleri açısından, destek katmanı etkilerini çarpma hızına bağlı olarak ortaya koymuşlardır.

Delikli zırh plakaları üzerinde yapılan deneysel ve numerik çalışmalar [11], sonuçlarda etkili olan üç asimetrik mekanizmayı belirlemişlerdir. Bunlar; merminin yörüngesinden, mermi çekirdeği kırığından ve mermi göbeği burun erozyonundan oluşmaktadır. Simülasyon ve malzeme model parametrelerinin aslına uygunluğunu doğrulamak için ilk testler 9 ve 20 mm kalınlığındaki tekil zırh plakaları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Delikli zırh plakaları üzerindeki balistik testlerin raslantısal (stokastik) doğası, deliklere göre mermi darbe bölgesine dayalı olarak analiz edilmiştir. Merminin hasar mekanizmalarını belirlemek için, mermi hasar modellerini içeren ve olmayan çeşitli senaryolar daha fazla araştırılmıştır. Mermi hasar kriteri ve mermi burun erozyonu eşiği dahil olmak üzere sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki ilişki önemli ölçüde artmıştır.

Tekli plakaların perforasyon direnci konusunda deneysel, sayısal ve teorik olarak çok fazla araştırma bulunmasına rağmen, katmanlı metal zırhlar üzerine sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Zhang , Deng ve diğerleri [17], katmanlar arasındaki hava boşluğunun etkisini, katman sayısını, ve sıralaması ile mermi geometrinin etkilerini araştırmışlardır. Bunun için künt, ogvial ve hemisferik burunlu yüksek mukavemetli mermilerin çarptığı tekli ve çok katmanlı çelik plakalar ile katman kalınlığının balistik performansına etkisi üzerine kapsamlı bir deney yapmışlardır. Bu deneylerde, farklı mukavemetli künt burunlu mermilerden etkilenen tekli, çift ve üç katmanlı çelik plakaların balistik performansı üzerinde kapsamlı bir deneyler gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, tekli plakaların, yüksek mukavemetli mermiler için çok katmanlı plakalardan daha düşük balistik limit hızlarına sahip olduğunu, ancak tekli levhaların, düşük mukavemetli mermiler için çok katmanlı levhalardan daha büyük balistik limit hızları verdiğini göstermiştir.

A.FİBER METAL LAMİNATLAR ÜZERİNDE DÜŞÜK HIZ ETKİSİNİN DENEYSEL ÇALIŞMALARI

Seramik zırhta uygun destek malzemeleriyle yapıştırılan seramiklerin balistik performansları test edilmiştir. Corporation (Cagary, AB, Canada) atış silahı, M16 silahını kullanarak NIJ 0101.03 ve NIJ 0101.04 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Uygulamaya ve gereken koruma seviyesine bağlı olarak, çelik uçlu bilyeyle 5,56 x45mm SS109, kurşun çekirdeğe sahip 7.62 x 51 mm NATO Topu Tam Metal Mermi (FMJ), 7.62x 39 mm Rus Topu ile askeri mühimmat çelik çekirdekli FMJ, 7.62x54R Rus Bilyeli LPS, 7.62x63 mm zırh delici M2 bir tungsten karbür çekirdekli FMJ, 0.308 Win ve 0.308 Lapua kullanılmıştır. Mühimmata bağlı olarak, mermi ağırlığı, hızı ve enerjisi farklı değerlere sahiptir (Tablo1). Gerçek askeri mühimmat kullanarak balistik performans çalışması önemlidir, çünkü seramiklerin parçalanması gerçek koşullara dayanır ve “yapay” mermilerin uygulandığı modelleme koşullarından ayrılır. Mermi hızı, bir kronograf kullanılarak ölçülmüştür. Atış sonrası hasar, zırh sisteminin arkasına yerleştirilen Roma Plastilina modelleme kili ve o kildeki hasar, kompozit zırhın sistemin arkasındaki geçici deformasyonunu artırır. Seramik parçalanma dahil seramiklerin hasar bölgesi ve çekimden sonra mermilerin müteakip darbe sonrası durumu gözlenmiştir. Balistik test edilen T paneller, 100 x100 mm (7–10) mm ve 155 x200 mm (7–10) mm boyutlarındaki yassı levhaların yanı sıra gerçek zırh levhaları ve 4-10 mm farklı kalınlıkta ve konfigürasyondadır. Zırh malzemeleri, çoklu vuruş testleri için kullanılmıştır. (vuruşlar arasında yaklaşık 50 mm boşluk bırakılarak gerçekleştirilmiştir) [6].

