

Tabakalı Kompozit Malzemelerde Yüksek Hızlı Darbe Hasarı

Mesut TURAN

Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Mühendislik malzemeleri, kullanım yerlerine bağlı olarak çeşitli yüklere ve çarpma etkilerine maruz kalabilirler. Darbe karşısında malzemede oluşan hasarın, darbenin özellikleri ve malzemenin yapısı ile sıkı bir bağlantısı vardır. Tabakalı yapıya sahip bir kompozit malzemede oluşan hasarın ve malzemenin darbeye karşı davranışının değerlendirilmesi oldukça güç ve uzmanlık isteyen bir konudur. Bu durumun en önemli sebebi, kompozit malzemelerin bilinen türdeki malzemelere göre daha kompleks bir yapıya sahip olmalarıdır.

Bu yazıda tabakalı kompozit malzemede, yüksek hızlı darbe durumunda oluşan hasar ve türleri açıklanarak, yüksek hızlı darbeye maruz kalmış kompozit malzemedeki hasar değerlendirilecektir.

Anahtar Kelimeler: Balistik darbe, delaminasyon, kompozit levha

ABSTRACT

Engineering materials, can be exposed to different loads and impact effects depending on position of their usage. Damage occurred by an impact, relates tightly to the construction of material and properties of impact event. Evaluation of the impact behaviour and damage characteristics of the composite plate are quite difficult and requires special knowledges of expertise. The main reason for this is that the composite materials have more complex structure than other engineering materials.

In this article, the high velocity impact damage of the layered composite materials are explained. These damage properties were also investigated on the impacted composite materials.

Keywords: Impact, composite, damage, delamination

GİRİŞ

Fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeler hafif olmaları ve aynı zamanda yüksek özgül dayanımları nedeniyle giderek artan uygulama alanlarına ve kullanım miktarına sahip olmaktadır. Tabakalı kompozit malzemelerin daha yaygın bir şekilde kullanımlarını sınırlayan en önemli faktör; karmaşık bir hasar mekanizmasına sahip olmalarıdır. Bu hasar türleri çoğunlukla birbiriyle etkileşimli olarak meydana gelip malzemenin yüklere karşı dayanım sınırlarını etkiler. Tabakalı bir kompozit malzemenin maruz kalabileceği darbe üç türde sınıflandırılabilir. Enerjisi düşük olan darbe; düşük hızlı darbe (low velocity impact) olarak isimlendirilir. Enerjisi yüksek olan darbe ise yüksek hızlı darbedir (high velocity impact), ki literatürde çoğu zaman balistik darbe (ballistic impact) olarak da isimlendirilir. Üçüncü türdeki darbe ise, enerjisi diğer iki türe göre daha yüksek olan çok yüksek hızlı darbe (hypervelocity impact) dir. Bu nedenle, tabakalı kompozit malzemelerin hasar türlerinin ve sonuçlarının anlaşılmasında darbe enerjisi önemli bir parametre olarak karşımıza çıkar.

Darbe sonucunda tabakalı kompozit malzemelerde oluşan hasar türleri genel olarak, fiberlerin kırılması veya kopması, matris malzemesinin kırılması, delinmenin meydana gelmesi ve delaminasyon oluşması şeklinde sınıflandırılabilir. Kompozit malzemede meydana gelen bu hasar türlerinin herhangi birisi veya birkaçı, darbe enerjisine bağlı olarak baskın olabilir.

BALİSTİK DAYANIMI DEĞERLENDİRMEDE KULLANILAN KRİTERLER

Balistik darbe esnasında insan vücudunu yaralanmalara karşı korumak amacıyla dizayn edilen yelek, kask ve miğfer gibi koruyucular genellikle aramid veya polietilen gibi yüksek dayanımlı polimer esaslı fiberler kullanılarak imal edilirler. Balistik darbeye karşı insan güvenliğini sağlamada koruyucu ekipmanlardan istenen en önemli özellik çarpan cismin koruyucu ekipmanı delip geçmemesidir.

