İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENTEGRE BİR ZIRHIN YÜKSEK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uçak Müh. Evren ÖZŞAHİN

Anabilim Dalı : UÇAK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : UÇAK MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2003

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENTEGRE BİR ZIRHIN YÜKSEK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uçak Müh. Evren ÖZŞAHİN

511001135

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Süleyman TOLUN
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Zahit MECİTOĞLU
Yrd. Doç. Dr. Vedat DOĞAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Ocak 2003

OCAK 2003

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın ortaya çıkmasındaki yönlendirici ve cesaret verici destek ve yardımlarından ötürü tez danışmanım Prof. Dr. Süleyman TOLUN'a; sayısal modelleme için faydalanılan ABAQUS/Explicit sonlu elemanlar yazılımının kullanılabilmesi konusundaki kıymetli yardımlarından dolayı Uçak Müh. Hüseyin DENLİ ve Uçak Müh. Orhan ÇİÇEK'e; ve her zaman yanımda hissetmekten mutlu olduğum aileme teşekkür ederim.

Ve elbette, hayatımın her anında olduğu gibi bu çalışma boyunca da sevgi, sabır ve desteğini hiç eksik etmeyen sevgili eşim Elif'e sonsuz teşekkürler.

Aralık 2002 Evren ÖZŞAHİN

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ **v**
ŞEKİL LİSTESİ **vi**
ÖZET **viii**
SUMMARY **ix**

1. GİRİŞ **1**

2. ÇARPMA MEKANİĞİ **4**
2.1. Giriş 4
2.2. Temel Yasalar 5
2.2.1. Kütlenin korunumu 5
2.2.2. Momentumun korunumu 5
2.2.3. Enerjinin korunumu 5
2.3. Penetrasyon Mekaniği 6
2.4. Analitik Modelleme 8
2.4.1. Deformasyon enerjisi 9
2.4.2. Balistik perforasyon 10
2.4.3. Momentum ve enerji dengeleri 11

3. BALİSTİK ÇARPMA **13**
3.1. Giriş 13
3.2. Balistik Limit ve Son Hızın Belirlenmesi 14
3.3. Deformasyon Tarzları 18
3.4. Seramik-Kompozit Zırhlar 18

4. ENERJİ EMİŞ MEKANİZMALARI **20**
4.1. Giriş 20
4.2. Düşük Hızlı Çarpma 21
4.3. Yüksek Hızlı Çarpmaya Maruz Kalan Entegre Zırh 23

5. KOMPOZİT BİR PLAĞA ÇARPMA YÜKLERİNİN ETKİSİ **31**
5.1. Giriş 31
5.2. Örneklerin Üretimi ve Malzeme Testleri 32
5.3. Modelde Yapılan İdealizasyonlar 33
5.4. Lokal Hasar Mekanizması 34
5.5. Sonuçlar 35

6. SAYISAL UYGULAMA **40**
6.1. Giriş 40
6.2. Zırhın Genel Yapısı 41
6.3. Sonlu Elemanlar Yazılımı : ABAQUS/Explicit 43
6.4. Matematiksel Yaklaşım 44
6.5. Modelin Oluşturulması 45

6.6. Analiz 49
6.7. Sonuçlar 64

KAYNAKLAR **67**

ÖZGEÇMİŞ **70**

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri..... 22
Tablo 5.1. Kevlar® elyaf ve polyester reçinenin malzeme özellikleri..... 32
Tablo 5.2. Hesaplarda kullanılan parametreler..... 36
Tablo 5.3. Polyester/ Kevlar® kompozitlerin teorik ve deneysel balistik limit değerleri..... 37
Tablo 6.1. Malzeme özellikleri..... 42

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Kinetik enerji penetrasyonu..... 6
Şekil 2.2 : Gerilme dalgası etkileri..... 7
Şekil 2.3 : Düşük hızlı çarpma davranışı..... 7
Şekil 2.4 : Balistik limitin üzerindeki çarpmalar..... 8
Şekil 2.5 : Balistik çarpma..... 10
Şekil 3.1 : Merminin ilk ve son kinetik enerjileri..... 15
Şekil 3.2 : Deformasyon tarzları a) kayma b) katman ayrılması..... 17
Şekil 3.3 : Entegre zırh örneği..... 19
Şekil 4.1 : MWK ürünlerin şematik gösterimi a)BTC b)QTC..... 21
Şekil 4.2 : Enerji emiş mekanizmaları a)BTC b)QTC c)UD d)Örülü.. 23
Şekil 4.3 : Entegre zırh..... 24
Şekil 4.4 : Enerji dağılımı..... 24
Şekil 4.5 : Merminin yer değiştirme grafiği..... 25
Şekil 4.6 : Maksimum σ_z dağılımı..... 26
Şekil 4.7 : Kalınlık boyunca σ_z dağılımı a) $t=2.4\times10^{-5}$ s b) $t=9.9\times10^{-5}$ s.... 27
Şekil 4.8 : τ_{yz} dağılımı..... 28
Şekil 4.9 : Bağıl yer değiştirme grafiği..... 29
Şekil 4.10 : Arka yüzeyde σ_x gerilme dağılımı..... 29
Şekil 5.1 : Kalınlık yönündeki dinamik test sonuçları
a) Polyester reçine b) Kevlar®-Polyester plakalar..... 33
Şekil 5.2 : Konik merminin çarptığı plak için idealize edilmiş şişme formu..... 34
Şekil 5.3 : Katman ayrılması..... 35
Şekil 5.4 : 116 m/s hızla çarpan merminin kinematik geçmişi
a) Yer değiştirme b) Hız c) Yavaşlama..... 36
Şekil 5.5 : 200 m/s hızla çarpan merminin kinematik geçmişi
a) Yer değiştirme b) Hız c) Yavaşlama..... 37
Şekil 5.6 : Deneysel ve teorik balistik limit değerlerinin karşılaştırılması..... 38
Şekil 5.7 : Merminin deneysel ve teorik çıkış hızlarının karşılaştırılması..... 38
Şekil 6.1 : Zırhın geometrisi..... 43
Şekil 6.2 : Modelde kullanılan 3-boyutlu, katı eleman (C3D8R)..... 46
Şekil 6.3 : Sonsuz eleman (CIN3D8)..... 46
Şekil 6.4 : Sınır koşulları..... 47
Şekil 6.5 : Eksenel simetrik elemanlar (CAX4R)..... 47
Şekil 6.6 : Merminin geometrik şekli..... 48
Şekil 6.7 : Modelin ağ yapısı (mesh generation)..... 49
Şekil 6.8 : Sistemdeki toplam enerji..... 50
Şekil 6.9 : Kinetik enerji..... 50
Şekil 6.10 : Merminin kinematik geçmişi
a) Yer değiştirme b) Hız c) Yavaşlama..... 51
Şekil 6.11 : Enerji dağılımı..... 52

Şekil 6.12 : Zırhın 75 μs anındaki görüntüsü..... 53
Şekil 6.13 : Çarpma yönündeki σ_z gerilme dağılımları
a) Seramik-Kauçuk b) Kauçuk-Kevlar®..... 54
Şekil 6.14 : τ_{xy} kayma gerilmeleri..... 55
Şekil 6.15 : Arka yüzeydeki σ_x gerilmeleri..... 56
Şekil 6.16 : Enerji dağılımları (CNF2)
a) Enerji emilişi b) Kinetik enerji..... 57
Şekil 6.17 : Merminin kinematik geçmişi (CNF2)
a) Yer değiştirme b) Hız c) Yavaşlama..... 58
Şekil 6.18 : Arayüzeylerdeki σ_z gerilme dağılımları (CNF2)
a) Kevlar®-Kauçuk b) Kauçuk- Seramik..... 59
Şekil 6.19 : Yüksek hızlardaki çarpmalar için deformasyonlar (CNF3)
a) V_0=400 m/s b) V_0=450 m/s c) V_0=500 m/s..... 61
Şekil 6.20 : Kinetik enerji değişimleri (CNF3)
a) V_0=400 m/s b) V_0=450 m/s c) V_0=500 m/s..... 62
Şekil 6.21 : Enerji dağılımları (CNF3)
a) V_0=400 m/s b) V_0=450 m/s c) V_0=500 m/s..... 63

ENTEGRE BİR ZIRHIN YÜKSEK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI

ÖZET

Yüksek hızlı çarpma yükleri altındaki entegre bir zırhın davranışlarının incelendiği bu çalışmada; çarpma mekaniği ile ilgili genel kavramlar ve oluşturulacak bir modelde kullanılacak temel fiziksel yaklaşımlar açıklanmış, balistik çarpma konusunda yapılacak bir çalışmanın hareket noktaları ile incelenecek ana göstergeler ve yapıda oluşacak deformasyonların genel yapısı hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca kinetik enerjinin deformasyon enerjisine dönüşmesinde çarpmaya maruz kalan yapının rolü konusunda literatürde yer alan bazı çalışmalar ele alınmıştır.

Konuya bu genel bakışın ardından, tasarlanması düşünülen zırhın seramik-kompozit esaslı entegre bir yapıda olmasına karar verilmiştir. Seramik ön yüzey, yüksek çarpma mukavemeti ile merminin kinetik enerjisinin emilmesini sağlar ve mermide meydana getireceği form değişikliği ile penetrasyonu zorlaştırır. Kompozit arka tabakada ise enerji emiş kapasitesi yüksek bir yapı olarak organik elyaf uygun bir seçimdir.

Çalışmada dinamik modelleme için ABAQUS/Explicit sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Modelde üç boyutlu, 8 düğüm noktalı, düzgün katı elemanlar ve sınır şartları için sonsuz elemanlar kullanılmıştır. Simetri özelliğinden yararlanılarak yapının yarısı modellenmiştir. Rijid bir mermi kullanılarak, belirlenen çarpma şartları için dinamik çözüm yapılmış ve modelin hız, yer değiştirme ve gerilme dağılımları incelenmiştir.

Elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi ve değerlendirilebilmesi için zırhın katman sıralaması ve merminin çarpma hızları değiştirilerek farklı konfigürasyonlar oluşturulmuş ve analizler tekrarlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda; mermi ile ilk temas eden yüzey olarak kompozit tabaka seçildiğinde penetrasyon derinliğinin çok arttığı ve gerilmelerin daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Çarpma hızındaki artışların da zırh tarafından korunan personel ya da teçhizatın güvenliğini tehdit edecek sonuçlara neden olduğu belirlenmiştir. Bu bulguların ışığında, analizi yapılan zırhın balistik olarak uygun bir konfigürasyonda olduğu sonucuna varılmıştır.

RESPONSE OF AN INTEGRAL ARMOR UNDER HIGH VELOCITY IMPACT LOADS

SUMMARY

In this study, response of an integral armor under high velocity impact loads was investigated. General concepts about impact mechanics and basic physical approaches to be used in model were explained. Information about basic points to start and main subjects to be investigated in a study about ballistic impact and modes of deformation in the structure during impact were given. Besides, the role of structure subjected to high velocity impact loads about changing the kinetic energy into the deformation energy was taken up from some studies in literature.

After this overview, it was decided that armor to be designed was configuration of ceramic-composite based. Ceramic upper layer is resistant to high velocity impact and provides the absorption of impact energy. It also deforms the nose shape of the projectile, thus the penetration gets harder. And organic fiber in composite backing of the structure is convenience as material of high capacity of energy absorption.

In the study, ABAQUS/Explicit finite element software was used for modelling. The structure was modelled using three-dimensional, 8 noded solid elements and infinite boundary elements. Taking advantages of symmetry of the model, half of the target plate was modelled. Using rigid projectile, dynamic explicit solution was obtained for impact conditions determined and velocity, displacement and stress distributions of the model were examined.

To compare and evaluate the results obtained, different configurations were established changing the layer order of the armor and initial velocities of the projectile. Then the new models were reanalysed. As a consequence, when the composite layer was chosen as a surface of first contact with the projectile, it was observed that penetration depth was so high and stresses reached to higher values. Also it was determined that increases in the initial velocities of the projectile caused to the results that threat the safety of the personnel or the equipments protected by the armor. As a conclusion, it was verified that the armor analysed was of convenience configuration for ballistic efficiency.

1.GİRİŞ

Günümüzde yüksek hızlı çarpma mekaniği ile ilgili çeşitli mühendislik uygulamaları mevcuttur. Bunlar askeri konularda olduğu kadar, sivil alanlarda da yoğun olarak yer almaktadır. Balistik uygulamalar ve hava-uzay yapıları konunun en spesifik örneklerini teşkil eder.

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 zorundadırlar. Bu nedenle ele alınan zırhın yapısal olarak spesifik mühimmatların çarpmasından kaynaklanan yükler altında işlevini etkin olarak yerine getirip getirmediği yaygın bir araştırma konusudur.

Yüksek hızlı çarpma konusunda sözü edilen bu geniş uygulama alanına rağmen literatürde yer alan çalışmaların sayısı, düşük hızlı çarpma konusuna oranla oldukça sınırlı bir seviyede kalmaktadır. Bunun en önemli nedeni yüksek hızda deneysel çalışmanın, özellikle ölçme hassasiyeti açısından çeşitli zorluklar içermesi ve dolayısıyla yeni çalışmalara temel oluşturacak verisel altyapının eksikliğidir.

Yüksek hızlı çarpmaya maruz kalan bir zırh ile ilgili olarak yapılacak bir çalışmada problemin anlaşılabilmesi için yapılması gereken ilk şey çarpma boyunca hedefe etki eden yüklerin belirlenebilmesini sağlayacak matematiksel bir model geliştirmektir. Kurulan model, hedef ve merminin hareketlerini ve hasar mekanizmalarını uygun biçimde temsil edebilmelidir. Böylece hedefin dinamik davranışları doğrulukla tanımlanabilir. Birçok çalışmada yapının hareketini modellemek için kuasi-statik yaklaşımdan ve sistemdeki toplam enerjinin korunumu ilkelerinden yararlanılır. Ayrıca daha karmaşık plak teorileri ve iki veya üç boyutlu elastikiyet modelleri de kullanılabilir. Çeşitli kaynaklar kullanılabilecek uygun modelleri açıklamakta ve karşılaştırılmalarını sunmaktadır. Kurulacak model için hangi yaklaşımdan

faydalanılmasının uygun olduğunun belirlenmesi, çalışmanın önemli adımlarından birini oluşturmaktadır.

Yüksek hızlı çarpmayla ilgili incelemelerde enerjinin korunumu, fiziksel eşitliklerin oluşturulması için temel hareket noktasıdır. Bir merminin sahip olduğu kinetik enerji prosesin ilerleyen safhalarında deformasyon enerjisi olarak hedefe aktarılır. Bu bakımdan hedef plağın çarpma yükleri altında gösterdiği enerji emiş davranışları, yapılan çalışmaların önemli bir bölümünü oluşturur.

Yabancı bir maddenin bir yapıya çarpması, malzemenin mukavemetini sınırlandıran bir hasara neden olur. Bu nedenle çarpmaya maruz kalan bir yapının dinamik yükler altındaki davranışları iyi etüt edilmelidir. Bazı çarpmalar küçük bir bölgede deformasyona sebep olurken, bazıları da yapının tamamını etkileyebilir. Kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine ve çarpma şartlarına bağlı olarak birbirlerinden çok farklı tarzlarda deformasyonlar oluşabilir. Ayrıca bir zırh tasarımı söz konusu olduğunda, incelenen çarpma şartlarında yapının perforasyona uğrayıp uğramayacağının bilinmesi, zırh tarafından korunan personel ya da teçhizatın emniyeti açısından çok önemlidir. Bu bakımdan yapılan çalışmanın neticesinde elde edilen bilgilerin deneysel sonuçlarla paralel olması ve yapının dinamik yükler altındaki davranışlarının iyi anlaşılması gerekir.

Günümüzde değişik tipte çarpmaları simüle edebilecek çeşitli test mekanizmaları mevcuttur. Düşük hızdaki çarpmalar için genellikle büyük bir ağırlığın, düşük süratle test edilecek yapı üzerine düşmesi şeklinde tanımlanabilecek olan “drop-weight tester” cihazları kullanılır. Yüksek süratli çarpmalar için ise düşük ağırlıkta bir cismin hava ile çalışan sistemler (gas gun) yardımı ile hedef üzerine yüksek süratle atılması esasına dayanan test sistemleri vardır. Ayrıca çalışmanın odak noktasını oluşturan parametrelerdeki değişimlerin tespit edilmesini sağlayacak ölçme sistemleri de test mekanizmaları dahilinde bir bütün olarak ele alınmalıdır. Matematiksel modelden ve deneylerden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında, modelde kullanılan yaklaşımın doğruluğunun sınanabilmesi için uygun test sisteminin seçimi önemlidir.