Darbe ve hedef, iki maddenin çarpışması anlamına gelir. Çarpışma üzerine, çarpma tertibatı hedefe girerken temas gücü gelişir. Yapının dinamik tepki bilgisi ve hasar direnci, uçak gibi yapısal uygulamalar gibi yüksek güvenlik gerektiren yapıyı optimize etmek için çok gereklidir. Darbe testinin çoğu ya basit bir şekilde desteklenen ya da kenetlenmiş, sınırları olan düz bir plaka üzerinde yapılmıştır. Kompozitlerin iç hasarını görselleştirememek, araştırma topluluğunu düşük hızlı etki fenomenlerini sıkı bir şekilde incelemeye odaklamaktadır. FML'de alüminyum alaşımlı levhaların varlığı laminatta belirli bir süneklik sunar ve plastik deformasyonu, saptanabilirliği ve denetlenebilirliği artıran bir miktar kalıcı girinti sağlar. Parametreleri, düşük hızda darbeye maruz kalan FML'nin etki ve tepkisini Şekil 3'te özetlendiği gibi iki ana gruba ayrılabilir. Malzeme bazlı parametreler, metallerin ve liflerin tipi, istifleme dizisi, metal liflerin hacim oranı ve ara yüzlerin bağlanması ve işlenmesi gibi bileşenlerin türlerini içerir. Oysa geometri temelli parametreler ön ve son işlem, test örneklerinin boyut etkisi ve çarpma tertibatının boyut / kütle, geometri ve hızıdır [8].

Kolopp ve arkadaşları [18], alüminyum, alaşımlarının ve sandviç yapıların kalınlığındaki değişikliklerin darbe direncini orta hızlı delici parçalara karşı test etmişlerdir. Bu çalışma, daha çok havacılık sektöründe, uçak dış gövde yapısının karşılaşılabileceği etkilerin anlaşılması bakımından önemlidir. Burada kullanılan malzemeler; ilk grup olarak 5000 serisi alüminyum alaşımlarını değişik kalınlıklarda test etmişlerdir. İkinci grupta, alüminyum ön ve arka destek katmanları arasına alınan alüminyum peteği formundaki sandviç yapı, diğer gruplarda ise ön ve arka yüzlerdeki katmanın kumaş ve alüminyum levha ile yer değiştirmesi ve ortada petek yapının bulunması ile yapılan testtir. 120m/s orta hızda ve 127 gr lık bir kütle ile yapılan çarpma ile yapılan deney sonunda oluşan hasar mekanizmaları anlaşılmasına çalışılmıştır. Deneylerin sonucunda, ön katmanın balistik delinmeye karşı öneminin büyük olduğu ve testlerin sonucu itibarıyla alüminyum ve kumaş kombinasyonlu kompozit yapının en uygun aday yapı olduğu ve hedefin kalınlığının darbe performansını etkilediği sonucuna varmışlardır.