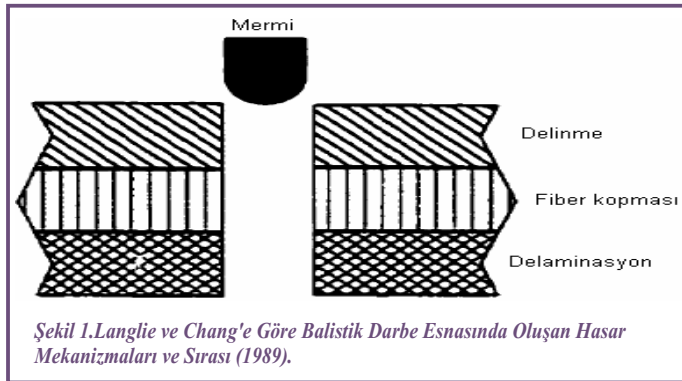
Tabakalı kompozit malzemelerin balistik darbe dayanımını değerlendirmede kullanılan farklı yöntemler mevcuttur. Kompozit malzemelerin balistik darbe davranışını etkileyen çok fazla sayıda parametrenin oluşu, bu yöntemlerin aynı malzemeler için bile farklı sonuçlar vermesine neden olabilmektedir (Frissen et al., 1995). V_{50} limit ve balistik limitin belirlenmesi kompozit malzemelerin balistik dayanımını değerlendirmek için kullanılan en yaygın iki önemli yöntemdir. Balistik limit; merminin kompozit malzemede tamamen delinme meydana getirmediği, diğer bir deyişle çarpışma sonucunda mermi hızının sıfıra düştüğü kritik hız veya kinetik enerji seviyesidir (Lee et al., 1994). V_{50} limit ise test edilen tabakalardan %50'sinin tamamen delinmeye uğradığı merminin sınır hızı veya kinetik enerji seviyesidir (Frissen et al., 1995). Şu anda, tabakalı yapıya sahip kompozit malzemelerin balistik dayanımı değerlendirmede kullanılan yöntemlerin tamamı kompozit

malzemenin delinmesi ve oluşan deformasyonunun belirlenmesini araştırmaya dayalıdır.

Kompozit malzemelerin balistik darbe davranışının belirlenmesi için yapılan çalışmaların büyük bir bölümü deneysel sonuçlara dayalıdır. Değerlendirmede üzerinde durulan nokta ise temel olarak kompozit malzemenin delinmeye karşı dayanımının belirlenmesidir. Sonuç olarak, bu konuda yapılmış çalışmalardan elde edilen verilerin büyük bir bölümü kompozit malzemenin değişik mermi tiplerine ve özelliklerine göre delinmeye karşı göstermiş olduğu dayanımla ilgilidir. Bu nedenle aşağıdaki bölümde tabakalı kompozit malzemelerin delinmeyi içeren hasar mekanizmalarını daha iyi anlamaya yönelik bilgiler verilecektir.

BALİSTİK DARBE SONUCU KOMPOZİT MALZEMEDE HASAR OLUŞUMU VE YAYILMASI

Balistik darbe esnasında tabakalı kompozit malzemede genellikle meydana gelen belli başlı hasar mekanizmaları; delinme, fiber kopması, matris kırılması ve delaminasyon oluşmasıdır (Critescu et al., 1975; Langlie and Cheng, 1989; Zhu et al., 1992a,b; Lee and Sun, 1993; Zee and Shieh, 1993; Lee et al., 1994; Wu et al., 1994; Wu and Chang, 1995; Goldsmith et al., 1995). Genelde, bu hasar mekanizmaları birbiriyle etkileşimli olarak meydana gelir ve darbenin meydana geliş koşullarına çok bağlıdır (Peijs et al., 1994). Langlie and Cheng (1989), Şekil 2.1'deki gibi, bu hasar mekanizmalarının darbe esnasında meydana gelişinin düzenli bir sıralaması olduğunu düşünmüşlerdir. Langlie and Cheng'e



(1989) göre, her bir hasar safhasının kalınlığı tabakanın toplam kalınlığı ile yakından ilişkilidir.

Şekil 2'de, meydana gelen hasar mekanizmaları hakkında daha detaylı bilgi verilmektedir. Darbenin başlangıç safhasında tabakanın kalınlığı boyunca dayanımı, kompozite nüfuz eden mermi tarafında yenilmektedir. Kompozit malzeme mermi altında sıkıştırılmakta ve oluşan çukur kısmında kalınlık boyunca meydana gelen kesme gerilmelerinden dolayı deformasyon oluşmaktadır. Kalınlık boyunca meydana gelen sıkıştırma; malzemenin bu kısmında ezilme meydana getirirken, kalınlık boyunca oluşan kesme deformasyonu ise mermi ile birlikte ileri doğru hareket eden kesilmiş kısmın oluşmasına neden olmaktadır. Hareket eden bu kopmuş parça etkisi, balistik hızın oldukça üzerindeki hızlarda meydana gelmektedir (Zhu et al., 1992b). Fiber kopması ise merminin fiberi kopma dayanımını aşana kadar zorlaması sonucunda ortaya çıkar.