Bu çalışmada, literatürde yer alan araştırmaların incelenmesi ile elde edilen bilgiler ışığında, tasarlanması düşünülen zırhın seramik-kompozit esaslı entegre bir yapıya

sahip olmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Seramik ön yüzey hem yüksek çarpma mukavemeti ile merminin sahip olduğu kinetik enerjinin emilmesini sağlar, hem de merminin uç formunda meydana getireceği yapısal deformasyon sayesinde penetrasyonu zorlaştırır. Kompozit arka tabakada ise enerji emiş kapasitesinin yüksek oluşu nedeniyle organik elyaf uygun bir seçim olacaktır. Modelde iki tabaka arasında yine yüksek enerji emiş kapasitesine sahip olan hiperelastik bir malzeme (kauçuk) tercih edilmiştir.

2. ÇARPMA MEKANİĞİ

2.1. Giriş

Çarpma mekaniğini kuasi-statik yükler altındaki rijid veya katı cisimlerin klasik mekaniğindeki daha konvensiyonel disiplinlerden ayıran iki temel özellik vardır. Birincisi, mekanik ve fiziğin temel korunum yasalarına dayalı bütün denklemlerde dikkate alınması gereken atalet etkileridir. İkincisi is problemin analizinde gerilme dalgalarının yayılımı ve tüm çarpma olaylarının birer geçiş (transient) problemi olduğu kabulüdür.

Çarpma problemlerinin çözüm yöntemleri üç ayrı biçimde şekillenebilir. Bunların ilki, çok sayıda deneysel bilginin elde edilip birbirleriyle ilişkilendirildiği ampirik yaklaşımdır. Bu yöntem belirli şartlara sahip olan problemlerin çözümü için kullanışlı bir yöntem olabileceği gibi, var olan deneysel bilgiyi, elde edildiği şartların dışında kalan problem sahalarında kullanmaya çalışmak oldukça zordur ve çözümü imkansız hale getirebilir. İkinci yöntem, çarpmayı simüle edebilecek mühendislik modellerini geliştirmek ve kullanmaktır. Bu yaklaşım, basit (tekil) mekanizmalı tek boyutlu problemlerden, farklı deformasyon tarzlarına sahip, karmaşık, iki veya üç boyutlu çarpma problemlerine kadar değişik alanlarda uygulanabilir. Son yöntem ise problemin, yapının küçük elemanlara bölünüp temel eşitliklerin her eleman için ayrı ayrı uygulanarak çözümüne dayalı olan diskritizasyon metodudur. Uygun olan sayısal çözüm tekniğinin -örneğin sonlu elemanlar veya sonlu farklar yönteminin- kullanılması yakınsak çözümler sağlamakla birlikte çözüm çok zaman alıcıdır; çünkü girdilerdeki her değişiklik için çözümün tekrarlanması gerekmektedir.

Her yöntem kendine has avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Herhangi biri ile tek başına karmaşık bir problemin çözümü arzu edildiği ölçüde uygun sonuç vermeyebileceğinden her üçünün de birlikte kullanılması en doğru yaklaşımdır.

2.2. Temel Yasalar

Gerilme dalga yayılımı, balistik modelleme ve sayısal çözüm içeren çarpma dinamiği konusunda yapılan çalışmaların hemen hemen tamamında fiziğin temel korunum yasalarından faydalanılır; kütlenin korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu.

2.2.1. Kütlenin Korunumu

Çok basit bir ifadeyle, fiziksel bir sistemde ele alınan çözümün her aşamasında sistemin toplam kütlesi sabittir.

$$\int_V \rho \, \partial V = \text{sabit} \tag{2.1}$$

Burada ρ birim hacimde bulunan kütle, yani yoğunluk; V ise hacimdir.

2.2.2. Momentumun Korunumu

Bu korunum yasası farklı şekillerde ifade edilebilir. Temel olarak Newton'un 2nci Kanunu'na dayanır.

$$F = m \frac{\partial v}{\partial t} \tag{2.2}$$

n adet kütleden (***m*****$_i$**) oluşan ve hiçbir dış kuvvete maruz kalmayan kapalı bir sistemde momentumun korunumu şöyle yazılabilir;

$$\sum_{i=1}^{n} m_i v_i = \text{sabit} \tag{2.3}$$

2.2.3. Enerjinin Korunumu

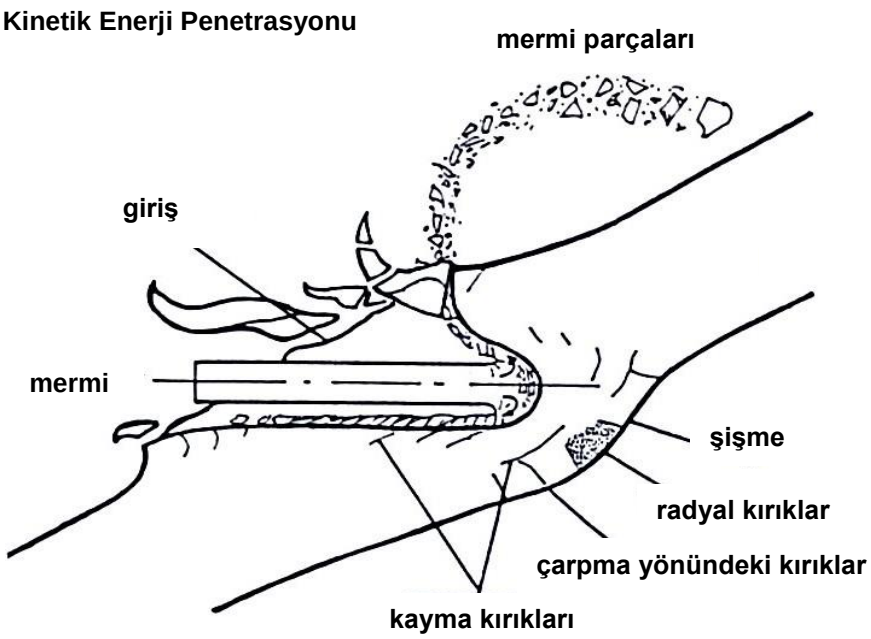
Bu yasayı, sistemi **j** adet ayrık kütleden oluşmuş olarak düşünerek ifade edebiliriz. Başlangıç, yani t=0 anında ***i***, belirli bir zaman anında ise ***f*** alt indisini kullanarak;

$$\sum_j E_i + \sum_j \frac{1}{2} \rho v_i^2 = \sum_j E_f + \sum_j \frac{1}{2} \rho v_f^2 + \mathbf{W} \tag{2.4}$$

yazılabilir. Bu ifadede E sistemde depolanmış olan elastik enerji; W ise sistemin proses boyunca yaptığı toplam iştir.

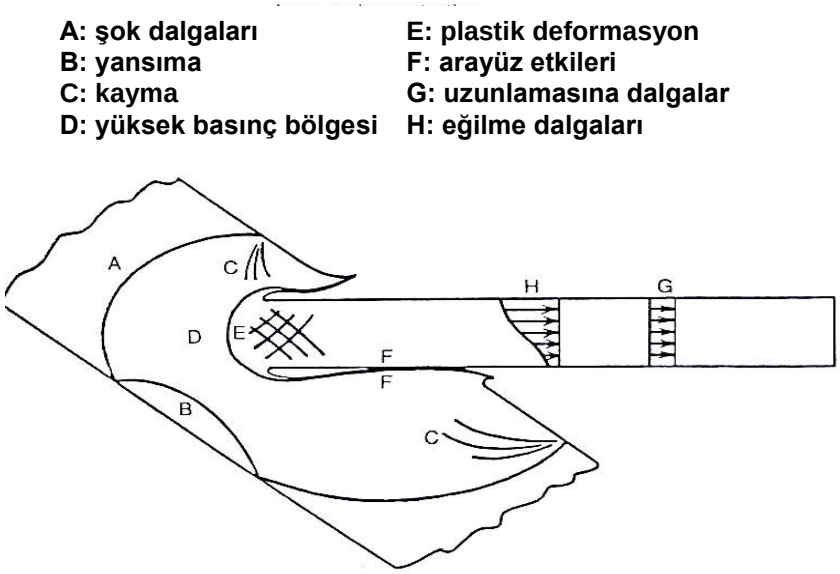
2.3. Penetrasyon Mekaniği

Kinetik enerji penetrasyonu, çok çeşitli problem sahalarında uygulama alanı bulan bir konudur. Bunlar genellikle askeri (balistik) uygulamalar olmakla beraber; yüksek enerji boşalımı ya da kazaya bağlı olarak ortaya çıkan çok yüksek hızda ya da kütledeki partiküllerin ve nükleer atıkların depolanması, zararlı maddelerin taşınma emniyeti, uzay araçlarının meteor çarpmalarından korunması, personel ya da taşıyıcı araçlar için hafif zırh tasarımı gibi konularla ilgili problemleri de kapsar.



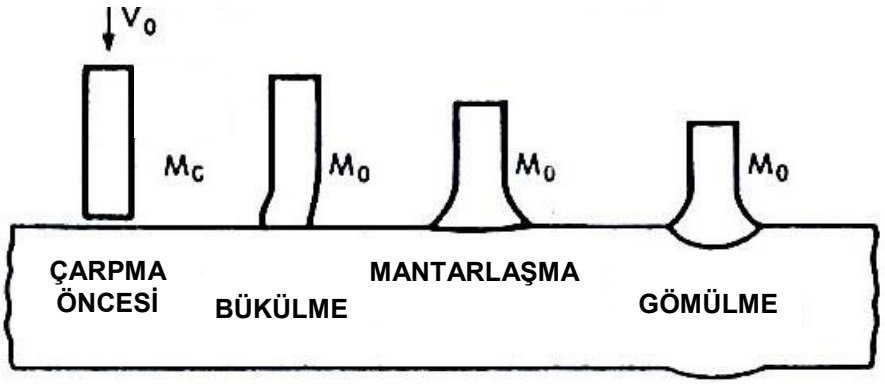
Şekil 2.1 Kinetik enerji penetrasyonu [1]

Bir mermi, hedefin içine girmek (penetrasyon) ya da onu delip geçebilmek (perforasyon) için hareketinden kaynaklanan kinetik enerjiyi kullanır. Bu nokta kinetik enerjili çarpışmaları kimyasal enerji boşalımlarından ayırır. Şekil 2.1 kinetik enerji penetrasyonun gelişimini özetlemektedir [1]. Kavramsal olarak penetrasyon, merminin hedef içine kısmen girmesi, yani hedef içinde durmasıdır. Uygun bir zırh tasarımının elde edilmesini amaçlayan bir çalışmanın temel dayanak noktası da budur. Perforasyon ise penetrasyonun hedefin kalınlığı boyunca devam etmesi, yani merminin hedefi tamamıyla delip geçmesi olarak tanımlanır.



Şekil 2.2 Gerilme dalgası etkileri [1]

Merminin hedefe çarptığı andan itibaren hem mermide hem de hedef cisimde gerilme dalgaları oluşur (Şekil 2.2) [1]. Bu dalgalar çarpma hızı ve malzeme özelliklerine bağlı olarak ses hızı ya da daha yüksek hızlarda hareket ederler. Bunları daha yavaş hızlara sahip olan kayma dalgaları izler. Yüksek çarpma hızlarında serbest yüzeye bağlı olarak çarpma yüzeyinin arkasında, dik çarpmalarda iki boyutlu, açılı çarpmalarda ise üç boyutlu relif dalgaları oluşur. Bunun sonucunda sınır şartlarından dolayı basma yönündeki gerilme dalgaları çekme yönüne döner. Yüksek hızlarda bu dalgaların etkisi düşük hızlardakine oranla daha fazladır.

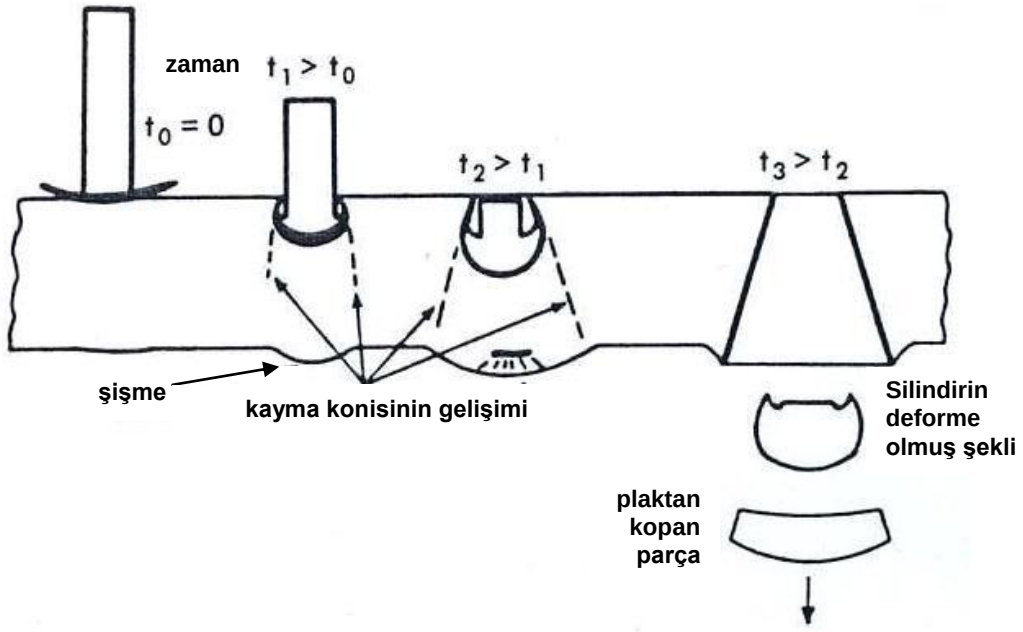


Şekil 2.3 Düşük hızlı çarpma davranışı [1]

Eğer uzun, silindirik bir cisim, balistik limitin (perforasyon için gerekli minimum hız) altında bir hızla hedef yüzeye çarparsa eğilme temayülü gösterir. Çarpma hızı arttıkça plastik deformasyon belirli bir bölgede yoğunlaşır ve silindirin uç kısmı

hedefi delemeden mantar şeklinde deformasyona uğrar. Çarpma daha yüksek bir hızda gerçekleşirse plastik deformasyona ek olarak silindir hedef içine gömülür. Bu proses Şekil 2.3'de özetlenmektedir [1].

Balistik limitin üzerindeki çarpmalarda penetrasyon, çarpma ile eş zamanlı olarak başlar (Şekil 2.4) [1]. Çarpmanın ilk anında yüzeyler arası basınç hem hedef hem de merminin malzeme mukavemetinin çok üzerinde olacağından, merminin ucundaki erozyonla birlikte penetrasyon oluşurken merminin geri kalan kısmı herhangi bir deformasyona uğramadan oluşan kraterde yol alır. Krater giderek derinleşirken, dip kısmı merminin ucundaki deformasyona uygun tarzda genişler ve temas yüzeyinde yüksek kayma gerilmeleri oluşur. Belirli bir zaman sonra malzeme özellikleri, çarpma hızı ve hedefin kalınlığına bağlı olarak hedefin arka yüzeyinde şişme (bulging) ve yayılma şeklinde form değişiklikleri meydana gelir.



Şekil 2.4 Balistik limitin üzerindeki çarpmalar [1]

2.4. Analitik Modelleme

Balistik penetrasyon ve perforasyon süresince mermi ve hedef, temas yüzeyinden başlamak üzere eşit ve zıt yönde kuvvetlere maruz kalırlar. Ara yüzeyden itibaren yayılan dalgalar, mermi ve hedefin içindeki gerilme ve yer değiştirmeleri biçimlendirir ve durumlarında değişikliklere neden olurlar. Mermi; hızının belli bir

miktarını kaybeder, yörüngesinde değişiklikler olur, deforme olabilir, erozyona bağlı olarak ağırlığının bir kısmını kaybedebilir, değişik boyutlarda parçacıkların hedeften kopmasına neden olabilir.

Penetrasyon için model geliştirmek amacıyla kullanılan en yaygın yöntem, deney ve analiz sonuçları ile yapılan iterasyonlardır. Deneysel çalışma modeli şekillendiren önemli bir etkendir. Modelden elde edilen sonuçlar deneysel neticelerle ne kadar örtüşürse kurulan modelin başarısı o kadar yüksek demektir. Aksi halde model hatalı sonuçlar verecektir.