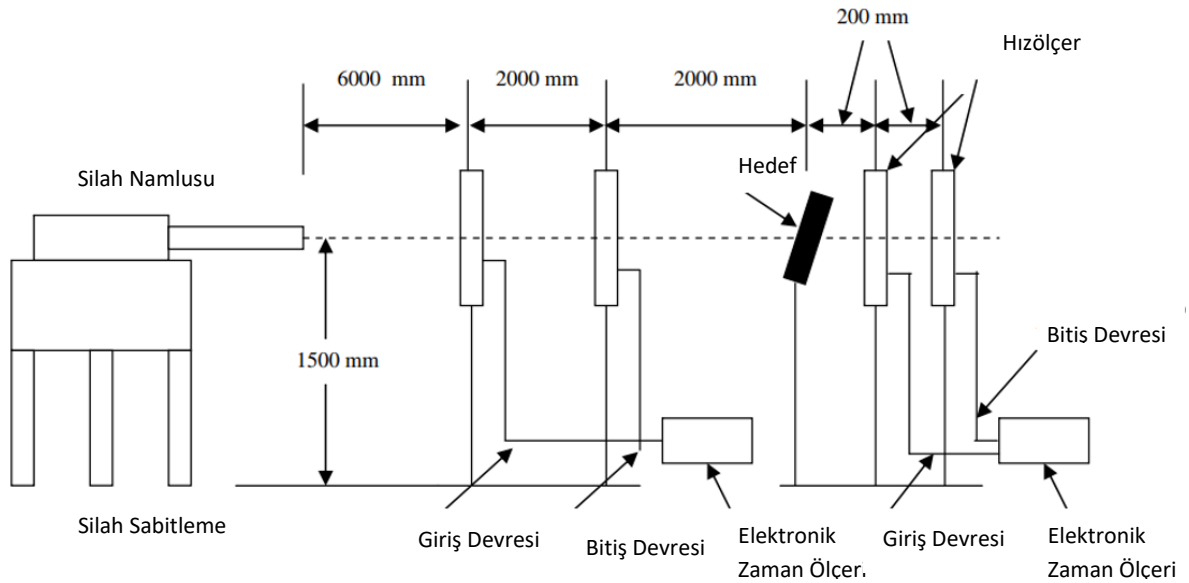
B. ÇARPMA HAZNESİ DENEYLERİ

Balistik test ve nümerik simülasyonlarının tamamlanmasından sonra zırh sistemlerinin gaz tabancası kullanılarak çarpma haznesinde testlerinin yapılmasına geçilmiştir. Çarpma hazne sinde yapılan testler, raporun önceki kısımlarında da belirtildiği gibi İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Dinamik Test ve Modelleme Laboratuvarında yapılmıştır. Deneylerde kullanılan gaz tabancası ve numune sabitleme aparatı Şekil 4.30 a ve b'de verilmiştir. Bu testlerin en büyük avantajı, laboratuvar ortamında kontrollü ve tekrar edilebilir olmalarıdır. Deneyler sırasında hem merminin zırha çarpma hızı hem de şayet hedef delinirse merminin terminal çıkış hızı ölçülebilmektedir [13].

Borvik ve arkadaşları yaptığı bir araştırma programında [15], düşük mühimmat hızı rejiminde künt burunlu silindirik mermilerden etkilenen çelik levhaların davranışını incelemişlerdir. Çalışma düzeneğinde, mermi çemberi monte edilmiş ve bir mermiyi maksimum 1000 m/s hızla fırlatabilecek sıkıştırılmış bir gaz tabancası yapılmıştır. Gaz tabancası, çözüm yöntemlerinin doğrulanması için yüksek hassasiyetli delme testi verilerini elde etmek için kullanılır. Test sırasında ana enstrüman dijital yüksek hızlı kamera sistemi ile sağlanır. Darbe işleminin görselleştirilmesine ek olarak, dijital görüntüler, katma değerlerin bir fonksiyonu olarak varsayılan rijit cisimler için kat edilen mesafe, hız ve ivme elde etmek için kullanılır. Bu çalışmada 12mm kalınlığında Weldox 460 E çelik levhanın balistik limit eğrisini belirlemek için yapılan deneysel bir program ile oluşturulmuştur. En önemli deneysel bulgulardan bazıları rapor edilmiş ve tartışılmıştır ve iki tipik delme testinin ayrıntıları verilmiştir.