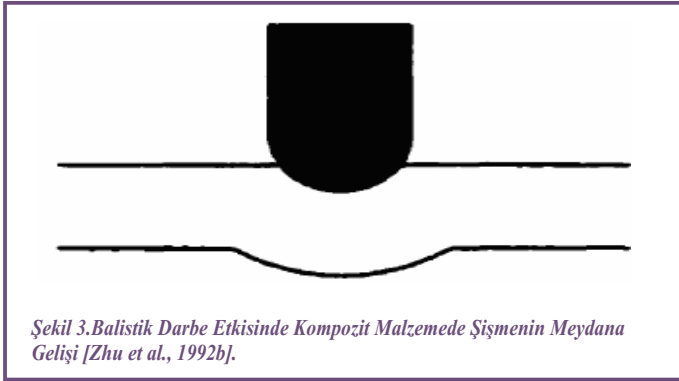
Son olarak mermi tabaka kalınlığı boyunca ilerlerken, kompozit malzemede yanlara ve aşağıya doğru deformasyon oluşturur. Düzlem içinde meydana gelen sıkıştırma; tabakalar arası kesme gerilmelerine neden olurken, düzlem dışına doğru meydana gelen sıkıştırma da tabakalar arası normal gerilmelerin meydana gelmesine neden olur. Bu iki gerilme durumu birlikte delaminasyon oluşumuna ve büyümesine neden olur. Bu arada mermi kompozit malzemeyi delmeye çalışırken merminin önündeki malzeme kalınlığı azalır. Oluşan bu durum mermiye uygulanacak reaksiyon direncinin de azalmasına neden olacaktır. Sonuç olarak hareket eden mermi, tabakanın delinmeye uğramayan kısmında tabakaların ayrılması için daha düşük bir dirençle karşılaşacak ve bunun sonucunda ise tabakanın arka yüzünde oluşan delaminasyon daha da büyüyecektir.

Genelde, balistik hızda darbeye maruz kalan kompozit malzemelerde oluşan hasar tabaka özelliklerine, cismin şekli ve kütesine, çevre şartlarına ve meydana gelen darbenin koşullarına (mermi hızı, kompozit levha sınır şartları v.s) çok bağlıdır (Peijs et al., 1994). Balistik hızlardaki darbede, Polietilen fiberlerden imal edilmiş tabakalı kompozit malzemelerde sönmölenen enerji tabakanın alansal yoğunluğuna ve mermi özelliklerine çok bağlıdır (Lin and Bhatnagar 1992). Segal (1991), farklı tipte fiber ve kompozitler ile yapmış olduğu deneylerde kompozit malzemenin



performansının daha çok fiberin enerjii absorbe etme karakterine bağlı olduğunu, matris malzemesine ise daha az bağlı olduğunu gözlemlemiştir. Segal ayrıca yüksek alansal yoğunluk ve yüksek fiber hacim oranına sahip kompozit malzemelerin daha iyi balistik performansa sahip olduğu sonucuna varmıştır.

Birçok araştırmacı balistik hızda darbeye maruz kalan tabakalı kompozit malzemelerde çarpan cismin altında bir şişkinlik oluştuğunu gözlemlemiştir (Zhu et al., 1992b,a; Lee and Sun, 1993; Wu et al., 1994; Frissen et al., 1995; Goldsmith et al., 1995; Vinson and Walker, 1995; Wu and Chang, 1995). Şekil 3'de, oluşan bu şişkinliğin düşük hızlı darbedeki ile benzerlik gösterdiğini, fakat daha küçük bir bölgede meydana geldiğini göstermektedir. Buna ilave olarak (Zhu et al., 1992b) Kevlar®-29 fiberlerden imal edilmiş kompozit malzemeden oluşan hasarın arka yüzeye doğru konik şekilde geliştiğini gözlemlemiştir.