2.4.1. Deformasyon Enerjisi

Serbest uzayda **V** hızı ile hareket eden elastoplastik bir **M** kütlesiyle ağırlık merkezinden çarpışan hareketsiz bir elastoplastik **m** kütlesi düşünelim. Tüm plastik deformasyon oluştuktan sonra ve elastik deformasyon enerjisi serbest kalmadan hemen önce her iki kütle de aynı hıza sahip olacaktır.

$$\boldsymbol{V_r} = \frac{MV}{M+m} \tag{2.5}$$

Son durumdaki kinetik enerjiyi başlangıçtaki kinetik enerjiden çıkaracak olursak, fark bize tüm deformasyon enerjisini verecektir. Bu enerjiye $\boldsymbol{E}_f$ dersek;

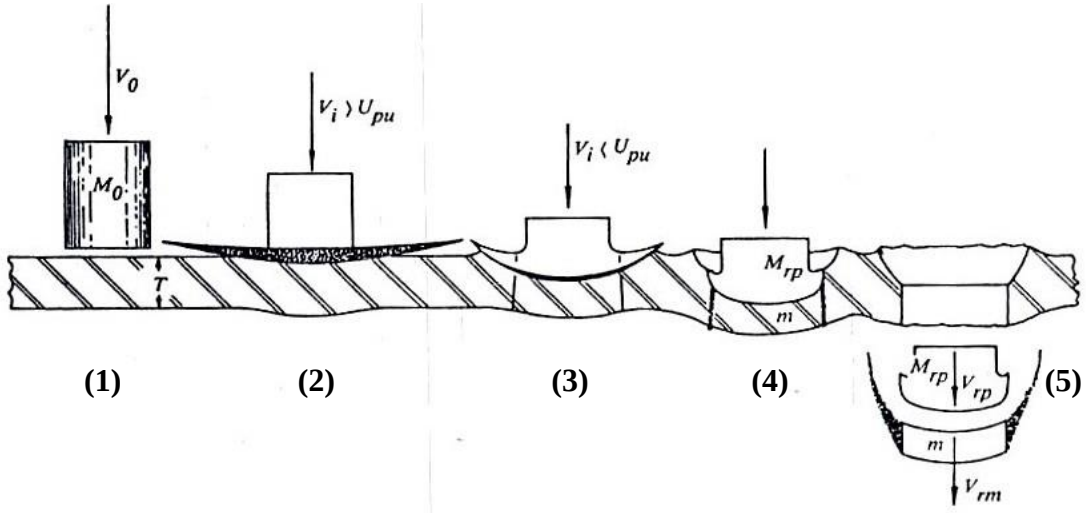
$$\boldsymbol{E}_f = \frac{[m/(M+m)]MV^2}{2} \tag{2.6}$$

Eğer her iki kütle birbirine eşit ise (m=M) deformasyon enerjisi kinetik enerjinin yarısına eşit olacaktır.

Eğer az önceki durumda **m** kütlesi bir plağın **M** kütlesinin çarpma istikametindeki parçası olarak düşünülecek olursa plak tarafından meydana getirilen sınır koşulları deformasyon enerjisinin artmasına neden olur (**E**). Her iki durumdaki deformasyon enerjileri arasındaki fark ($\mathbf{W_s}$) **m** kütlesine plak tarafından uygulanan sınır koşullarından kaynaklanan işi verir. Bahsedilen bu büyüklükler dinamik eşitliklerin geliştirilmesi için çok kullanışlı analitik adımlardır.

2.4.2. Balistik Perforasyon

Çelik bir silindirin, 1 km/s çarpma hızında, yine çelik bir plağı tamamen delip geçişi (perforasyon) Şekil 2.5'de görülmektedir [1].



Şekil 2.5 Balistik çarpma [1]

İlk aşamada $\mathbf{M_0}$ kütlesi ve $\mathbf{V_0}$ ilk hızıyla hareket eden silindir plağa çarpmak üzeredir. Çarpma anında, çarpışma yüzeyindeki ilk hız çelik-çelik çarpışması için $\mathbf{V_0/2}$ mertebesinde olacaktır. Silindirle ara yüzey arasındaki bağıl hız silindir içindeki plastik dalga hızından ($\mathbf{U_{pu}}$) yüksek olduğu sürece plastik dalga silindir içinde yol alamaz. Bunun yerine ses hızına sahip elastik dalgalar silindiri yavaşlatarak onun içinde aşağı-yukarı hareket ederken, şok dalgaları da ara yüzeyin hemen yukarısında kalırlar. Ara yüzeyle şok dalgası arasındaki basınç 2. aşamada görüleceği gibi silindirde ve plakta erozyona sebep olabilecek kadar yüksek değerdedir. Silindirin henüz deformasyona uğramayan diğer kısımları yavaşlar ve bağıl hız, plastik dalga hızının altına düşer, erozyon sona erer, plastik dalga silindir içinde hareket etmeye başlar ve silindirin uç kısmı 3. aşamada olduğu gibi mantar şeklini alır. Plak içindeki kayma gerilmeleri plaktan bir parça koparmaya başladıklarında 4. aşamada siyah bantlarla gösterilen termoplastik bir kayma bölgesi oluşur. Bu bölgedeki ısınma, parçanın plaktan kopmasına neden olur. Deformasyona uğrayan mermi ($\mathbf{M_{rp}}$) ve plaktan ayrılan kütle (**m**) elastik gerilmelerin eski haline dönmesiyle birlikte birbirlerinden bağımsız fakat ortak bir son hızla hareket ederler.

2.4.3. Momentum ve Enerji Dengeleri

Bir plağa $\mathbf{V_0}$ ilk hızıyla dik olarak çarpan bir $\mathbf{M_0}$ kütlesi düşünelim. Kütlenin bir kısmı az önceki bölümde açıklandığı gibi erozyona bağlı olarak kaybolur. Bu kayıp kütlenin sahip olduğu momentumun plağa aktarıldığını varsayalım. Merminin geri kalanı ($\mathbf{M_{rp}}$) **m** kütlesinin plaktan kopmasına neden olur. Elastik gerilmenin boşalmasıyla mermi ve kopan kütle arasında bir bağıl hız meydana gelmeden önce tüm bu kütlelerin son hızı aynıdır; $\mathbf{V_r}$. Bu değer kullanılarak,

$$M_0 V_0 = (M_{rp} + m) V_r + I \tag{2.7}$$

$$\frac{M_0 V_0^2}{2} = \frac{(M_{rp} + m) V_r^2}{2} + \frac{(M_0 - M_{rp}) V_0^2}{2} + \boldsymbol{E_f} + \boldsymbol{W_s} \tag{2.8}$$

yazılabilir. Burada;

$\boldsymbol{M_0}$	**:**	Merminin çarpışma öncesi kütlesi,
$\boldsymbol{M_{rp}}$	**:**	Merminin çarpışma sonrası kütlesi,
$\boldsymbol{m}$	**:**	Plaktan kopan parçanın kütlesi,
$\boldsymbol{V_r}$	**:**	Merminin ve plaktan kopan parçanın ağırlık merkezlerinin çarpışma sonrasındaki hızları,
$\boldsymbol{I}$	**:**	Plaktaki kayma gerilmelerinden dolayı plağa aktarılan impuls,
$\boldsymbol{E_f}$	**:**	Serbest **m** kütlesi ve mermi çarpışmasından oluşan elastoplastik deformasyon enerjisi,
$\boldsymbol{W_S}$	**:**	**m** kütlesinin plak tarafından sınırlandırılması halinde ortaya çıkan elastoplastik deformasyon enerjisidir.

Plaktan kopan kütle ile mermi birbirlerinden ayrıldıktan sonra da $\mathbf{V_r}$ hızıyla hareketlerine devam ederler. 2.6 denklemiyle verilen $\boldsymbol{E_f}$ değeri için aynı denklemde $\boldsymbol{M_0}$ yerine $\boldsymbol{M_{rp}}$ yazılabilir. 2.8 denklemindeki ($\boldsymbol{M_0}$ - $\boldsymbol{M_{rp}}$) değerinin yer aldığı terim merminin kaybolan kütlesinin sahip olduğu kinetik enerjidir.

Eğer $\boldsymbol{M_0}$ teriminin $\boldsymbol{M_{rp}}$ ile değiştirilmiş hali ile 2.6 denklemini $\boldsymbol{E_f}$ için 2.8 denkleminde yerine yazacak olursak $\boldsymbol{W_S}$ değerini elde ederiz.

$$\boldsymbol{W_s} = \frac{M_{rp}V^2\left[M_{rp}/(M_{rp}+m)\right]}{2} - \frac{(M_{rp}+m)V_r^2}{2} \qquad (2.9)$$

Eğer **V** hızını balistik limit ($\boldsymbol{V_{50}}$) olarak yeniden yazacak olursak $\boldsymbol{V_r}$ =0 olacağından;

$$(\boldsymbol{W_s})_{50} = \frac{M_{rp}V_{50}^2\left[M_{rp}/(M_{rp}+m)\right]}{2} \qquad (2.10)$$

elde edilir. $(\boldsymbol{W_s})_{50}$ değerinin tekliği analitik olarak kesindir. Eğer sabit $\boldsymbol{V_{50}}$ hızını denklemin sol tarafını tanım gereği $\boldsymbol{W_s}$ yapan bilinmeyen bir $\boldsymbol{V_x}$ hızı ile değiştirirsek denklem şu hali alır.

$$(\boldsymbol{W_s})_{50} = \frac{M_{rp}V_x^2\left[M_{rp}/(M_{rp}+m)\right]}{2} \qquad (2.11)$$

3. BALİSTİK ÇARPMA

3.1. Giriş

Literatürde balistik çarpma ile ilgili çeşitli tanımlamalar mevcuttur. Merminin hedefi tamamen delip geçmesi, yani perforasyonla sonuçlanan çarpmalar balistik çarpma olarak tanımlanırken, penetrasyonun gerçekleşmediği çarpmalar düşük hızlı çarpma konusunun içinde incelenirler. Düşük hızlı çarpmalar çok geniş çalışma ve inceleme alanı bulduğu halde balistik çarpmalar için aynı şeyi söylemek zordur.

Düşük hızlı çarpma ile ilgili farklı bir tanımlama da gerilme dalga yayılımının hedefin kalınlığından çok az etkilendiği durumlar için yapılır. Merminin hedefle temas ettiği andan itibaren basma ve kayma gerilme dalgaları çarpma noktasından dışarıya doğru yayılmaya başlar, arka yüzeye ulaştığında ise geldiği istikamete doğru yansır. Bu yansımalar kalınlık boyunca belirli bir miktarda gerçekleştikten sonra hedefte de bir hareket söz konusu olur. Deformasyonun, plağın hareketinden sonra gerçekleştiği bu durumlar düşük hızlı çarpma olarak tanımlanırlar.

Balistik çarpmalarla ilgili çalışmalarda merminin son hızının doğru tespit edilmesi oldukça önemli bir konudur. Bu hesap özellikle deneysel incelemelerde oldukça zordur; çünkü mermi ve hedefe ait çok sayıda parçacık çarpma ve penetrasyon esnasında etrafa yayılır. Bu parçacıklar hız ölçümü ile ilgili hissedici mekanizmaları harekete geçirebilir ve hesaplamada hatalara sebep olabilir. Bu zorluğu ortadan kaldırmak için özel birtakım ölçme sistemleri geliştirilmiştir.

Belirli bir hedef ve merminin oluşturduğu özel şartların söz konusu olduğu bir inceleme için perforasyonun gerçekleşmesi için gereken minimum çarpma hızının bilinmesi oldukça önemlidir. Perforasyonu sağlayan bu en düşük hız "balistik limit" olarak tanımlanır. Çarpmaya maruz kalan hedefi oluşturan malzemenin iflasına (failure) neden olan çok çeşitli deformasyon tarzları ve kriterler mevcut olduğundan, balistik limit hesabı genellikle hedefin kalınlık boyunca yaklaşık olarak %50'sinin

penetrasyonu için yapılır. Çarpma hızı balistik limitin üzerine çıktıkça merminin son hızı daha da önem kazanır. Çünkü hedefin arkasında kalan personel ya da teçhizat için ortaya çıkan tehdidin seviyesi bilinmelidir. Balistik limit ile ilgili incelemelerde merminin şekli ve boyutları, çarpma hızı ve hedefin kalınlığı gibi etkenler hesaplamalarda ön plana çıkmaktadır.

Malzemenin iflasına neden olabilecek gerilme, katmanlar arası ayrılma gibi deformasyon tarzları perforasyon için gerekli enerji miktarının, dolayısıyla balistik limitin saptanması ve uygun bir modelin ortaya çıkarılabilmesi için çok iyi belirlenmelidir.

Ağırlığın kritik bir faktör olduğu personel taşıyıcı ve zırhlı araçlar, savaş uçakları ve helikopterler gibi uygulamalarda balistik koruma için özellikle elyaf-kompozitler kullanılırlar. Yüksek hızlı uygulamalarda seramik esaslı bir ön katman ve kompozit arka yüzeyden oluşan çeşitli kombinasyonlar da kullanılmaktadır. Seramik-kompozit kombine bu zırhlar kara araçlarında metalik zırhların yerini almış, havacılık uygulamalarında da kullanılmaya başlanmıştır. Böylece ağırlık tassarrufu konusunda önemli bir kazanım elde edilmiştir. Seramik dış katman aynı zamanda merminin ucunda meydana getirdiği deformasyonla daha küt bir form almasını ve ilk anda oluşan yüksek çarpma yüklerinin daha geniş bir alana yayılmasını, böylece penetrasyonun zorlaşmasını sağlar.

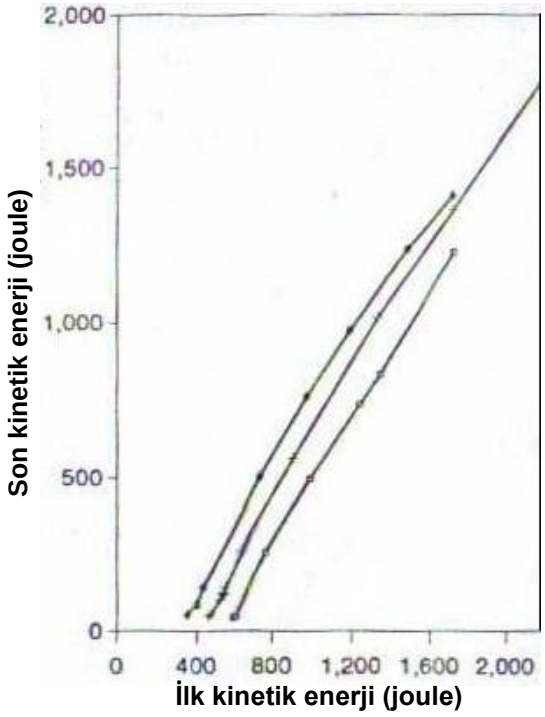
3.2. Balistik Limit ve Son Hızın Belirlenmesi

Balistik limit, belirli bir hedef-mermi kombinasyonu için merminin hedefi tamamen delip geçmesi, yani perforasyonun gerçekleşmesi için gerekli olan en düşük hız olarak daha önce tanımlanmıştı. Bu hızda, yani balistik limitte gerçekleşen bir çarpma olayında merminin son hızı sıfıra (0) eşit olacaktır. Çok sayıda varyasyonun, dolayısıyla her şart için özel bir incelemenin söz konusu olabileceği dikkate alındığında, balistik limit genellikle hedefin %50'sinin penetrasyonu için merminin sahip olması gereken çarpma hızı olarak ele alınmaktadır. İlk hızın balistik limiti geçtiği durumlarda zırhın koruduğu personel ya da teçhizatın emniyeti açısından balistik limit ve son hızın doğru olarak belirlenmesi önemlidir.

Perforasyonla sonuçlanan testlerden elde edilen bilgiler doğrultusunda merminin son hızının çarpma hızına göre lineer olarak değiştiği söylenebilir. Bu noktadan hareketle perforasyon için gerekli olan enerjinin sabit olacağı düşünülerek enerjinin korunumu şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{1}{2}M\nu_i^2 = U_p + \frac{1}{2}M\nu_r^2 \tag{3.1}$$

Burada $\mathbf{U_p}$ perforasyon enerjisi, $\boldsymbol{\nu_i}$ ve $\boldsymbol{\nu_r}$ ise sırasıyla ilk ve son hızlardır. Bu eşitlikten anlaşılacağı gibi perforasyon enerjisi ($\mathbf{U_p}$) hızdan ve çarpma şiddetinden bağımsızdır. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi ilk ve son kinetik enerjilerin gösterildiği grafikler düzgün doğrulardan oluşmaktadır [2].



Şekil 3.1 Merminin ilk ve son kinetik enerjileri [2]

3.1 eşitliğinde, plağın uğradığı deformasyon nedeniyle kaybettiği ağırlığın sahip olduğu kinetik enerji ihmal edilmiştir. Bu kabul özellikle balistik limit civarındaki çarpmalarda oldukça makul bir yaklaşımdır; çünkü merminin son hızı çok düşük ve kopan parçacıklar da küçük olacaktır. Çarpma hızı balistik limitten yüksek oldukça merminin hedeften kopardığı parçalar da daha yüksek hızlarla dışarı atılırlar. Bu durumda bu parçacıkların sahip oldukları kinetik enerjileri ihmal etmek çok doğru bir yaklaşım olmaz. Bu açıklamalardan sonra, $\mathbf{E_i} - \mathbf{E_r}$ **(** ilk enerji – son enerji) eğrilerinin

eğiminin düşük hızlardaki çarpmalarda, yüksek hızlardaki çarpmalara oranla daha düşük olacağı söylenebilir.