C. DENEY DÜZENEĞİNİN HAZIRLANMASI

Balistik deneylerin gerçekleştirilebilmesi için Şekil 2'deki deney düzeneği kurulmuştur. Silahın namlusundan 10 m uzağa hedef yerleştirilmiş hedefin 4m önünde birinci hız algılayıcı sistemi ve hedefin hemen arkasında ikinci hız algılayıcı sistemi yerleştirilmiştir. Mermi giriş hızını ölçmek için tüfek namlusundan 6 m ileride 1. duyarga, 8 m ileride de ikinci duyarga sistemi bulunmaktadır. Mermi birinci duyarga düzeneğinden geçtiğinde zaman sayacı çalışmakta 2. duyargadan geçtiğinde de durmaktadır. Böylece merminin 2 m yolu ne kadar zamanda aldığı ölçülüp mermi giriş hızı hesaplanmaktadır. Yine mermi çıkış bölgesinde hedeften 20 cm uzakta 1. duyarga, 40 cm uzaklıkta da ikinci duyarga bulunmaktadır. Bu sistemle de merminin çıkış hızı ölçülmektedir. Ancak çok gevrek numunelerde kırılan parçacıklar duyarga sistemlerine ulaştığından çıkış hızı ölçümleri çok sağlıklı yapılamamaktadır [13].



Şekil 2. Deneysel düzeneğin şematik diyagramı[13]

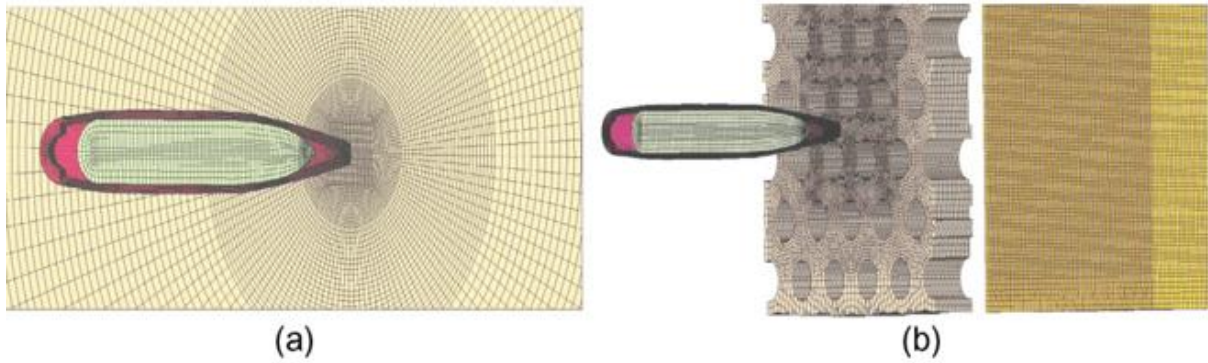
III.SİMÜLASYON MODELLEME VE NUMERİK METOTLU ANALİZLER

Tekli ve çoklu levhalar, değişik hız ve değişik kalınlıklar için numerik analizler yapılmıştır. Yapılan çalışmada WELDEX 700 E çeliği ve Al7075-T651 alüminyum alaşımları, 7,62 mm APM2 mermisinin 775-950 m/s hızı ile test edilmiştir. Karşılaştırılmalı deneysel çalışmalar hem zor hem de pahalıdır. Sayısal simülasyonlar, WELDEX 700E ve Al7075-T651 alaşımlarının balistik davranışı hakkında tahmin yapmamızı sağlar. Ve deneysel olarak elde edilebilecek fiziksel özellikleri verir. Bu çalışmada geliştirilen numerik analiz metodu ile deneysel yöntemler tasarlanır ve bu da deney sayısında azalmayı getirir. Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar gibidirler ve numerik analizler de elde edilen sonuçlar geçerlidir. WELDEX 700 E çeliği için tekli plaka 800m/s hızla çarpmada üçlü levhalara göre çok daha iyi sonuç vermiştir. Tekli ve çift katmanlı plakalardaki performans farkı çok belirgin değildir. Al7075-T651 için 20mm kalınlıktan daha aşağısı için tekli ve çoklu levhalar arasındaki fark çok belirgin değildir. 30mm kalınlıktan sonrası için performans farkı büyüktür. 30 mm'den kalın Al7075-T651 ler

için yapılan simülasyonun geçerliliği için daha ileri ve fazla araştırmalar (deneysel ve sayısal) gerekmektedir.[4]