Darbe Sonucunda Delaminasyon Oluşumu ve Yayılması

Delaminasyon, tabakalı kompozit malzemeyi meydana getiren her bir katmanın ayrılması olarak tanımlanır. Ayrılma her bir katman arasında bulunan ve katmanlar arası yüzey adı verilen bölgedeki ince matris malzemesinde meydana gelir. Tabakalı kompozit malzemede oluşan hasar türleri arasında delaminasyon, genellikle en baskın ve ciddi hasar türü olarak kabul edilir (Sela and Ishai, 1989; Wang et al., 1995). Balistik darbeye maruz kalan tabakalı kompozit malzemelerde delaminasyon oluşumu ve ilerlemesi önemli bir hasar türü olarak kabul edilse bile, oluşan delaminasyonun uzunluğu ve darbe esnasında ilerlemesi hakkında halen sınırlı ölçüde bilgi mevcuttur.

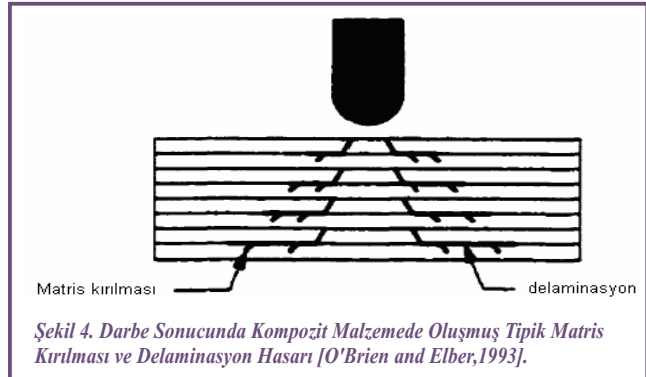
Delaminasyonlar katman ara yüzeylerinde ve matris kırılmalarının birbiriyle kesiştiği noktalarda meydana gelir (Lin and Lee, 1990; Choi Lammerant and Verpoest, 1996). Katman ara yüzeyine doğru ilerleyen bir matris kırılması genellikle kritik matris kırılması olarak adlandırılır. Choi et al. (1991b) yapmış oldukları çalışmaya dayanarak ilk kritik matris kırılmasının meydana gelmesi için darbe enerjisinin bir eşik değerinin olması gerektiğini savunmuşlardır. Lin and Lee (1990) yaptıkları çalışmada ilk kritik matris kırılmasının en alt

katmanda meydana geldiğini ve bu kırılmaların daha sonra en alt katmanda delaminasyon oluşumuna neden olduğunu tespit etmişlerdir. Darbeye maruz kalmış tabakada baskın tek bir matris kırılmasından ziyade benzer birçok matris kırılmasının oluşması eğilimi çok sayıda olası delaminasyonun meydana gelmesine neden olacaktır.

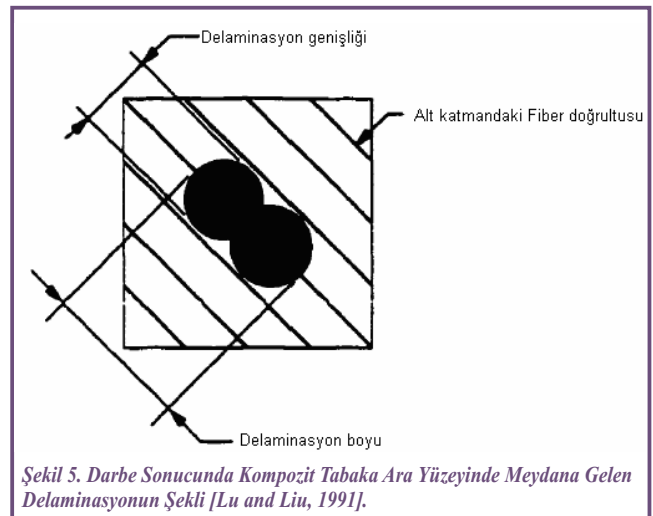
Delaminasyon büyümesi, genellikle katman içerisindeki matris kırılmasının katman ara yüzeyine ulaşması olarak kabul edilir ve ilerleme yönü genellikle darbe bölgesinden uzaklaşacak şekildedir (Joshi and Sun, 1987). Katman içerisinde ve katmanlar arasında meydana gelen matris kırılmaları malzemenin yapısal performansını etkileyen karmaşık matris kırılma ağı oluşturacak şekilde etkileşirler.