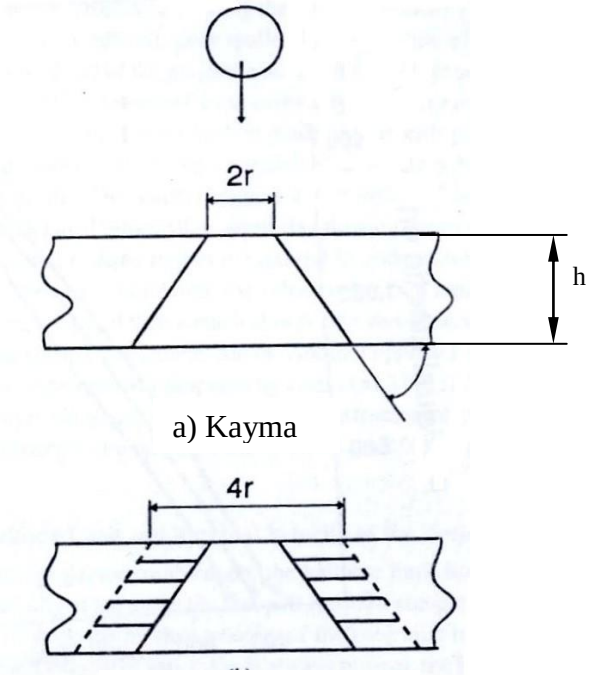
3.1 eşitliği incelenirse hedefin kalınlığı, merminin şekil ve ölçüleri ve malzeme özelliklerinin çok iyi etüt edilmesi gerektiği söylenebilir. Zira bu faktörler perforasyon enerjisi için önemli ölçüde belirleyici olacaktır. Yapılan çalışmalar, hedefin kalınlığı arttıkça balistik limitin de arttığını göstermektedir. Genellikle kompozit plakların alansal yoğunluklarıyla balistik limitin ilişkisinden bahsedilir; bu, yanlış anlaşılmaya oldukça uygun bir açıklamadır, çünkü yoğunluğun yanında malzemenin mekanik özellikleri de önemli bir rol oynamaktadır. Gerçekte diğer parametrelere oranla hedefin kalınlığının balistik limitin üzerindeki etkisi çok daha fazladır. Ayrıca merminin çapı büyüdükçe perforasyon için ihtiyaç duyulan enerji miktarı da artar. Penetrasyon sırasındaki enerji kaybı merminin uç şekline oldukça bağlıdır, çünkü deformasyon tarzları çok farklılıklar gösterir.

Balistik limitin belirlenmesi, araştırmacıların ele aldıkları en karmaşık işlemlerin başında gelmektedir. Merminin hedef kalınlığı boyunca farklı noktalarda oluşturduğu deformasyon tarzları birbirinden farklılıklar gösterir. Bunların bilinebildiği basit çarpma olayları için basit enerji hesapları ile balistik limitin tespit edilmesi mümkün olabilir.

4-16 katmanlı ince bir kompozit için düşük seviyeli bir tahmin metodu Cantwell ve Morton tarafından geliştirilmiştir (1989). Bu metoda göre merminin hedefte ilerlerken meydana getirdiği delik, merminin çapı ölçüsünde başlayan ve 45°lik açı ile genişleyen konik bir forma sahiptir (Şekil 3.2.a) [2]. Yapının içinde depolanan şekil değiştirme (strain) enerjisi ve katman ayrılması meydana getirmek için ihtiyaç duyulan enerji ihmal edilirse bu deliğin oluşması için gerekli olan enerji için 3.2 eşitliğindeki gibi bir yaklaşım yapmak mümkündür;

$$A = \sqrt{2}\,\pi h(h+2r) \tag{3.2}$$

Burada **h** plağın kalınlığı, **r** ise merminin yarıçapıdır. Bu eşitlik deneysel verilerle de desteklenebilir sonuçlar vermektedir. Çarpışma noktası civarında gözlenen katman ayrılması alanları ölçülebilir düzeylerdedir. Bu ayrılmaları meydana getirecek enerji ayrılma bölgesinin yine konik bir formda olduğu kabulü ile hesaplanabilir (Şekil 3.2.b) [2].



a) Kayma

b) Katman ayrılması

Şekil 3.2 Deformasyon tarzları [2]

Zhu, merminin çarpışma sonrası hareketi ve Kevlar®-Polyester plakların balistik limitlerinin belirlenmesinde kullanılabilecek bazı modeller üzerinde çalışmalar yapmıştır (1992). Bu çalışmalarda çarpma olayı üç bağımsız bölümde incelenmiştir; giriş, perforasyon ve çıkış. Katmanlı kompozit plak teorileri ve merminin girişi, arka yüzeyin şişmesi (bulging), elyaf deformasyonu ve iflası, katman ayrılması ve sürtünmeden oluşan enerji emiş mekanizmaları kullanılarak global deformasyonlar hesaplanmış, deneysel sonuçlarla modelden elde edilen sonuçların oldukça uyumlu oldukları gözlenmiştir.

Czarnecki, grafit-epoksi katmanlı kompozit plaklarda yüksek hızlı çarpma neticesinde meydana gelen normal gerilmeleri kalınlık boyunca değişik noktalarda incelemiştir (1992). Sonuçlar farklı hızlarda yayılan iki farklı gerilme dalgasının varlığını göstermiştir. Zhu tarafından yapılan deneyler de katmanlı kompozitlerin kalınlıkları yönünde çarpma boyunca lineer olmayan bir gerilme – şekil değiştirme davranışı sergilediklerini göstermiştir.

3.3. Deformasyon Tarzları

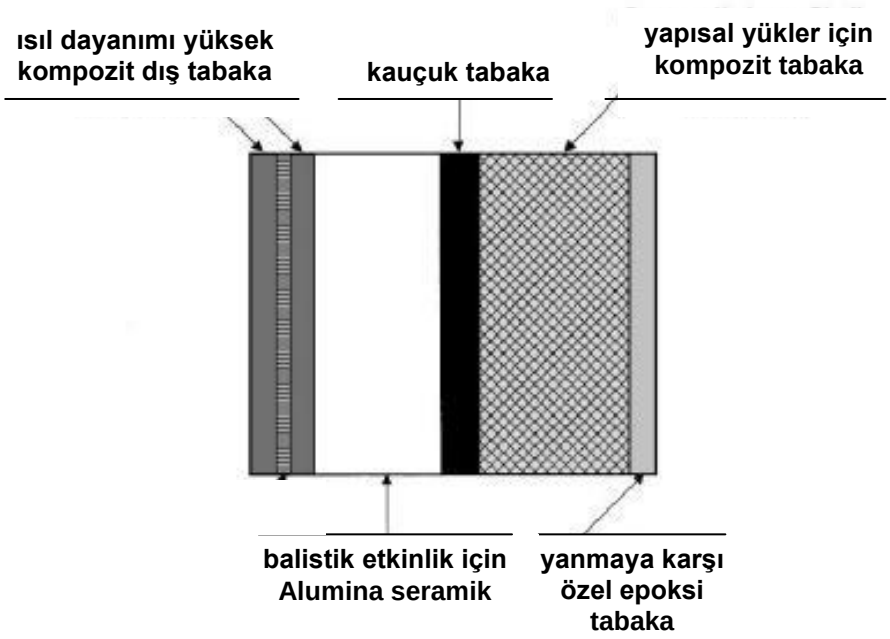
Penetrasyon sırasındaki malzeme deformasyonu, perforasyon enerjisini yakından etkileyen mermi şekli ile oldukça ilişkilidir. Genellikle kompozit plaklar için kayma gerilmelerinin yoğun olarak görüldüğü çarpışma bölgesinin ardından çekme yönünde elyaf kırılmaları ve merminin hedeften çıktığı arka yüzey bölgesinde katman ayrılması, başta gelen deformasyon tarzlarıdır. Penetrasyon enerjisi deformasyonların (elyaf ve matris kırılmaları, katman ayrılması, şişme, sürtünme, vb.) oluşmasını sağlayacak enerjilerin ayrı ayrı toplanmasıyla saptanabilir. Eğer deformasyon tarzları deneysel bilgiler ışığında tam olarak belirlenebilirse modelleme ve dolayısıyla balistik limit hesabı daha gerçekçi olacaktır. Bunlar hedefin kalınlığı ve çarpma hızıyla yakından ilgilidir.

Penetrasyon esnasında enerjinin nasıl sönümlendiğini belirleyebilmek için yapılan çalışmalar genel olarak perforasyon ve sürtünme enerjisi olarak iki ana bölümde ele alınabilir. Deformasyon tarzlarının değişik malzeme kombinasyonları için çeşitlilik göstereceği söylenebilir. Tabaka ayrılması grafit-epoksi katmanlı kompozitler için ana faktörken, aramid ve polietilen elyaf bazlı kompozitlerde çok etkili olmayabilir.

3.4. Seramik-Kompozit Zırhlar

Keşfedildikleri 1960'lı yıllardan bu yana seramik destekli kompozitler yüksek hızlı çarpmalarda perforasyonu önlemek için uygun ağırlıkta zırh sistemlerini oluşturmaktadır. Bu konudaki çalışmalar çok hızlı ilerlemektedir. Askeri savunma amaçlı olduğu kadar, ticari uygulamalarda da elyaf ve plastiklerin zırh olarak oldukça geniş bir kullanım alanı vardır. Son yıllarda özellikle Kevlar® ve S-2 Cam elyafların kullanılmaya başlamasıyla zırh sistemlerinin hem balistik hem de yapısal karakteristikleri çok gelişmiştir.

Entegre zırha, H.Mahfuz ve arkadaşları tarafından geliştirilip sayısal ve deneysel olarak incelenen aşağıdaki modeli örnek olarak vermek mümkündür (Şekil 3.3) [11].



Şekil 3.3 Entegre zırh örneği [11]

Günümüzün entegre zırhlarından, sadece merminin zırh içinde ilerlemesini engellemeleri değil, önemli yapısal yükleri taşımaları da beklenmektedir. Yıllar boyunca entegre zırhların yapısal kombinasyonları önemli değişiklikler göstermiştir. Seramik-kompozit zırhlar etkin bir ağırlık tasarrufu ile perforasyonu önleme görevini üstlenirler. En dıştaki seramik katman merminin formunu bozarak daha küt bir şekil almasını ve böylece çarpma yüklerinin daha geniş bir alana yayılmasını sağlar. Kompozit katman ise merminin sahip olduğu kinetik enerjinin emilmesi görevini üstlenir. Deneyler, seramik yüzeyin merminin uç formundaki değişikliği ve kompozit katmanın da enerji emişini çok etkin bir şekilde gerçekleştirdiklerini doğrulamaktadır.

Kullanıldığı aracın savaş etkinliğini artırmak ve "stealth" adı verilen gizlenme karakteristiğini iyileştirmek için en dışa uygun bir katman daha eklenir. Ayrıca personel ve teçhizat emniyetini geliştirmek ve ateş, duman ve toksik koruma yeteneğini artırmak için de, değişik kompozitler (phenolic) arka yüzeye yerleştirilirler. Seramik ile kompozit katmanların arasına yerleştirilen hiperelastik (kauçuk) bir katman enerjinin absorbe edilme miktarını artıracaktır. Seramik katman çarpma hasarını asgariye indirecek ve tamir ve yeniden kullanım kabiliyetini kolaylaştıracak şekilde tasarlanmalıdır.

4. ENERJİ EMİŞ MEKANİZMALARI

4.1. Giriş

Kompozit malzemelerin çarpma davranışlarıyla, özellikle çarpmadan kaynaklanan performans kayıplarıyla ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yüksek performanslı hava-uzay yapılarında ağırlığın düşürülmesi konusunda dikkat çekici bir potansiyele sahip olan katmanlı kompozit yapılar, kalınlık boyunca katmanlar arası kayma mukavemeti gibi düşük malzeme özelliklerine sahiptirler. Bunun nedeni, kalınlık boyunca herhangi bir güçlendirme (reinforcement) işlemine tabi tutulmamış olmalarıdır.

Son zamanlarda aramid elyaf takviyeli kompozitler sundukları üstün çarpma mukavemetlerinden dolayı anti-balistik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Epoksi reçine ile birleştirilen Kevlar® elyafı örnek olarak verebileceğimiz aramid-elyaf kompozitler, karbon-elyaf kompozitlere göre daha iyi bir balistik performans sergilerler. Bu iki tür kompozit için çarpmadan kaynaklanan hasar mekanizmaları birbirinden oldukça farklıdır. Kevlar®-elyaf kompozitler enerji emiş açısından daha yüksek kapasitededirler, fakat kalınlık yönünde şişme gibi tarzlarda büyük deformasyona uğrarlar ve katmanlar arası geniş ayrılmalar ve kırılmalar gösterirler.

İnce ve orta kalınlıkta yapılar için yeni bir uygulama olan MWK(multiaxial warp knit) ürünler kalınlık boyunca da güçlendirildiklerinden bu yönde önemli bir mukavemet artışı ve hasar toleransı sağlarlar. Bu yönleri ile çarpmaya maruz kalan kompozit plaklarda kullanılmaları uygun olabilir.

Bu bölümde, yukarıda sözü edilen MWK yönteminin kullanıldığı, Tae Jin Kong ve Cheol Kim tarafından yapılan düşük hızlı bir çarpma incelemesinin yanı sıra [5], yüksek hızlı ve düşük hızlı çarpma davranışları arasındaki farkların görülebilmesi açısından H.Mahfuz tarafından gerçekleştirilen entegre bir zırhın maruz kaldığı

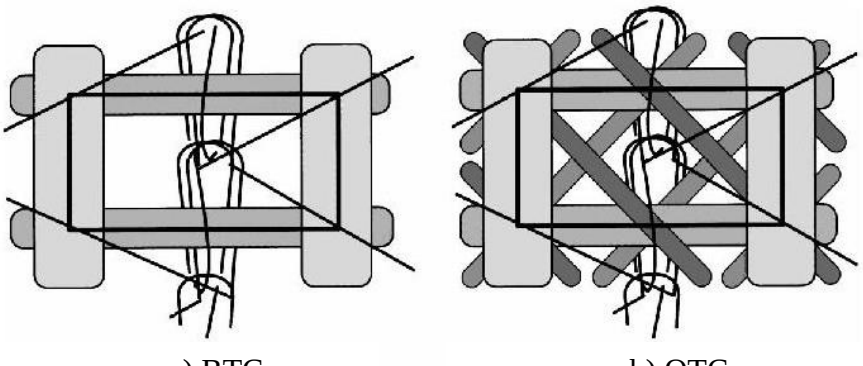
yüksek hızlı çarpmayı içeren bir çalışmaya yer verilecek [11] ve enerji kayıp mekanizmaları incelenecektir.

4.2. Düşük Hızlı Çarpma

Katmanlı kompozitlerin çarpma davranışları çarpan cismin ilgili parametreleri ve kompozit plağın konfigürasyonu, katmanlar arası kayma mukavemeti, uzama ve esneme gibi malzeme özellikleri ile yakından ilgilidir. Herhangi bir cisim katmanlı kompozit bir plağa çarptığında sahip olduğu kinetik enerji plak tarafından emilir. Bunun sonucunda plakta da katmanlar arası ayrılma, elyaf ve matris kırılmaları gibi deformasyonlar meydana gelir. Karbon-elyaflı bir kompozit, karbonun kırılgan yapısından dolayı çarpma hasarlarına yatkındır ve dolayısıyla düşük bir çarpma mukavemetine sahiptir. Bu nedenle karbon-elyaf kullanılan çarpma deneyleri genellikle perforasyonla sonuçlanır. Karbon-elyaf kompozitlerde birincil enerji emiş tarzı elyaf kırılmasıdır.

Kevlar® ve Spectra gibi tüp şeklinde elyaflerle güçlendirilmiş kompozitlerde hasar mekanizması tamamen farklıdır. Bunlarda enerji emişi; katman ayrılması ve çarpan cisme dik yönde geniş deformasyonlarla gerçekleşir. Katman ayrılması düşük hızlı çarpma uygulamalarında baskın enerji emiş tarzı iken, yüksek enerjili çarpmalarda şişme (bulging) deformasyonu daha ön plana çıkar.