A.SAYISAL MODELLEMELER

Sayısal modelde, malzeme üzerinde koruyucu ve temel denklemlerin olduğu sonlu bölümlere ayrılmıştır. Bu hacimsel ayrıştırmanın uygulanma şekli farklı sayısal yöntemlere yol açar. En yaygın kullanılan ayrıştırma metodları, Lagrange, Euler, ALE (isteğe bağlı Lagrange Euler- Lagrange ve Euler'in bir karışımı) ve SPH (Hidrokinamik Pürüzsüz Parçacıklar) gibi ağsız yöntemlerdir. Kılıç ve Ekici, Lagrange ve SPH tekniklerinin balistik performansın belirlenmesinde uygulanabilirliğini göstermek için karşılaştırmalı bir çalışma sunmuş ve Lagrange yönteminin SPH'ye göre hedef deformasyon modelini görselleştirmede daha etkili olduğu sonucuna varmıştır. Lagrange yönteminde sayısal ızgara hareket eder ve deforme olur. Bu formülasyon, malzeme malzemelerinin doğru ve verimli bir şekilde izlenmesi ve karmaşık malzeme modellerinin dahil edilmesi gibi avantajları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Kütlenin korunumu otomatik olarak sağlanır ve malzeme sınırları açıkça tanımlanır. Lagrange'ın dezavantajı, sayısal ağın aşırı derecede deforme olmuş bir bölgede ciddi şekilde bozulmasına veya dolanmasına neden olabilir; bu, entegrasyon zaman adımı ve doğruluğu üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Çok iyi bilinen negatif hacim hatası, bu örgü karışıklığının bir sonucu olarak ortaya çıkar. Bununla birlikte, adaptif meshing, erozyon ve rezonans gibi sayısal teknikler uygulayarak bu sorunların bir dereceye kadar üstesinden gelinebilir [11].



Şekil 3. Numerik analiz modellemede a) Delinmemiş zırh levhası b) Delinmiş zırh levhası[11]

Bir diğer çalışmada, mesh modeli Hypermesh ticari kodu kullanılarak hazırlanmış ve sayısal simülasyonlar LS-Dyna kullanılarak yapılmıştır. Monolitik plakaların geometrik modeli, şekil3a da gösterildiği gibi, 300 mm çapında dairesel zırh çelik plaka ve mermiden oluşmuştur. Yumuşak ağ geçişine izin vermek için sertleştirilmiş çelik çekirdeğin ucuna küçük bir yarıçap uygulanmıştır. Plaka, madde teması, orta ve dış bölgeler, olmak üzere üç farklı bölgede altıgen sekiz düğümlü katı elemanlarla örülmüştür. Kafes boyutu, mermi temas bölgesinden dış bölgeye radyal yönde artmakta ve 0,2 ile 1 mm arasında değişmektedir. Bölgeler arasındaki örgü geçişi, sınırlardaki stres dalgası yansımaları önlemiştir. Mermi çekirdeği, kovan, ön ve arka dolgu maddesi ve yüksük, 0.2 mm altıgen elemanlarla örülmüştür. Kurşun antimon kapakları, malzeme kartı ISOTROPIC ELASTIC-FAILURE ile modellenmiştir. Penetrasyon sırasında yüzeyler arasındaki teması simüle etmek için ERODING_NODES_TO_SURFACE ve ERODING_SINGLE_SURFACE temas algoritmaları kullanılmıştır. Sayısal stabilite oluşturmak için zaman adımı ölçek faktörü kullanıldı. Sıfır enerji