Şekil 4, darbe sonucunda kompozit malzemede meydana gelen tipik matris kırılması ve delaminasyon hasarı oluşumunu göstermektedir. Delaminasyon bölgesi genellikle darbenin meydana geldiği bölgenin yakınılarında ve hemen altındadır ve darbe merkezinden uzaklaşacak şekilde hareket eder. O'Brien and Elber (1993) yaptıkları çalışmada koni şeklinde oluşan bu matris kırılmalarının ve daha sonra oluşan delaminasyonların darbe esnasında kompozit malzemede meydana gelen yüksek enine kesme gerilmelerinden dolayı oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Şekil 5, katman ara yüzeyindeki bir delaminasyonun şeklini



Şekil 4. Darbe Sonucunda Kompozit Malzemede Oluşmuş Tipik Matris Kırılması ve Delaminasyon Hasarı [O'Brien and Elber, 1993].



Şekil 5. Darbe Sonucunda Kompozit Tabaka Ara Yüzeyinde Meydana Gelen Delaminasyonun Şekli [Lu and Liu, 1991].

katmanların üst üste diziliş biçimine bağlı olduğunu göstermektedir. Gözlemlenen en yaygın şekil uzayan bir elips tipindedir. Delaminasyonun uzayan kısmı arayüzeyin altında kalan katmandaki fiber doğrultusuna hemen hemen paraleldir (Lu and Liu, 1991; Hung et al., 1995). Delaminasyonun bu anizotropik şekilde ilerleyişi komşu katmanlardaki eğilme rijitliklerinin birbiriyle farklı olmasından ileri gelmektedir (Hung and Liu, 1989).

Delaminasyon oluşumuna ve ilerlemesine karşı direnç genellikle düşüktür (Briscoe and Williams, 1993). Ayrıca, kompozit tabakaların düzlem içi hasar kriterlerine göre hesaplanan mukavemet değerlerinin delaminasyonlar nedeniyle daha alt seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. (Sela and Ishai, 1989; Hung et al., 1995). Delaminasyon değişik yüklenme koşullarına bağlı olarak oluşur ve ilerleyebilir (Poon et al., 1993; Bolotin, 1996).

Balistik darbede cismin kompozit içerisine nüfus etmesi de delaminasyon oluşumuna katkıda bulunur. Darbeye maruz kalan bölgede malzemenin düşey yönde deformasyonuna ilave olarak yatay yönde de deformasyon oluşur. Bu iki deformasyon türü malzemede düzlem içi ve düzlem dışı sıkıştırmanın meydana gelmesine neden olur. Düzlem içi sıkıştırma sonucunda kompozit malzemede tabakalar arası kesme gerilmeleri oluşurken, düzlem dışı sıkıştırmadan dolayı da tabakalar arası normal gerilmeler oluşur. Bu her iki tip gerilme durumu da kompozit malzemede tabakalar arası delaminasyonun meydana gelmesine neden olur.

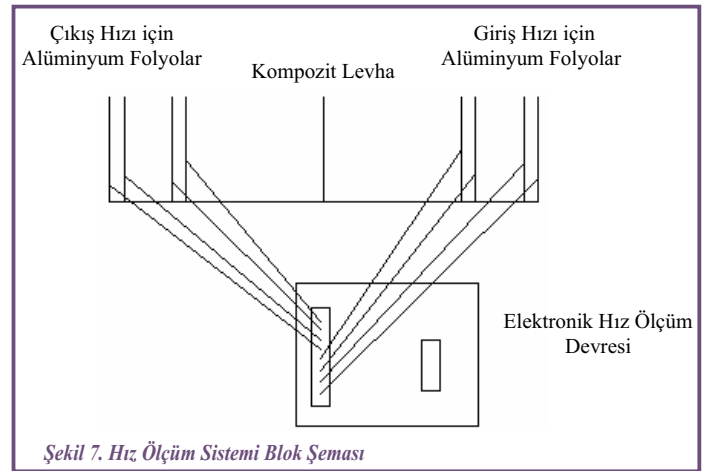
Şekil 6'da, balistik hızda çarpan cisim kompozit malzemenin daha alt kısmındaki katmanları birbirinden ayırmaya çalıştığını ve bundan dolayı bu kısımlardaki delaminasyonların daha fazla ilerleyeceği görülmektedir.