Çalışmada MWK kompozitler, epoksi reçine ve Kevlar-29® elyaf ile iki farklı konfigürasyonda kullanılmıştır (Şekil 4.1) [5].



a) BTC (biaxial tricot chain)

b) QTC (quadriaxial tricot chain)

Şekil 4.1 MWK ürünlerin şematik gösterimi [5]

Deformasyon enerjisini tespit edebilmek için malzeme özelliklerinin bilinmesi gerektiğinden; çekme, esneme ve düzlem içi kayma testlerinden oluşan bir dizi test uygulanarak hesaplamalar için gerekli olan malzeme özellikleri elde edilmiştir. Testler sonucunda elde edilen bu değerler Tablo 4.1'de görülmektedir [5].

Tablo 4.1 Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri [5]

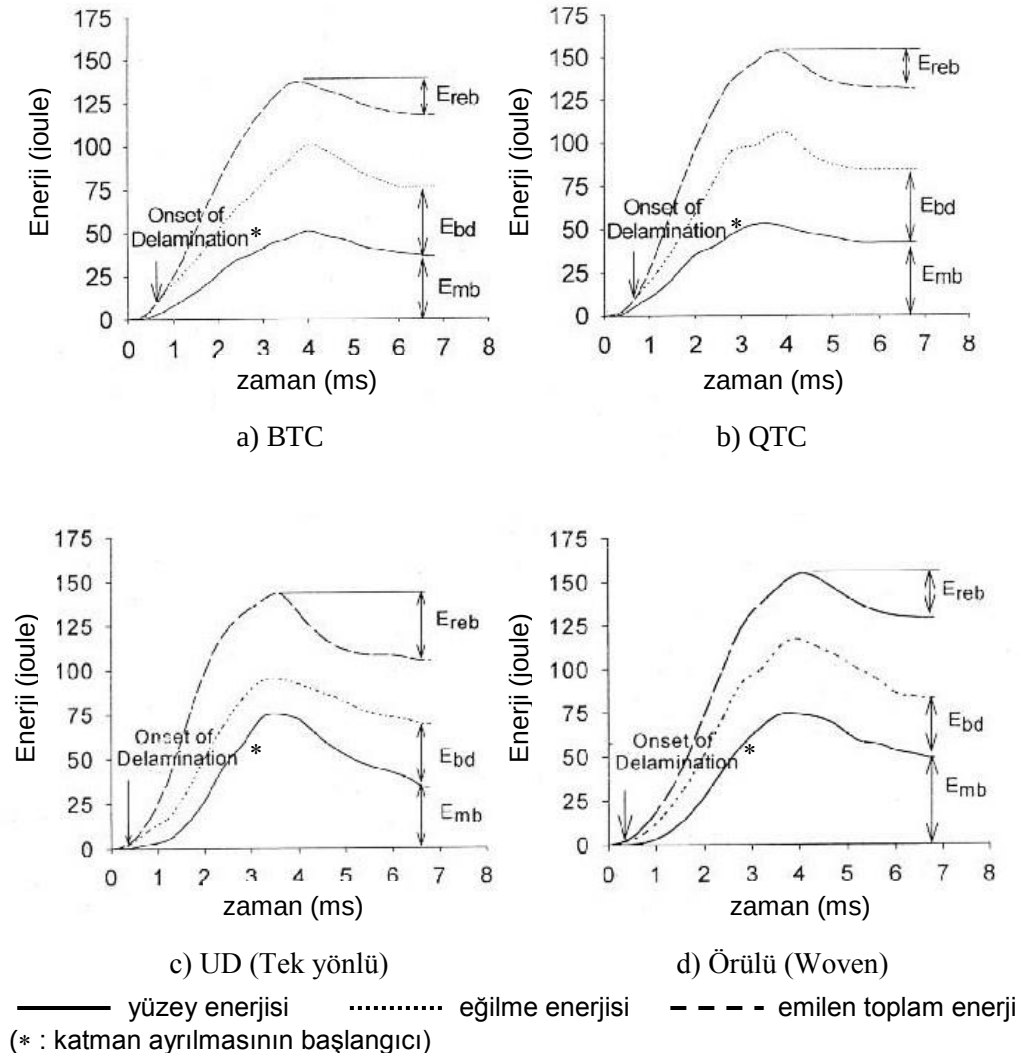
Özellik		BTC	QTC	UD (Tek Yönlü)	Örülü (Woven)
Çekme Mod. (GPa)	E_1	8.53	6.48	6.87	7.38
	E_2	8.42	6.41	6.89	7.24
Kayma Mod. (GPa)	G_{12}	3.1	3.15	1.42	1.03
Poisson Oranı	ν_{12}	0.25	0.21	0.27	0.12

Çarpma enerjisi üç ana parçaya ayrılarak incelenmiştir;

- Sekme (rebounding) enerjisi : Çarpma bilgileri yardımı ile ölçülür.
- Katman ayrılması (delamination) enerjisi : Ayrılmanın başlaması ve devamı ile ilgili bilgileri tespit etmek için gereklidir; değişik tekniklerle bulunan ayrılma alanı ile hesaplanır.
- Yüzey (membrane) ve Eğilme (bending) enerjisi : Deforme olmuş örnekler ve malzeme özellikleri yardımıyla hesaplanır.

Çarpma enerjisinin emilmesi ile ilgili grafikler Şekil 4.2'de görülmektedir [5].

BTC ve QTC kompozitler için çarpma yüklerinin etkisinin başladığı andan maksimum yer değiştirme elde edilinceye kadar geçen sürede ana enerji emiş tarzları; katmanlar arası ayrılma, eğilme ve yüzey mekanizmalarıdır. Maksimum yer değiştirme elde edildikten sonra çarpma enerjisinin eğilme ve yüzey deformasyon tarzları ile depolanmış olan bölümü çarpan cisme geri aktarılır. Tek yönlü (UD) katmanlı kompozit diğerlerine oranla daha elastik bir davranış göstermektedir. "Örülü (woven)" ise elastik yönden daha zayıf bir yapıdadır.



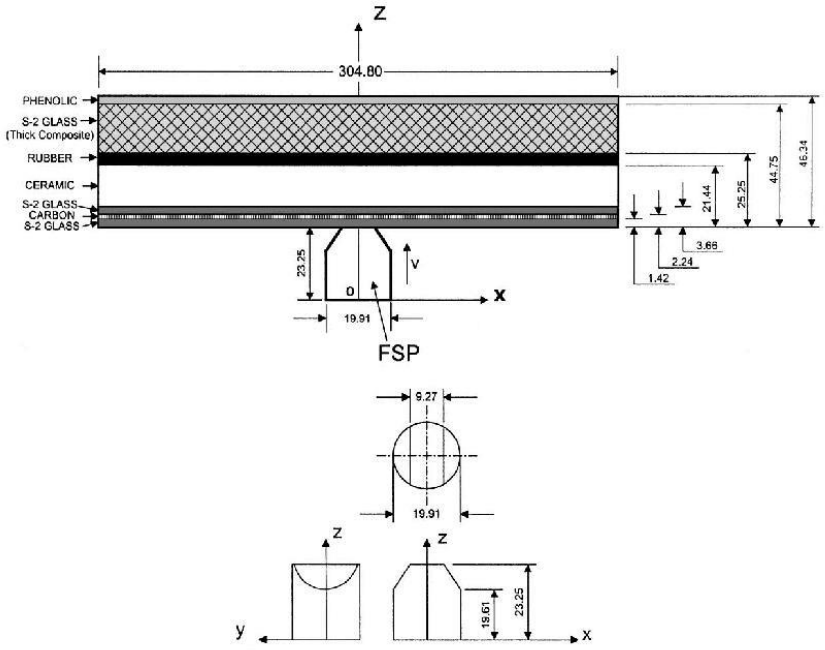
Şekil 4.2 Enerji emiş mekanizmaları [5]

4.3. Yüksek Hızlı Çarpmaya Maruz Kalan Entegre Zırh

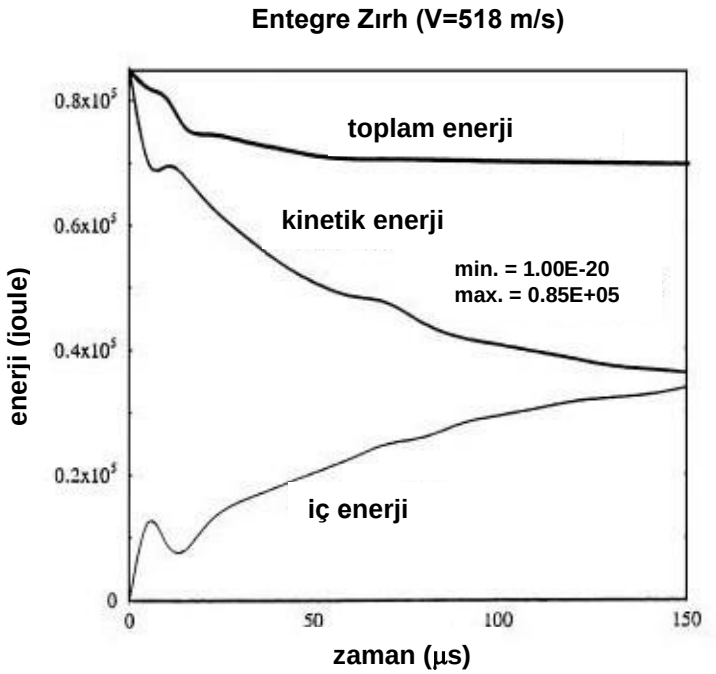
Çalışmada, bir önceki bölümde örneği verilmiş olan entegre zırh kullanılmıştır (Şekil 4.3) [11]. Analizin ana amacı; balistik limite yakın hızlardaki çarpmalar karşısında entegre zırhın gösterdiği davranışların araştırılmasıdır. Çalışma sonucunda anlaşılmıştır ki zırhı oluşturan unsurlar (seramik, kauçuk ve kompozit) olayın balistik yönü kuvvetlendikçe daha da önem kazanmaktadırlar. Bu çalışmada gerilme-zaman formatındaki sonuçlar değerlendirilmiştir.

Çarpmadan hemen sonra merminin sahip olduğu kinetik enerji zırha aktarılır ve mermi zırh içinde yol aldıkça kinetik enerjisi azalırken sistemin iç enerjisi artar. Zamana göre enerji dağılımları Şekil 4.4'de görülmektedir [11]. Grafikten, kinetik

enerjideki azalmanın iç enerjideki artıştan daha yüksek bir oranda gerçekleştiği gözlemlemek mümkündür. Bu durum çarpma olayının başlangıç safhasında toplam enerjide bir düşüşe neden olur. Bu düşüşün ardından toplam enerji geri kalan zamanda sabit bir seviyede kalır. Kinetik enerjinin azalması, mermi zırh içinde yol alırken hızında bir düşüş olduğunun en belirgin göstergesidir.



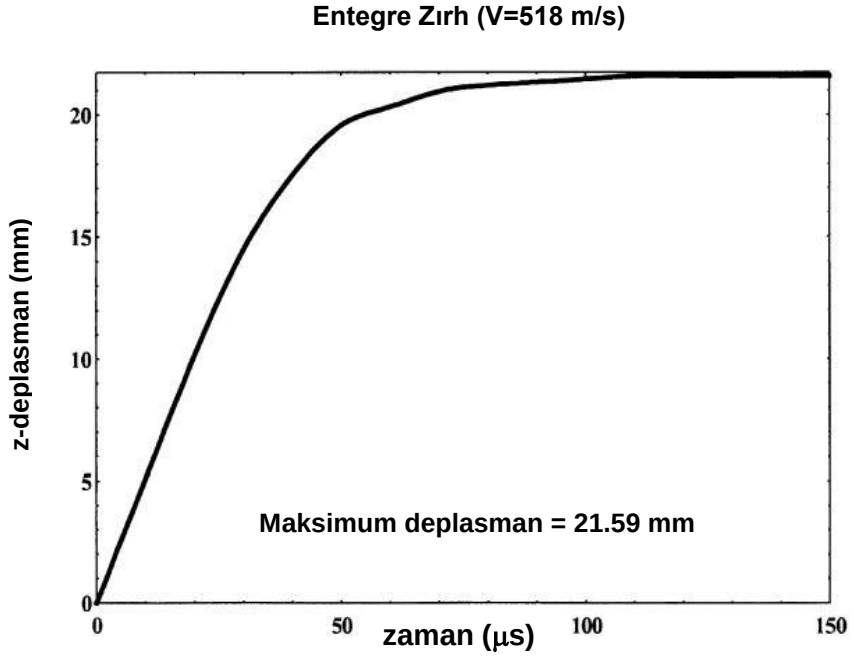
Şekil 4.3 Entegre zırh [11]



Şekil 4.4 Enerji dağılımı [5]

Kinetik enerji modeldeki bütün elemanların ağırlık ve hız bilgileri hesaba katılarak bulunur. Penetrasyon boyunca ağırlık erozyonunun asgari seviyede kaldığı dikkate alınırsa kinetik enerjinin seyri, merminin hızı için de bir gösterge olarak kabul edilebilir. Bu kabulün ardından grafikten anlaşılan bir başka husus da mermi tamamen durduğu halde kinetik enerjide bir değer görülmeye devam edilmesidir. Bu durum hedef plaktaki elemanlarda çarpmanın etkisiyle oluşan hareketin devam ediyor olmasından kaynaklanır. Bilindiği gibi fiziksel bir sistemde enerji proses boyunca korunur. Yapılan çalışmada ise toplam enerjide çok hafif bir azalma söz konusudur. Bunun nedeni çarpma bölgesi civarındaki elemanların uğradıkları erozyonun yol açtığı ağırlık kaybıdır ki bu azalma daha önce de söylendiği gibi çok düşük bir seviyededir ve toplam enerjide de hafif bir azalma meydana getirmektedir.

Mermiye ait yer değiştirme bilgileri Şekil 4.5'de görülmektedir [11]. 110 μs civarında merminin deplasman miktarı 21.6 mm seviyesine ulaşmakta ve bu noktadan itibaren sabit kalmaktadır. Bu, merminin durduğunun kesin kanıtıdır. Ulaşılan 21.6 mm değeri, merminin seramik katmanın sonuna doğru durduğunu göstermektedir.

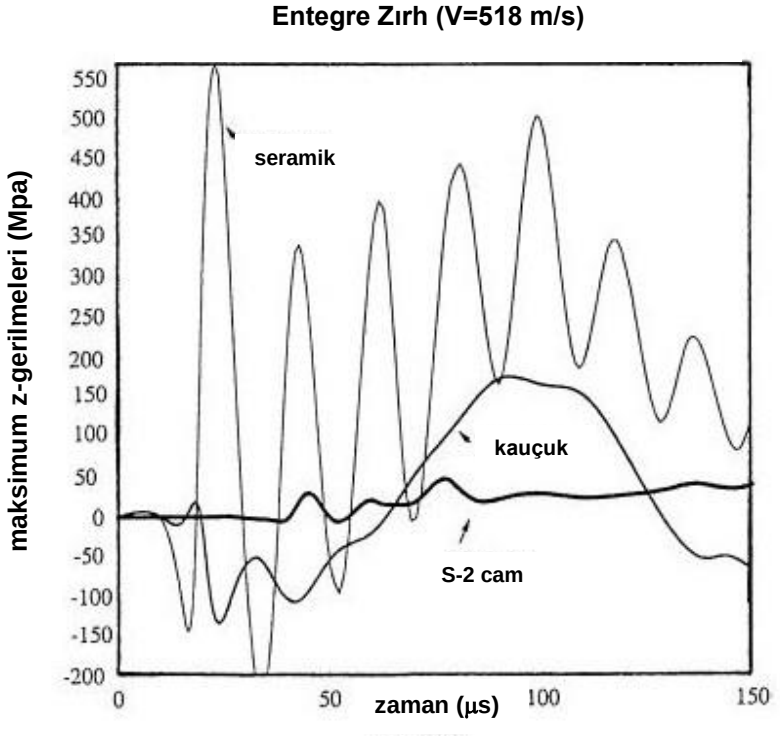


Şekil 4.5 Merminin yer değiştirme grafiği [11]

Deneysel ve sayısal analizlerin sonuçları karşılaştırıldığında; Sonlu Elemanlar Metodu ile gerçekleştirilen sayısal analizde merminin uç noktası seramik katmanın

sonunda dururken, deneylerde mermi, seramik katmanın ortalarına kadar ancak ilerleyebilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki bu farkın modelde kullanılan iflas kriterlerinden kaynaklanması muhtemeldir. Seramik katmandaki çok yüksek miktardaki kırılma sayısal modelde gerçekleştikten sonra, kırılan elemanların analize etkisi ortadan kalkmakta ve dolayısıyla malzemenin mukavemeti olduğundan daha düşük bir seviyede ortaya çıkmaktadır.