deformasyonunu eliminasyonu için kum saati parametreleri simülasyonu kontrol etmek için kullanıldı. Monolitik plakalardaki ile benzer şekilde, şekil 3b deki gibi delikli plakaları (0.25- 1mm değişen boyutlarda) ile örgülendirildi. Taban plakası temas noktasında 0,5 mm ortada 0,7 mm, dış bölgede orta ve 1,5 mm. göz büyüklüğü ile modellenmiştir. Mermi, monolitik plakada kullanılan aynı model parametreleri ile modellendi.[11]

Diğer bir çalışmada [13], en iyi sonucu veren iki ara yüzey malzemesi olan teflon ve alüminyum metalik köpük içeren konfigürasyonlar seçilmiş ve bu malzemelerin kalınlıklarının balistik performansa etkisi incelenmiştir. İki farklı ara yüzey malzemesi için iki eş alansal yoğunluk (areal density) değeri seçilerek (2.3 mm teflon ve 4mm alüminyum metalik köpük ile 4.6 mm teflon ve 8 mm alüminyum metalik köpük) nümerik modelleri hazırlanmıştır. Simülasyonlardan sistem içi enerji dağılımı ve katmanlara göre iç ve kinetik enerji dağılımı ortaya konmuştur.

IV. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Malzemeler darbe etkisi altında hasara uğrarlar ve bu esnada plastik deformasyona maruz kalırlar. Bu plastik deformasyon, yapının kopması ve parçalanmasını sonuç verir. Böylece, çarpan cismin enerjisi kopma esnasında emilime uğrar. Enerjinin emilmesi, metalin veya bileşik yapının kırılma özelliklerine, sünekliğine veya kırılma dayanıklılığına bağlıdır. Ayrıca bu absorpsiyon özelliği, malzemenin mikroyapısı ile doğrudan ilişkilidir.

Eğer kırılma kompozit malzeme darbe etkisine maruz kalırsa, enerji emici mekanizmalar genellikle fiber-matriks ara yüzlerinin ilerleyen kırılmasının sonucunda etkilenen çoklu çatlama veya mikro parçalanma sürecinden dolayı olduğu düşünülebilir.

Kompozit yapı, alümina/alüminyum ikilisinden oluşması durumunda, merminin çarpmasıyla birlikte zırh yapı içerisinde seramik plaka ve mermi kırılır ve erozyona uğrar. Metalik plaka da ise, temas yüzeyinde keskin bir koni oluşturarak yerel basıncı azaltır. Kompozit yapı veya metalik yüzey merminin enerjisini emer.

Elyaf destekli kompozit yapılarda ise, yorulma çatlaklarının elyaf köprülenmesi ile yüksek yorulma direnci elde edilir. Çatlak başlaması durumunda, alüminyum alaşım tabakaları metal lifler arasındaki ara yüzlerde bazı sınırlı tabakalanmalar meydana getirir. Çatlama sonrasında, metalden kırılmamış liflere gerilme yeniden dağıtılır. Epoksi yapıştırıcı gibi kuvvetlendiriciler tarafından çatlak köprülenme yardımıyla çatlak oluşumu engellenir ve metallerdeki çatlak büyümesinin önüne geçilir.

Balistik deneylerde en çarpıcı sonuç yapının delinip delinmediğidir. Bu sebeple, incelenen yapılarda esas kriter bu olmuştur. Çeliklerde kalınlık ve mekanik özelliklere göre balistik performans ve davranışlar farklılık göstermektedir. Mekanik özelliklerden en önde geleni, sertlik, kırılma dayanıklılığı tokluk gibi özelliklerdir. Bu özellikler ne kadar yukarıda ve iyi ise balistik performans o derece iyi ve yukarıda sonuç verir.