YÜKSEK HIZLI DARBEDE HASAR OLUŞUMUNUN DENEYSEL İNCELENMESİ

Balistik darbe sonucunda tabakalı yapıdaki kompozit malzemede yukarıdaki bölümlerde açıklanan hasar türleri ve oluşumu hakkında daha iyi bilgiye sahip olabilmek amacıyla bir dizi deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde, değişik tabaka sayılarında tek

yönlü ve 0/90 açısız yönelme kombinasyonlarına sahiptir. Kompozit levhaların fiber malzemesi keklar ve tek yönlüdür. Matris malzemesi olarak sertleştirici ile birlikte epoksi kullanılmıştır. Kullanılan bu malzemelerin fiber-matris-sertleştirici oranları Tablo 1'de görülmektedir. Kompozit levhalar el yatırma yöntemiyle imal edilmiş ve 8 saat süreyle sabit basınç ve sıcaklık altında tutulduktan sonra matris malzemesinin iyice sertleşmesi için en az 10 gün oda koşullarında bekletilmiştir. Deneylerde hız ölçümü Şekil 7'de görülen özel hız ölçüm sistemi kullanılmıştır. Bu düzenekte, kompozit levhaların giriş ve çıkışlarına yerleştirilen alüminyum folyoların delinmesi sonucunda oluşan kısa devre vasıtasıyla mermi giriş ve çıkış hızları tespit edilmektedir. Deney sonucunda ölçülen giriş çıkış hızları Tablo 2'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan mermiler 7.62 mm çapında ve 8gr ağırlıkta olup Şekil 8'de görülmektedir. Tablo 2'de verilen çarpışma hızlarında kompozit levhalarda oluşan hasar Şekil 9'da olduğu gibi gerçekleşmiştir.



Tablo 1. Kompozit Levha Fiber-Matris-Sertleştirici Oranları

0/90 12 Tabaka			
KEVLAR TOPLAM AĞIRLIK (GR)	141.64		
KEVLAR+MATRİS (GR)	235.43		
EPOKSİ+SERTLEŞTİRİCİ (GR)	93.79	%78 EPOKSİ	%22 SERTLEŞTİRİCİ
0/90 16 Tabaka			
KEVLAR TOPLAM AĞIRLIK (GR)	196.06		
KEVLAR+MATRİS (GR)	319.31		
EPOKSİ+SERTLEŞTİRİCİ (GR)	141.31	%78 EPOKSİ	%22 SERTLEŞTİRİCİ

Tablo 2. Kompozit Levha Fiber-Matris-Sertleştirici Oranları

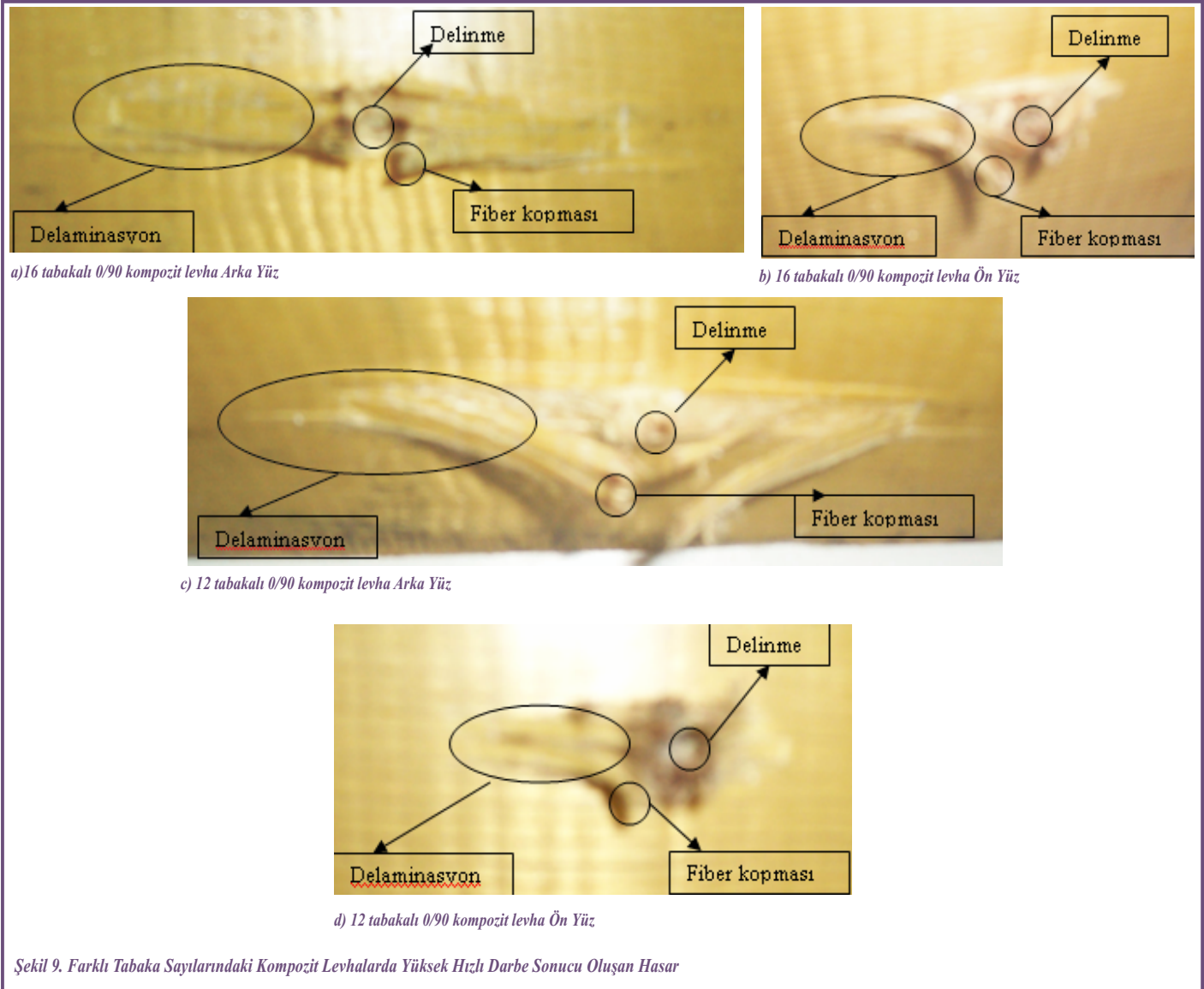
Kompozit Levha Tabaka Sayısı	İlk Hız (m/s)	Son Hız (m/s)	Giriş Enerjisi (J)	Çıkış Enerjisi (J)	Sönümlenen Enerji (J)
12	820,3	800,4	2691,56	2562,56	129,04
16	829,8	805,3	2754,27	2594,03	160,27