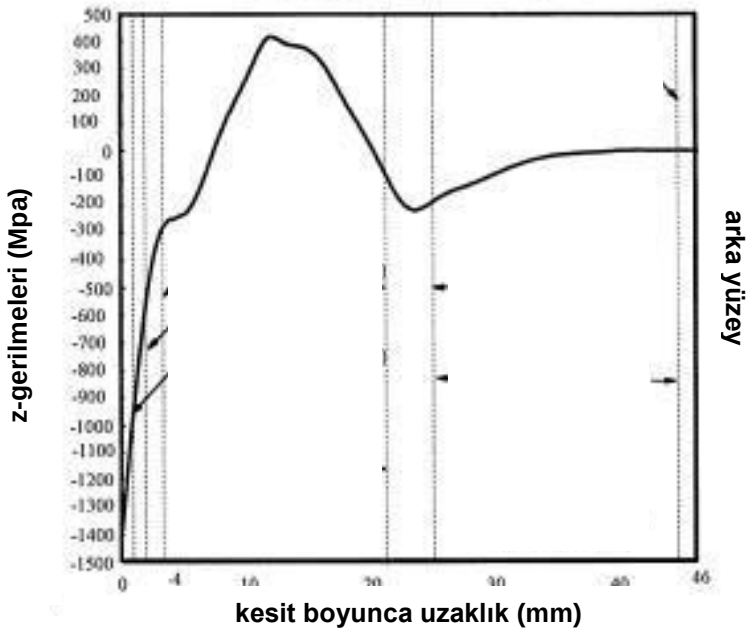
Çarpma boyunca katmanlar arası çekme ve kayma gerilmeleri, çarpma enerjisinin emilmesinde ana etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Katmanlar arası çekme gerilmesi (σ_z) zırh yüzeyine diktir ve değişik zamanlarda çekme veya basma yönünde görülebilir. Olayın fiziğinden açıkça bilinmektedir ki σ_z dağılımı hedefin sadece kalınlığı yönünde değil, x-y düzleminde de değişim gösterir.



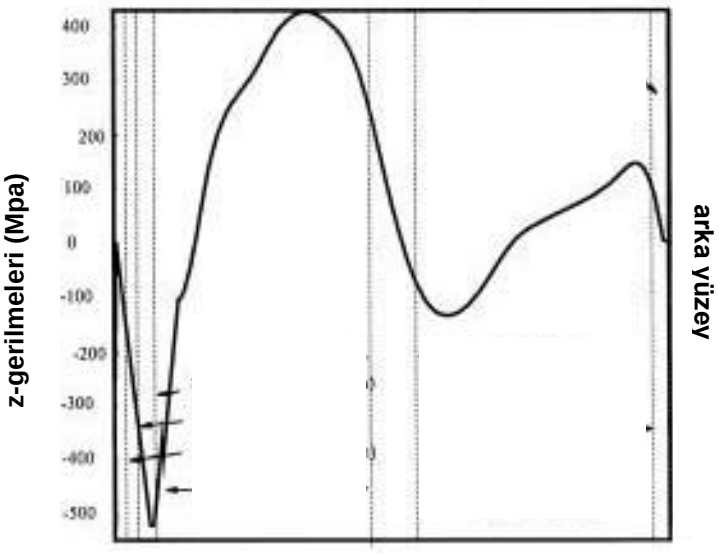
Şekil 4.6 Maksimum σ_z dağılımı [11]

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi maksimum σ_z değerine seramik katman içinde rastlanmaktadır [11]. Yine aynı şekilden, her katmanın kendi σ_z değerleri içinde maksimum noktalara sahip olduğu görülebilir. Seramik katmandaki maksimum σ_z değeri 550 MPa civarındadır. Eğer seramik-kauçuk ara katman bu yüksek gerilme

değerine dayanabilecek kadar mukavim değilse bu iki katman arasında ayrılma görülecektir. Seramik katmandan sonra en yüksek σ_z değeri 172 MPa ile kauçuk katmanda görülmektedir.



a) $t=2.4\times10^{-5}$ s

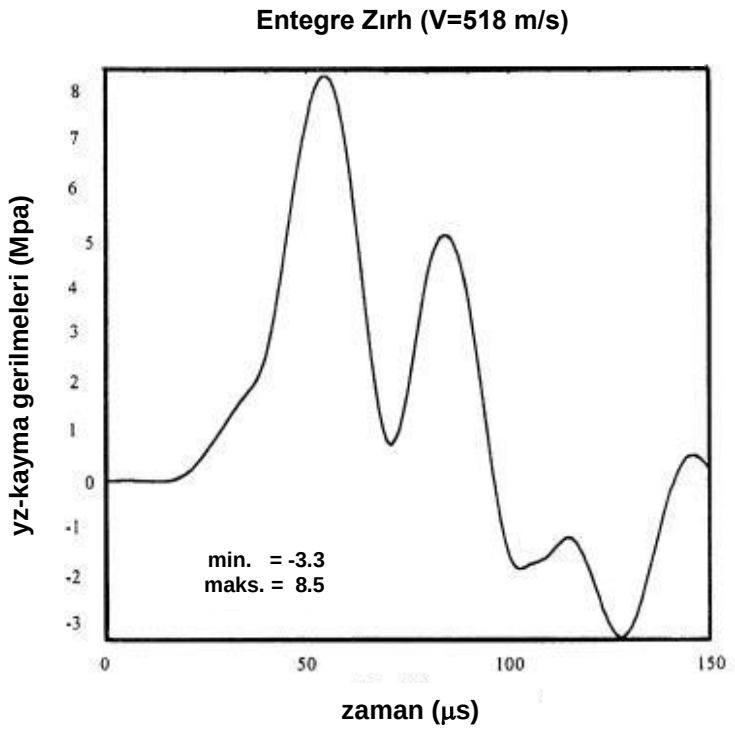


b) $t=9.9\times10^{-5}$ s

Şekil 4.7 Kalınlık boyunca σ_z dağılımı [11]

Gaz tabancası testlerinden elde edilen sonuçlara göre zırhın iflası iki ana tarzda gerçekleşmektedir. Bunlardan biri yüksek basma gerilmelerine bağlı olarak seramik katmanda meydana gelen kırılmalar, diğeri ise katmanlar arası ayrılmalardır.

Eğer belirli bir zaman için kalınlık boyunca σ_z dağılımı incelenirse en yüksek gerilmenin seramik katmanda oluştuğu görülür (Şekil 4.7.a) [11]. Kauçuk katmana doğru ilerledikçe σ_z gerilimi çekme yönünden basma yönüne doğru kayar. Kauçuk katmanın her iki tarafındaki ara yüzeyde de gerilmenin basma yönünde olması dikkat çekicidir. İncelemenin yapıldığı zaman bir miktar artırıldığında (Şekil 4.7.b) seramik-kauçuk ara yüzeyi pozitif (çekme) σ_z gerilmesine sahipken, kauçuk-kompozit ara yüzeyinin hala basma yönünde gerilmeye maruz kaldığı anlaşılmaktadır [11]. Zaman daha da ilerlediğinde bu basma gerilmesi sıfıra yaklaşmakta fakat hiçbir zaman çekme yönüne değişmemektedir. Buradan, ayrılmaya en yatkın ara yüzeyin kauçuk-kompozit ara yüzeyi olduğu anlaşılır.

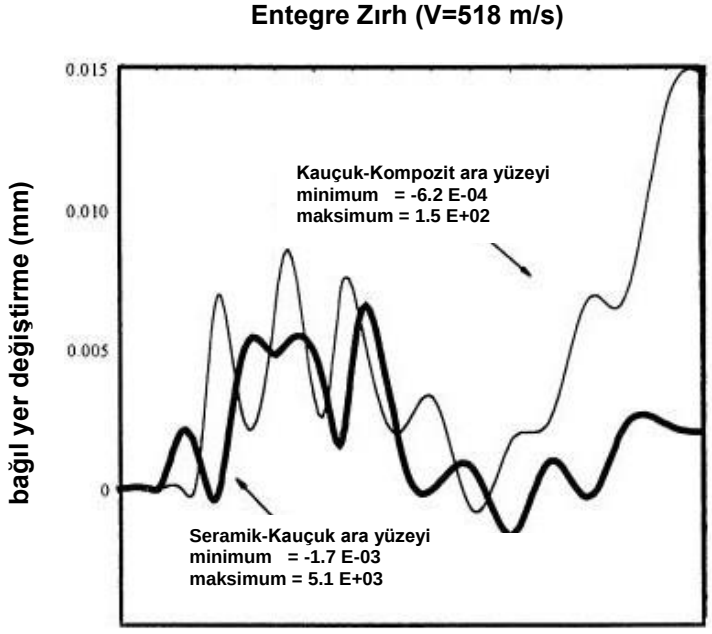


Şekil 4.8 τ_{yz} dağılımı [11]

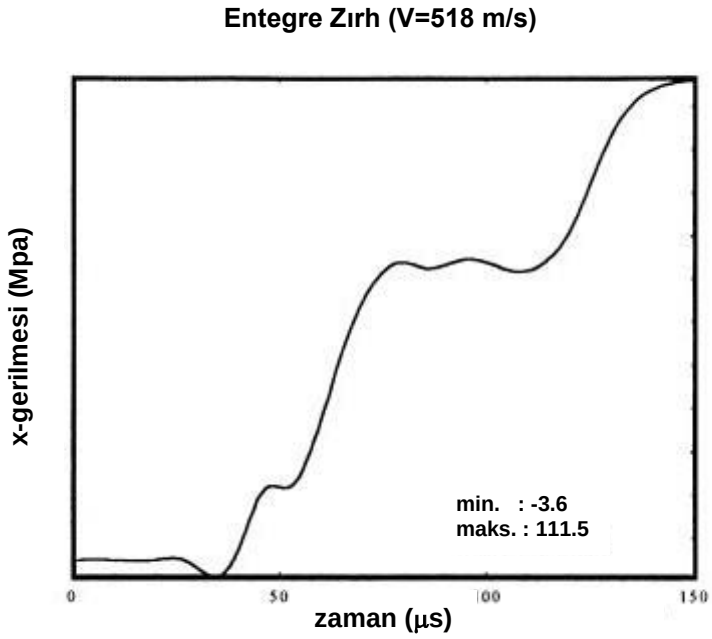
Çalışmada incelenen diğer gerilmeler, τ_{yz} ve τ_{xz} kayma gerilmeleridir. Şekil 4.8'den de anlaşılacağı gibi τ_{yz} kayma gerilmesi nispeten yüksek bir seviyededir [11]. Grafik,

kauçuk-kompozit ara yüzeyindeki bir kauçuk eleman için elde edilmiştir. $t=5.0\times10^{-5}$ s civarında τ_{yz} gerilmesi ayrılma için yeterli bir seviyeye ulaşmaktadır.

Şekil 4.9'da görüldüğü gibi seramik-kauçuk ara yüzeyindeki maksimum bağıl yer değiştirme miktarı, kauçuk-kompozit ara yüzeyine göre hemen hemen %50 daha düşük bir seviyededir [11]. Bu durum kauçuk-kompozit ara yüzeyinin ayrılmaya yatkın oluşunun bir başka göstergesidir.



Şekil 4.9 Bağıl yer değiştirme grafiği [11]



Şekil 4.10 Arka yüzeyde σ_x gerilme dağılımı [11]

Yerel eğilme ve elyaf kırılmalarına σ_x gerilmeleri neden olur. Seramiğin katılığı fazla olduğundan global eğilmelerin ihmal edilebilir seviyelerde olması beklenirken, zırhın arka yüzeyindeki bir elemanın maruz kaldığı σ_x gerilmelerinin zamana göre değişimini gösteren Şekil 4.10'dan da anlaşılacağı gibi, lokal olarak σ_x gerilme değerinin zamanla artmaya devam etmesi ilginçtir [11]. σ_x gerilmesi 30 μs civarında sıfıra düşmektedir. Bu anda gerilme dalgasının arka yüzeye ulaştığından bahsedilebilir. Arka yüzeydeki σ_x gerilmesi bütün proses boyunca çekme yönünde kalmaktadır. Bu durum, arka yüzeyde meydana gelen şişme (bulging) deformasyonu ile açıklanabilir.

5. KOMPOZİT BİR PLAĞA ÇARPMA YÜKLERİNİN ETKİSİ

5.1. Giriş

Katmanlı kompozitler çok geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Bunların en önemli ve yaygın olanı, Aramidin yoğun olarak kullanıldığı helikopter, tank ve personel için zırh uygulamalarıdır. Bu uygulamalarda öncelikli amaç; balistik limitin altındaki çarpmalarda, çarpan cismin ya da merminin perforasyonunu engellemek ve zırhın koruduğu personel veya ekipmanın zarar görmesini önlemektir. Sonuç olarak Kevlar®'ın ya da kullanılan malzemenin çarpma yükleri altında ve perforasyon halindeki davranışlarının iyi anlaşılması, uygun bir zırh tasarımı için kritik bir öneme sahiptir.

Yüksek hızlı çarpmalar konusunda yapılan çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır. Çarpma konusundaki araştırmaların büyük çoğunluğu organik elyaflı kompozitlerin kullanıldığı, 10 m/s hızlara kadar olan düşük hızlı çarpmalarda yoğunlaşmaktadır. Bunun en başta gelen sebebi yüksek hızda yapılan çalışmalarda, özellikle ölçme konusunda yaşanan zorluklar ve dolayısıyla takip edecek çalışmaları da destekleyecek olan deneysel verilerin kısıtlı olmasıdır. Çarpma deneylerinden elde edilen veriler ışığında çok çeşitli kompozitler arasında enerji emiş kapasitesinin yüksekliği açısından Kevlar®'ın ön plana çıktığını söyleyebiliriz.

Kompozit plakların dinamik yüklemesini içeren çarpma olayları kapsamlı bir incelemeye konu olduğunda oldukça karmaşık hale gelir. Bu yüzden global ve yerel deformasyonlar, şişme, sürtünme etkileri ve iflas mekanizmaları gibi pek çok proses dikkate alınmalıdır. İzotropik materyaller için penetrasyon ve perforasyonla ilgili çok sayıda model geliştirilmişken, katmanlı kompozitler için bu sayı oldukça sınırlıdır.

Bu bölümde Zhu, Goldsmith ve Dharan tarafından gerçekleştirilen, konik uçlu silindirik bir cismin çarptığı Kevlar® plakaların davranışlarının incelendiği bir çalışmaya yer verilecektir [12].

5.2. Örneklerin Üretimi ve Malzeme Testleri

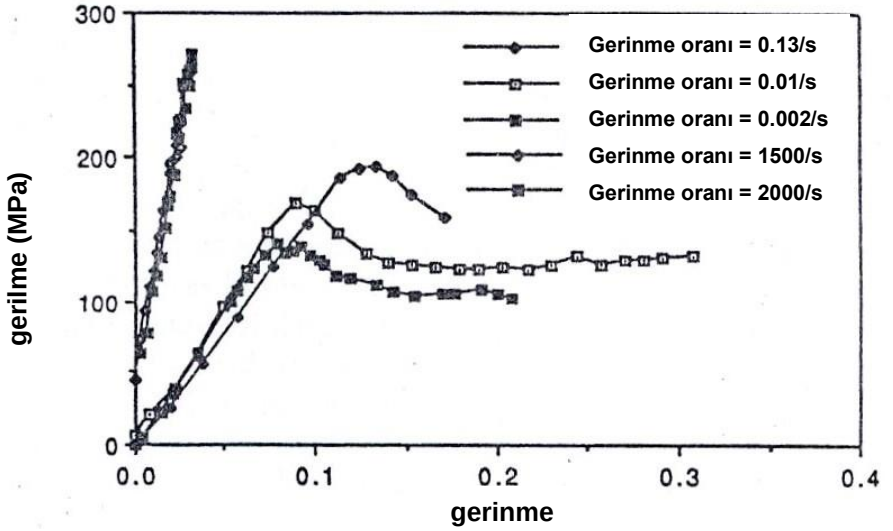
Bu çalışma için üretilen örnekler, polyester matris ve Kevlar-29® elyaflı tabakalardan oluşmaktadır [12]. Kevlar-29®'un elastik modülü daha çok yapısal uygulamalarda kullanılan Kevlar-49®'dan daha düşük olmasına rağmen enerji emiş kapasitesi yönüyle çok daha üstündür. Plakalar oda sıcaklığında "ıslak yatırma (wet lay-up)" tekniği ile üretilmiştir. Her tabaka 0.61 mm kalınlığında ve 28×28 cm ölçülerindedir. Tablo 5.1'de, kullanılan malzeme özellikleri listelenmektedir [12].