V.GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

Fiber metal laminatlar (FML), kompozit yapıların darbe özelliklerini açıklamaya yönelik önemli çalışmalar yapılmış ve ilgili birçok soru cevaplanmıştır, ancak sorunun tam ve ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını sağlamak için uzun bir yol vardır; bunların bazıları aşağıdaki gibidir:

FML'lerin darbe özelliklerine ilişkin teorik modellemeler üzerine yapılmış olan makale sayısı sınırlıdır.

Test, sonuçların kaydedilmesi ve analizi, çarpma sonrası tahribatsız veya tahribatlı muayeneler ile ilgili yapılanlar göz önüne alındığında, FML'lerin darbe yüklemesine tepkisini tahmin etmek için teorik modeller geliştirmenin avantajları oldukça açıktır. FML'lerin sayısız malzeme ve konfigürasyonu ile ilgili parametre potansiyelinin fazlalığı ve bunları değiştirmek, deneyleri araştırmaları çok zor ve maliyetli hale getirir, böyle bir modelleme FML bileşenleri ve yapılarının tasarımında ve analizinde daha değerli ve maliyetin düşürülmesinde etkin olacaktır.

Katman sayısı, farklı düzen ve konfigürasyonlar gibi bazı parametrelerin, darbe tepkisi ve hasarı başlatma ve yayılma üzerindeki etkilerini araştırmak için daha fazla dikkat gösterilmesi gerekir. Giriş parametreleri açısından bir tür hasar haritası ve ilk çatlak veya çatlak uzunluğuna giden enerji, tasarımcılar ve endüstri için faydalı olacaktır.

Termoset ve termoplastik matrislere dayalı FML'lerin darbe davranışının tüm yönlerini netleştirmek için tam ve adım adım karşılaştırmalı bir çalışma önerilmektedir.

Kısa ve sınırlı bir açıklamada, sıcaklık etkisinin FML'lerin darbe hasarlarında önemli olmadığı belirtilmiştir. Havacılıkta sıklıkla uygulanan yapılarda FML'lerin darbe özelliğinde fark edilir bir etki değişimi gözlenmemiştir. Bununla beraber, FML'lerin termal koşullar altında, en azından akademik bir ilgi olarak etki özelliklerinin dahil edilmesi gerekmektedir.

Gelecekte FML uygulanmalarında, esas olarak yeni metal alaşımlarının, fiberlerin ve bunların kombinasyonlarının geliştirilmesine bağlı olduğu görülmektedir. Statik ve darbe dayanım sonuçları arasındaki, özellikle de alternatif metallerin sünekliği ve kırılabilirliği açısından bazı tutarsızlıklar, önerilen adayların FML'ler içindeki etki özelliklerinin ayrıca incelenmesini gerektirir.

Bu alandaki gelecekteki araştırmalarda, örneğin farklı geometrilerinin, sınır koşullarının ve çeşitli darbe noktalarının konumlarının yanı sıra, çoklu etkilerin (gerçekte olduğu gibi) etkisinin dikkate alınması önerilmektedir.

Son olarak, FML'lerin (monolitik metaller veya fiberle güçlendirilmiş kompozitler yerine) sandviç panellerin kaplaması olarak uygulanması için fırsatlar vardır. Yüksek mukavemetli bir kompozisyona bağlı FML'leri dikkate alan paralel çalışmalar bu fikre yardımcı olabilir [20].