SONUÇ

Yüksek hızlı darbeye özellikle balistik limit üzerindeki hızlarda kompozit malzemede oluşan hasar delinme, fiber kopması ve delaminasyon oluşumu şeklindedir. Kompozit malzemede, cismin çarptığı ön yüzeyde oluşan delaminasyon, plakanın arka yüzeyinde oluşuna göre daha bölgeseldir. Şekil 7'den anlaşılacağı üzere, her iki numunedeyde arka yüzeylerde oluşan delaminasyon ön yüzlerde oluşana göre daha geniş bir alana yayılmıştır. Mermi başlangıçta daha kalın bir malzeme direnciyle karşılaşırken, delinme gerçekleştikçe bu kalınlık ve dolayısıyla direnç azalmaktadır. Bu duruma ilave olarak çarpışma esnasında, plaka arka yüzeyinde mermi hareket doğrultusunda bir şişme meydana gelmektedir. Bu durum, arka yüzeyde daha büyük eğilme gerilmelerine neden olmakta ve bu yüzeyde daha geniş alana yayılan delaminasyon oluşmaktadır. Kompozit levhada her iki yüzeyde meydana gelen delinme ise mermi çapına eşit bir büyüklükte gerçekleşmiştir.



Şekil 8. Deneylerde Kullanılan Mermiler



Şekil 9. Farklı Tabaka Sayılarındaki Kompozit Levhalarda Yüksek Hızlı Darbe Sonucu Oluşan Hasar