Tablo 5.1 Kevlar® elyaf ve polyester reçinenin malzeme özellikleri [12]

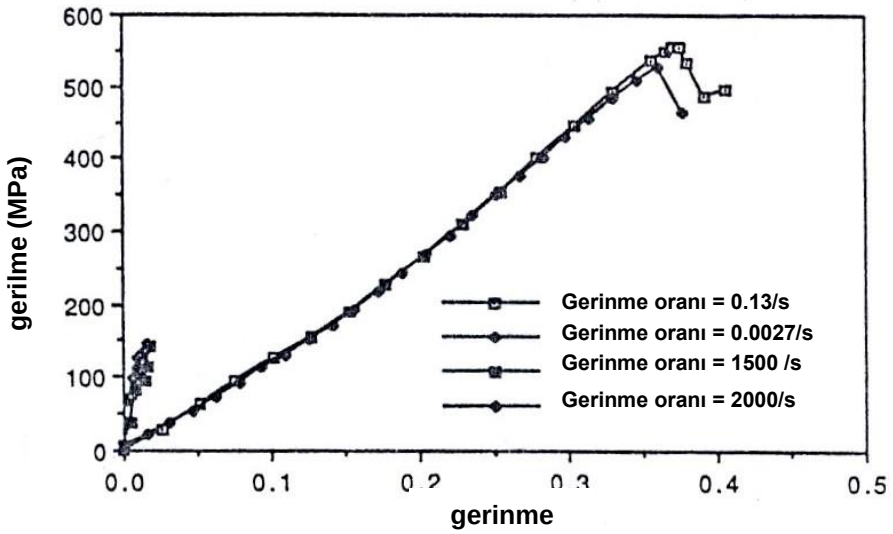
	Kevlar-29®	Kevlar-49®	Polyester
Yoğunluk (g/cm^3)	1.44	1.44	1.12 – 1.46
Çekme Elastisite Modülü (GPa)	62	125	1.03 – 4.48
Çekme Mukavemeti (GPa)	2758	2800 – 3600	28 – 69
Kopma Uzaması (%)	4.0	2.4	1.7 – 2.6

Düzlem içi çekme ve basma modüllerini tespit etmek için yapılan testlerde, streyngeçler ve deplasman ölçümleri için OPTFOLLOW (electro-optical displacement transducer) kullanılmıştır. Bu testler sonucunda kompozitin düşük basma mukavemeti ile tipik bir davranışa sahip olduğu görülmüştür. İflasa uğramış örnekler incelendiğinde bükülmenin ana etken olduğu söylenebilir. Kevlar®'ın zayıf basma davranışı ve elyaf bükülmesi tarzında iflası, bilinen karakteristik özellikleridir.

Kalınlık boyunca yapılan testler neticesinde; polyester reçine yükleme esnasında gerinme hızına oldukça bağımlı davranırken, Kevlar® için bunun çok daha düşük bir seviyede olduğu söylenebilir (Şekil 5.1) [12].



(a) Polyester reçine



(b) Kevlar®-Polyester plakalar

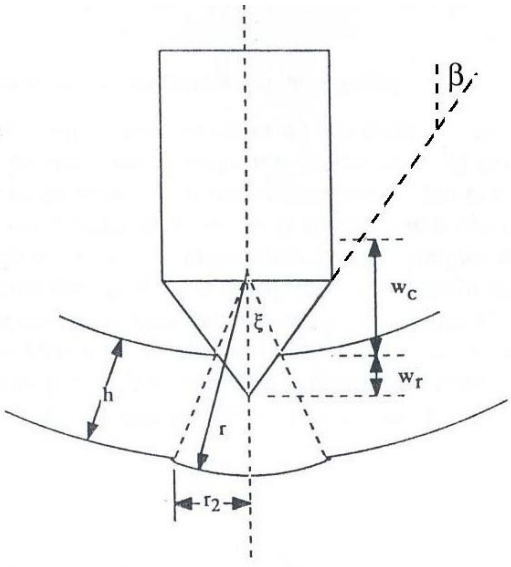
Şekil 5.1 Kalınlık yönündeki dinamik test sonuçları

5.3. Modelde Yapılan İdealizasyonlar

Model; ince plak davranışı, merminin rijidliği, global ve lokal davranışların birbirinden bağımsızlığı gibi bazı kabul ve idealizasyonlar içermektedir. Malzeme sıkıştırılamaz kabul edildiğinden şişmenin oluştuğu bölgenin hacmi, merminin plak içine giren konik kısmının hacmine eşit olarak düşünülmüştür. Matris kırılması gözlemlenmiş olmasına rağmen, nispeten düşük seviyede kaldığı için modelde ihmal edilmiştir.

5.4. Lokal Hasar Mekanizması

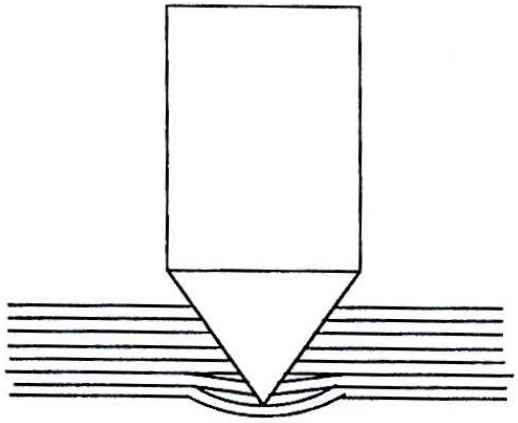
İncelenen tabakalı kompozit için penetrasyona bağlı hasar mekanizmaları; şişme, katman ayrılması, elyaf deformasyonu ve iflas olarak modellenmiş, matris kırılmaları ihmal edilmiştir. Analiz, bahsedilen bu proseslerin tamamında mermi üzerine gelen tepki kuvvetlerinin belirlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Merminin giriş, perforasyon ve çıkış safhaları düşünülerek analize yön verilmiştir. Giriş (indentation) aşaması tamamıyla arka yüzeydeki şişmeyle, perforasyon ise şişmenin büyümesiyle elyaf kırılmalarının oluşması ve katman ayrılması ile karakterize edilir. Şişmenin küresel bir formda olduğu kabul edilir (Şekil 5.2) [13]. Bu kabul deneysel sonuçlarla da uyum sağlamaktadır. Şişmeye maruz kalan bölgenin hacminin sabit olduğu düşüncesi, şişme miktarının belirlenmesinde hareket noktasını teşkil eder. Merminin kompozit içine giren kısmı ile şişme hacmi herhangi bir zaman için eşitlenerek geometrik olarak oluşturulan denklemler çözülür ve şişme hacmi elde edilir. Şişme, elyaf kırılmaları sonrasında daha karmaşık bir form alır; çünkü kırılan elyaflar sınır şartlarından bağımsız hale gelir. Fakat hesaplarda kolaylık olması açısından küresel şeklin proses boyunca devam ettiği kabul edilir.



Şekil 5.2 Konik merminin çarptığı plak için idealize edilmiş şişme formu [12]

Mermi hedef içine girdikçe, malzeme düzlem dışı yükleme gibi oldukça bölgesel deformasyon gradyanları ile birlikte düzlem içi basma gerilmelerinin de etkisiyle çarpma yönünde deplasmana uğrar. Bu yer değiştirme katmanlar arası kırılmalarla

sonuçlanır. Şekil 5.3'de bu kırılmaların etkisiyle oluşan katmanlar arası ayrılma deformasyonu görülmektedir [13].



Şekil 5.3 Katman ayrılması [12]

Merminin yolu üzerindeki elyafların kırılması hem lokal hem de global plak deformasyonları neticesinde gerçekleşir. Her iki etkiden kaynaklanan deplasmanların toplanmasıyla plaktaki toplam yer değiştirme miktarı elde edilir. Global deformasyona bağlı birim uzama miktarı plağın deplasman bölgesi biliniyorsa lineer elastisitenin birim uzama - yer değiştirme ilişkileri kullanılarak hesaplanabilir. Bununla beraber elyafların lokal deformasyonları bulundukları pozisyona bağlıdır. Lokal elyaf deformasyonlarını hesaplarken kompozitin bütününde katman ayrılmasının hali hazırda gerçekleşmiş olduğu kabul edilir. Elyaflar katmanlar arası kısıtlarla sınırlandırılmazlar ve orijinal yerleşimlerine ve merminin ucunun o andaki pozisyonuna bağlı olarak hem küresel şişmenin hem de merminin oluşturduğu çukurun yüzeyinde eğriler oluştururlar.

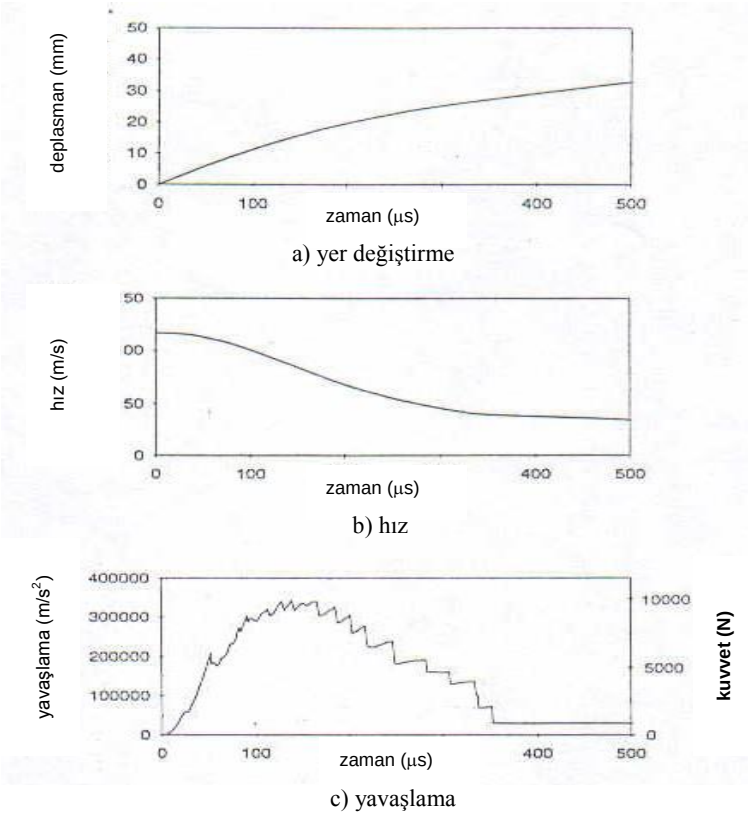
5.5. Sonuçlar

Merminin hareketini tanımlayan ilişkiler Merkezi Farklar Yöntemi kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür [13]. Sınır şartlarının lokal deformasyon ve hasar üzerindeki etkisi asgari düzeydedir. Bu yüzden örnekler, hesaplamanın kolaylığı açısından kare biçiminde sabitlenmiş olarak düşünülmüştür. Hesaplarda kullanılan parametreler Tablo 5.2'de görülmektedir [12].

Tablo 5.2 Hesaplarda kullanılan parametreler [12]

Çekme Elastisite Modülü	6.9 GPa
Poisson Oranı	0.25
Düzlem İçi Kayma Modülü	648 MPa
Düzlem Dışı Kayma Modülü	338 MPa
Plak Yoğunluğu	1.230 kg/m^3
Mermi Ağırlığı	28.9 g
Mermi Çapı	12.7 mm
Mermi Uzunluğu	38.1 mm
Merminin Konik Tepe Açısı	60 ^{o}

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5, 10 katmanlı bir kompozit plağa 116 m/s (balistik limit) ve 200 m/s hızlarla çarpan konik uçlu silindirik bir merminin hesaplar neticesinde elde edilen kinematik geçmişini göstermektedir [13].

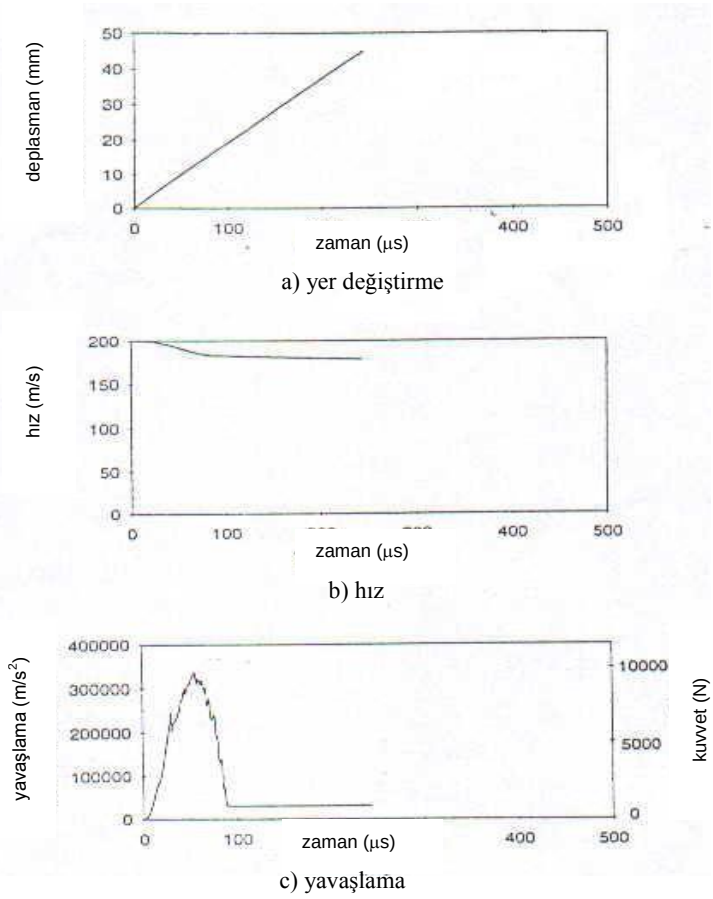


a) yer değiştirme

b) hız

c) yavaşlama

Şekil 5.4. 116 m/s hızla çarpan merminin kinematik geçmişi



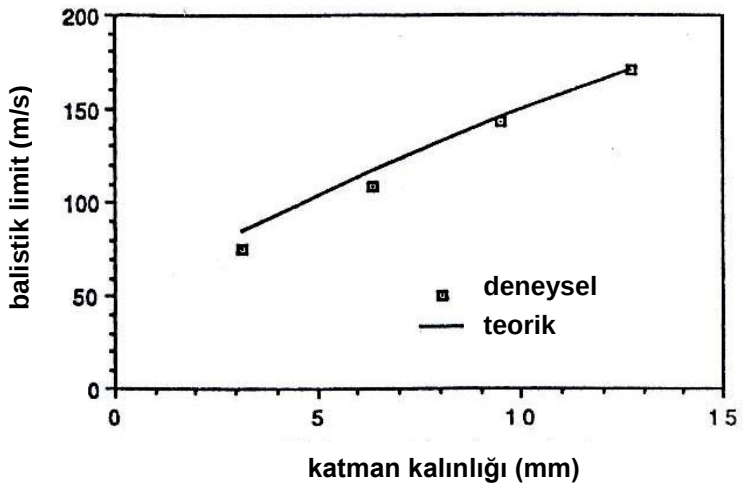
Şekil 5.5. 200 m/s hızla çarpan merminin kinematik geçmişi

Her iki hızdaki durum için de yavaşlamanın maksimum değeri aynıdır: 35×10^4 m/s^2. Fakat minimum değerde durağan hale geldikleri zamanlar; 116 m/s çarpma hızı için 350 μs, 200 m/s çarpma hızı içinse 90 μs'dir. İlk yavaşlama dalgası sona erdikten sonra sürtünme kuvvetlerinin etkilerine uygun olarak yavaşlama değeri sabit kalır ve mermi ile hedef tamamen ayrıldıktan sonra (merminin hedefi delip geçtiği durumda) sıfıra düşer. Grafikteki dalgalanmalar elyaf kırılmalarından kaynaklanmaktadır.

Tablo 5.3 Polyester/Kevlar® kompozitlerin balistik limit değerleri [13]

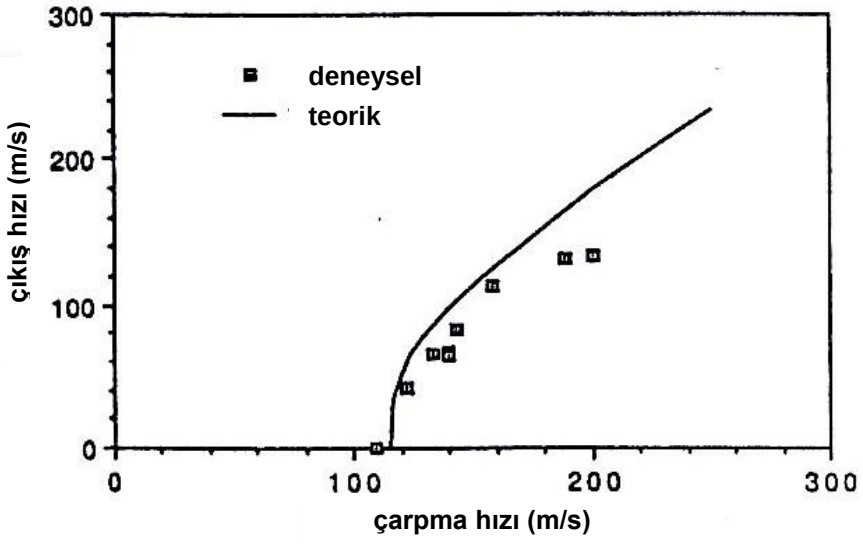
Kalınlık (mm)	Tabaka Sayısı	Deneysel Sonuç (m / s)	Teorik Sonuç (m / s)
3.125	5	75	84
6.35	10	109	116
9.525	15	143.2	145
12.7	20	170	170

Çeşitli kalınlıklardaki hedefler için hesaplanmış balistik limitlerle deneysel sonuçların karşılaştırılması Tablo 5.3 ve Şekil 5.6'da yer almaktadır.