VI.KAYNAKLAR

- [1] S.E. Özgültekin, “Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzeme Kombinasyonlarının İncelenmesi “ Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye,2012.
- [2] N. V. David, X.-L. Gao, J. Q. Zheng “Ballistic Resistant Body Armor: Contemporary and Prospective Materials and Related Protection Mechanisms” *Applied Mechanics Reviews*, vol. 62, pp. 050802-050819,. 2009.
- [3] M. Übeyli, R. O. Yıldırım, B. Ögel, “On The Comparison of The Ballistic Performance Of Steel And Laminated Composite Armors” *Materials and Design*, vol. 28, pp. 1257–1262, 2007.
- [4] E.A. Flores-Johnson, M. Saleh, L. Edwards” Ballistic Performance of Multi-Layered Metallic Plates Impacted by a 7.62-mm APM2 Projectile” *International Journal of Impact Engineering* , vol. 38, pp. 1022-1032, 2011.
- [5] E. Özşahin “Alüminyum Levhaların Yüksek Hızlı Çarpma Yükleri Altındaki Davranışları “Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay ve Uçak Mühendisliği Bölümü, İTÜ, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [6] E. Medvedovski , “ Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure. Part 1” *Ceramics International*, vol. 36, pp. 2103–2115, 2010.
- [7] M.Übeyli , R. O. Yıldırım , B. Ögel, “Investigation on the Ballistic Behavior of Al₂O₃/Al₂O₂₄ Laminated Composites” *Journal of Materials Processing Technology* , vol. 196, pp. 356–364, 2008.
- [8] G. B. Chai, P. Manikandan “Low Velocity Impact Response Of Fibre-Metal Laminates – A Review” *Composite Structures*, vol. 107, pp. 363–381, 2014.
- [9] A. K. Bandaru, V. Chavan, S. Ahmad, R. Alagirusamy, N. Bhatnagar, “ Ballistic Impact Response of Kevlar Reinforced Thermoplastic Composite Armors “ *International Journal of Impact Engineering*, vol. 89, pp. 1-13, 2016.
- [10] E. Özşahin, S. Tolun, “Polietilen Destekli AA 7075 T651 Levhalarda Katman Sıralamasının Balistik Dayanıma Etkisi” *İtü Dergisi*, c.8, s. 2, ss. 72-80, 2009.
- [11] N. Kılıç, S.Bedir, A.Erdik, B. Ekici, A Taşdemirci, M. Güden, “Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile”, *Materials and Design*, vol.63, pp. 427–438, 2014.
- [12] E. Medvedovski , “ Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 2” *Ceramics International*, vol. 36, pp. 2117–2127, 2010.
- [13] P.K. Jena, K. Ramanjeneyulu, K. Siva Kumar, T. Balakrishna Bhat, “Ballistic studies on layered structures” *Materials and Design*, vol.30, pp. 1922–1929, 2009.

- [14] M.A.J. Bosco, K. Palanikumar, B. Durga, Prasad, A. Velayudhamd, “Influence of machining parameters on delamination in drilling of GFRP-armour steel sandwich composites” Presented at the Chemical, Civil and Mechanical Engineering Tracks of 3rd Nirma University International Conference, Ahmedabad, India, paper, *Procedia Engineering*, vol. 51, 2013, pp. 758-763.
- [15] T. Borvik, M. Langseth, O.S. Hopperstad, K.A. Malo, “Ballistic penetration of steel plates” *International Journal of Impact Engineering*, vol.22, pp. 855-886, 1999.
- [16] R. Santiago, W. Cantwell, M. Alves, “Impact on thermoplastic fibre-metal laminates: experimental observations- A Review”, *Composite Structures*, vol. 159, pp. 800–817, 2017.
- [17] D.Yunfei, ZWei, Y. Yonggang, S.Lizhong, W. Gang, “ Experimental investigation on the ballistic performance of double layered plates subjected to impact by projectile of high strength” *International Journal of Impact Engineering* , vol. 70, pp. 38-49, 2014.
- [18] A.Kolopp, S. Rivallant, C.Bouvet, “ Experimental study of sandwich structures as armour against medium-velocity impacts” *International Journal of Impact Engineering*, vol.61, pp. 24-35, 2013.
- [19] S.N. A. Safri, M.T.H. Sultan, M. Jawaid, K.Jayakrishna , “ Impact behaviour of hybrid Composites for Structural plications: A review “ , *Composites Part B*, vol. 133, pp. 112-121, 2018.
- [20] M. Sadighi, R.C. Alderliesten , R. Benedictus, “ Impact resistance of fiber-metal laminates: -A review “ *International Journal of Impact Engineering* , vol 49, pp. 77-90, 2012.