KAYNAKÇA

1. **Critescu, N., Malvern, L., and Sierakowski, R.,** 1975, Failure mechanisms in composite plates impacted by blunt-ended penetrators, Foreign Object Impact Damage to Composites, American Society for Testing and Materials, 159-172.
2. **Sela, N. and Ishai, O.,** 1989, Interlaminar Fracture Toughness and Toughening of Taminated Composite Materials, A review, Composites, 20(5):423-435.
3. **Wang, Y., Li, J., and Zhao, D.,** 1995, Mechanical Properties of Fiber Glass and Kevlar Woven Fabric Reinforced Composites, Composites Engineering, 5(9):1159-1175
4. **Martin, R.,** 1996, Interlaminar Fracture Characterization, Key Engineering Materials, 120-121:329-346.
5. **Lin, H. and Lee, Y.,** 1990, Impact-induced fracture in Laminated Plates and Shells, Journal of Composite Materials, 24:1179-1199.
6. **Lammerant, L. and Verpoest, I.,** 1996, Modelling of the Interaction Between Matrix Cracks and Delaminations During Impact of Composite Plates, Composites Science and Technology, 56:1171-1178.
7. **Choi, H., Downs, R., and Chang, F.,** 1991b, A new Approach Toward Understanding Damage Mechanisms and Mechanics of Laminated Composites Due to Low-Velocity Impact: part II - Analysis, Journal of Composite Materials, 25:1011-1038.
8. **Joshi, S. and Sun, C.,** 1987, Impact-Induced Fracture in a Quasi-Isotropic Laminate, Journal of Composite Technology and Research, 9(2):40-46.
9. **O'Brien, T. and Elber, W.,** 1993, Delamination and Fatigue of Composite Materials: a Review, Proceedings of the 9th International Conference on Composite Materials, 2.1-2.11.
10. **Lu, X. and Liu, D.,** 1991, Finite Element Analysis of Strain Energy Release Rate at Delamination Rate at Delamination front, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 10(3):279-229.
11. **Hung, K.S., Nilsson, L., and Zhong, Z.H.,** 1995, Numerical studies on the delamination mechanism in laminated composites under impact, Proceedings of ICCM-10, Canada, 623-630.
12. **Briscoe, B. and Williams, D.,** 1993, Interlaminar Fracture Toughness of Aramid/epoxy Laminates, Composites Science and Technology, 46:277-286.
13. **Frissen, R., Govaert, L., and Peijs, T.,** 1995, Modelling of the Ballistic Impact Behaviour of Polyethylene-Fibre Reinforced Composites, Proceedings of ICCM-10, Canada, 759-766.
14. **Lee, B., Song, J., and Ward, J.,** 1994, Failure of Spectra Polyethylene Fiber-Reinforced Composites Under Ballistic Impact Loading, Journal of Composite Materials, 28(13):1202-1226.
15. **Langlie, S. and Cheng, W.,** 1989, Numerical Simulation of High Velocity Impact on Fibre-Reinforced Composites, ASME Pressure Vessels and Piping Conference, USA, 51-64.
16. **Zhu, G., Goldsmith, W., and Dharan, C.,** 1992a, Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles - II. Analytical Model, International Journal of Solid and Structures, 29(4):421-436.
17. **Zhu, G., Goldsmith, W., and Dharan, C.,** 1992b, Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles - I. Experimental Investigation, International Journal of Solid and Structures, 29(4):399-420.
18. **Lee, B., Song, J., and Ward, J.,** 1994, Failure of Spectra Polyethylene Fiber-Reinforced Composites Under Ballistic Impact Loading, Journal of Composite Materials, 28(13):1202-1226.
19. **Zee, R. and Shieh, C.,** 1993, Energy Loss Partitioning During Ballistic Impact of Polymer Composites, Polymer Composites, 14(3):265-271.
20. **Wu, E., Tsai, C.Z., and Chen, Y.C.,** 1994, Penetration Into Glass/epoxy Composite Laminates, Journal of Composite Materials, 28(18):1783-1802.
21. **Wu, E. and Chang, L.C.,** 1995, Woven Glass/Epoxy Laminates Subject to Projectile Impact, International Journal of Impact Engineering, 16(4):607-619.
22. **Goldsmith, W., Dharan, C., and Chang, H.,** 1995, Quasi-Static and Ballistic Perforation of Carbon Fiber Laminates, International Journal of Solids and Structures, 32(1):89-103.
23. **Peijs, T., Smetts, E., and Govaert, L.,** 1994, Strain Rate and Temperature Effects on Energy Absorption of Polyethylene and Carbon Fibres, Advanced Composite Materials, 1(1):35-54.
24. **Langlie, S. and Cheng, W.,** 1989, Numerical Simulation of High Velocity Impact on Fibre-Reinforced Composites, ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Honolulu, HI, USA, 51-64.
25. **Lin, L. and Bhatnagar, A.,** 1992, Ballistic energy absorption of composites -III, 24th International SAMPE Technical Conference, T291-T306.
26. **Segal, C.,** 1991, High-Performance Organic Fibers, Fabric, and Composites for Soft and Hard Armor Applications, 23rd International SAMPE Technical Conference, 651-660.
27. **Vinson, J. and Walker, J.,** 1995, Ballistic Impact Into Composite Material Structures, Proceedings of the 96th AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, New Orleans, LA, 1924-1931