Şekil 5.6 Deneysel ve teorik balistik limit değerlerinin karşılaştırılması [13]

Modelin karmaşıklığı da düşünülürse teorik ve deneysel sonuçların oldukça uyumlu olduklarını söylemek mümkündür. Balistik limitin üzerindeki bir çarpma durumunda 10 tabakalı bir kompozit plak için elde edilmiş sonuçlar Şekil 5.7.de verilmiştir [13]. Mermilerin son hızları için tahmin edilen değerler aşılmaktadır. Bunun bir nedeni, şişme ile ilgili olarak hesaplamalarda kullanılan küresellik yaklaşımı olabilir. Bu deformasyon tarzında uygun bir model elde edilemediğinden, küresellik yaklaşımı gözlemler ışığında kabul edilebilir düzeydedir.



as

Şekil 5.7 Merminin deneysel ve teorik çıkış hızlarının karşılaştırılması [13]

Deneysel analizler ve literatürden elde edilen malzeme özelliklerinin kullanıldığı ve hesaplamalar için bir sonlu farklar programından faydalanılan çalışmada, katmanlı Kevlar®/Polyester plaklara konik uçlu silindirik mermilerin çarpmaları incelenmiş ve penetrasyon boyunca deformasyon ve disipasyon prosesleri için oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuç plağın balistik limiti ve merminin son hızları için yapılan teorik hesaplarla deneylerden elde edilen bilgiler arasındaki uyum tarafından da desteklenmektedir. Eğer şişmenin fiziksel ifadesi analitik olarak daha iyi yapılabilirse sonuçlar çok daha mükemmel olabilir.

6. SAYISAL UYGULAMA

6.1. Giriş

Bu bölüme kadar; çarpma mekaniği ile ilgili genel kavramlar açıklanarak oluşturulacak modelde kullanılan temel fiziksel yaklaşımlardan bahsedilmiş, balistik çarpma konusunda yapılabilecek bir çalışmanın hareket noktaları ile incelenecek ana göstergeler ve yapıda oluşacak deformasyonların genel yapısı hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca balistik bir incelemenin en önemli bölümü olan kinetik enerjinin deformasyon enerjisine dönüşmesinde çarpmaya maruz kalan yapının rolü konusunda literatürde yer alan bazı çalışmalardan faydalanılarak bilgiler verilmiştir.

Konuya bu genel bakışın ışığında çeşitli malzemelerin çarpma yükleri altında nasıl bir davranışa sahip olabileceği konusunda bir fikir oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu noktada herhangi bir malzeme ile bir veya daha fazla tipte malzemeden oluşan bir zırh ya da hedefin çarpma yükleri altındaki davranışlarını birbirlerinden ayrı tutmakta fayda vardır. Zira incelenmesi tasarlanan bir zırh ve onun maruz kaldığı çarpma yüklerinin oluşturduğu özel durum, kendine has bir çarpma davranışına sahiptir. Her ne kadar böyle bir incelemeden genel birtakım bilgiler elde edilebilecek olsa da gerek kullanılan malzemelerin yapısal özellikleri ve çarpma koşulları (çarpma hızı, açısı, vb.), gerekse mermi ve hedefin sahip olduğu geometrik özellikler çarpma ile ilgili incelemelerin yoğunlaştığı temel noktalar olan balistik limit ve yapısal deformasyonlar gibi parametreleri çok yakından etkiler.

Bu noktadan hareketle; literatürde yer alan çalışmaların genel eğilimini yansıtacak örnek bir modelin bir sonlu elemanlar yazılımı ile incelenerek elde edilecek sonuçların değerlendirilmesi ve diğer çalışmaların verdiği bilgilerle karşılaştırılarak bunlarla uyumunun belirlenmeye çalışılması uygun olacaktır.

6.2. Zırhın Genel Yapısı

Günümüzde kullanılan zırh sistemleri tasarlanırken sadece perforasyonun önlenmesi gibi balistik özellikler baz alınmaz. Bunların yanında ateş, duman, toksik (FST) koruma ve gizlenme (stealth) karakteristiği gibi bazı özel amaçlara uygunluk ve yapısal yüklerin taşınması da tasarım esnasında dikkate alınır. Ayrıca modern bir zırh sisteminin ağırlık yönüyle de etkin olması beklenir.

Bu çalışmada incelenecek olan zırhın; seramik bir ön tabaka, kompozit malzemeden imal edilmiş bir arka tabaka ve her ikisi arasında hiperelastik bir ara tabakadan oluşan kombine bir yapıya sahip olması öngörülmüştür.

Seramik, yapısal ve termal özellikleri açısından metal ve plastiklerden daha üstün bir yapıya sahiptir. Diğer materyallerle karşılaştırıldığında ısıya karşı oldukça dayanıklıdır. Mermi, hedef içinde yol alırken oluşan sürtünmeden kaynaklanan yüksek ısı, bu ortamda yapısal mukavemet özelliklerini devam ettirecek ısıya dayanıklı bir malzeme seçimini gerektirir. Özellikle birden fazla malzemenin kullanıldığı kombine zırh uygulamalarında zırhın arkasında kalan personel veya teçhizatın bu yüksek ısıdan korunması yönünden, seramik gibi ısıl dayanımı yüksek malzemeler kullanılmaktadır. Seramik, ısıl özelliklerinin yanında mekanik olarak kırılgan bir yapıya sahiptir. Teorik olarak elastik modülünün yaklaşık %1 ila %10'u civarında kırılganlık mukavemetine sahiptir. Seramik tabaka ile mermi arasındaki temasın başından itibaren, seramiğin bu mukavim yapısı merminin uç şeklinde bir form bozukluğuna neden olur. Merminin küt bir yapıya sahip olması, büyük çarpma yüklerinin daha geniş bir bölgeye yayılmasına ve böylece penetrasyonun zorlaşmasına neden olur. Sonuç olarak yapısal ve mekanik birçok uygulamada tercih edilen seramik, bu incelemeye konu olan entegre zırhın ön tabakasında kullanılabilecek uygun bir malzeme olacaktır. Al_2O_3 diğer seramiklere oranla daha düşük yoğunluğa ve daha yüksek mukavemet özelliklerine sahip olması nedeniyle bu çalışmada kullanılacak seramik ön tabakayı temsil etmektedir.

Balistik çarpmalarda penetrasyon, merminin sahip olduğu kinetik enerji ile doğrudan bağlantılıdır. Bu bakımdan penetrasyonun ve özel olarak da perforasyonun önlenmesi için kinetik enerjinin çarpma esnasında absorbe edilerek deformasyon enerjisine dönüştürülmesi esastır. Son yıllarda çok yaygın olarak kullanılan kompozit

malzemeler birçok üstünlüklerinin yanında enerji emiş kapasiteleri yönüyle de ön plana çıkmaktadırlar. Bu konuda en üstün özellikler, organik elyaflar kullanılarak oluşturulan kompozit yapılarda ortaya çıkmaktadır. Yapılan çalışmalar Kevlar-29®'un çok yüksek bir enerji emiş kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle zırhın arka tabakasını Kevlar-29® elyaf malzemeden oluşan bir tabakalı kompozit oluşturacaktır.

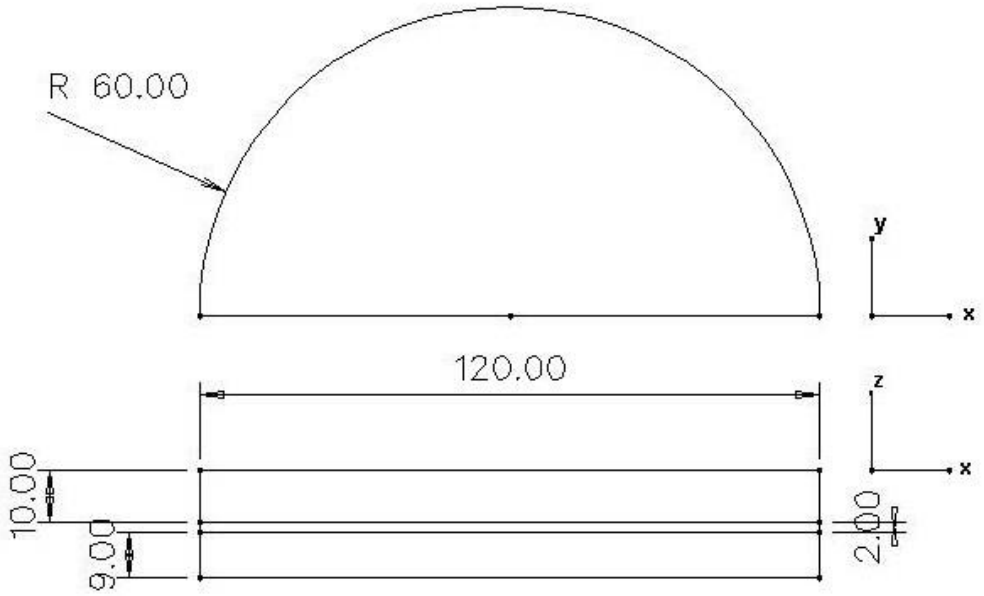
Seramik ve kompozit tabakaların yapısal davranışlarını birbirlerinden ayırabilmek amacı ile elastik özellikleri yüksek olan bir ara tabaka düşünülmelidir. Kauçuk (EPDM) yüksek enerji emiş kapasitesi ile ara tabaka olarak görev yapabilecek uygun bir malzemedir.

Tablo 6.1'de zırhı oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri görülmektedir.

Tablo 6.1 Malzeme özellikleri

ÖZELLİK	MALZEME		
	Al_2O_3	EPDM	KEVLAR-29®
Yoğunluk (g/cm^3)	3.99	1.34	1.23
Elastik Modül (GPa)	390	4	62
Poisson Oranı	0.22	0.2	0.25

Balistik bir incelemeye konu olan bir zırh için balistik limitin önemli bir parametre olduğundan daha önceki bölümlerde bahsedilmişti. Balistik limitin belirlenmesi ile ilgili çalışmalarda zırhın kalınlık boyunca yaklaşık %50'sinin penetrasyonu için merminin sahip olması gereken ilk hızın balistik limit olarak düşünülmesi gerekir. Çünkü hesaplamalarda dikkate alınamayan bazı şartlar nedeniyle sayısal modelde elde edilenden daha fazla penetrasyon meydana gelebilir. Bu nedenle yapılacak olan çalışmada kullanılan modele ait geometrik bilgiler, bu konu dikkate alınarak belirlenmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 Zırhın geometrisi

Daha önce de açıklandığı gibi zırhı oluşturan tabakaların çarpma yönüne göre sıralanışı; seramik (Al_2O_3), kauçuk (EPDM) ve kompozit (Kevlar-29®) şeklindedir.

6.3. Sonlu Elemanlar Yazılımı : ABAQUS/Explicit

ABAQUS; tek boyutlu lineer veya daha karmaşık non-lineer problemleri oldukça sağlıklı bir şekilde çözebilen, sonlu elemanlar metoduna dayalı, uygun bir mühendislik simülasyon programıdır. ABAQUS, sonlu elemanlar analizinde kullanılabilecek çok sayıda eleman tipini kullanarak modelin geometrisini oluşturabilme imkanı vermektedir. Aynı zamanda metallerden kompozitlere kadar çeşitli malzemelerin mekanik özelliklerini ve yapısal davranışlarını elasto-plastik olarak modellemek mümkündür.

Explicit ise ABAQUS yazılımının dinamik explicit sonlu elemanlar formulasyonu kullanan bir modülüdür. Bu modül, çarpma ve blast gibi dinamik geçiş (transient) problemlerini ve çarpma şartlarının değiştiği ileri non-lineer problemleri modellemek için oldukça uygundur.

Explicit çözüm metodu, atalet etkilerinin çözümde baskın rol oynadığı yüksek hızlı çarpma olaylarını modellemek için geliştirilmiş dinamik bir prosedürdür. Dinamik

denklemler çözülürken gerilme dalgaları gibi dengelenmemiş kuvvetler elemanlar arasında yayılırlar. Problemin çözümü çok küçük stabil zaman artımları ile gerçekleştiğinden artım sayısının mümkün olduğu kadar fazla sayıda olmasına ihtiyaç duyulur. Küçük zaman artımları ile yapılan bu kuasi-statik çözüm yönteminin amacı; problemi atalet etkilerinin önemsiz olduğu en küçük zaman aralıklarında modellemektir. Bu zaman aralığı malzemenin yoğunluğu ve dalga hızı ile aşağıdaki gibi ilişkilendirilebilir;

$$\Delta t = \frac{L^e}{c_d} \tag{6.1.a}$$

$$c_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{6.1.b}$$

Burada L^e karakteristik eleman uzunluğu, c_d dalga hızı, ρ ise yoğunluktur.

ABAQUS/Explicit için enerji dengesi, modelin uygun bir kuasi-statik davranışa sahip olup olmadığına karar verilebilmesi için önemli bir ölçüttür. Bunun için aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$E_I + E_V + E_{KE} - E_W = E_{top} = \text{sabit} \tag{6.2}$$

Bu eşitlikte; E_I iç enerji (elastik ve plastik), E_V viskoz disipasyonla emilen enerji, E_{KE} kinetik enerji, E_W dış kuvvetlerin yaptıkları toplam iş, E_{top} ise sistemin proses boyunca sabit kalması gereken toplam enerjisidir.

6.4. Matematiksel Yaklaşım

Klasik mekanik, sürekli bir hedefin dinamik davranışını fiziğin temel korunum yasaları (kütle, momentum ve enerjinin korunumu) ile oluşturulmuş diferansiyel denklemlerle tanımlar. Hedefin kinematik deformasyonu ile ilgili iki farklı temel tanım vardır; Euler (uzaysal yaklaşım) ve Lagrange (malzeme yaklaşımı). Bunlar kütle, momentum ve enerjinin korunumunu sırası ile aşağıdaki denklem sistemleri ile ifade ederler:

Lagrange;

$$D\rho/Dt + \rho\,(\partial v_i/\partial x_i) = 0 \qquad (6.3.a)$$

$$Dv_i/Dt = f_i + 1/\rho(\partial\sigma_{ij} / \partial x_i) \qquad (6.3.b)$$

$$De/Dt = f_i\, v_i + 1/\rho(\partial / \partial x_j)(\sigma_{ij}\, v_i) \qquad (6.3.c)$$

Euler;

$$\partial\rho/\partial t + (\partial / \partial x_i)(\rho\, v_i) = 0 \qquad (6.4.a)$$

$$\partial v_i/\partial t + v_j\,(\partial v_i / \partial x_i) = f_i + 1/\rho\,(\partial\sigma_{ij} / \partial x_j) \qquad (6.4.b)$$

$$\partial e/\partial t + v_i\,(\partial e / \partial x_i) = f_i\, v_i + 1/\rho(\partial / \partial x_j)\,(\sigma_{ij}\, v_i) \qquad (6.4.c)$$

Bu eşitliklerde yoğunluk **r**, hız $\boldsymbol{v_i}$, spesifik toplam enerji **e**, gerilme tansörü $\boldsymbol{\sigma_{ij}}$ ve birim kütle başına dış bünye yükü $\mathbf{f_i}$ ile ifade edilir. İki denklem sistemi arasındaki temel fark D/Dt türevinin tanımından kaynaklanmaktadır;

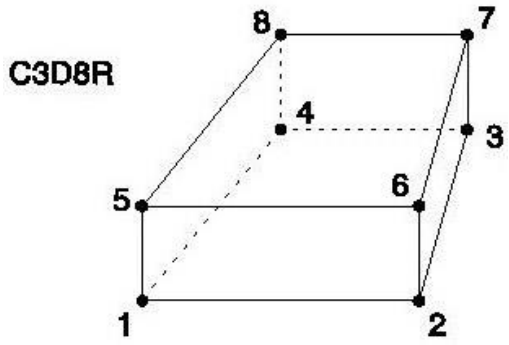
$$D/Dt = \partial / \partial t + v_i\,(\partial / \partial x_i) \qquad (6.5)$$

Tüm bu eşitlikler, incelenecek durumu tarif eden başlangıç ve sınır koşulları da eklendikten sonra anlamlı hale gelir.

6.5. Modelin Oluşturulması

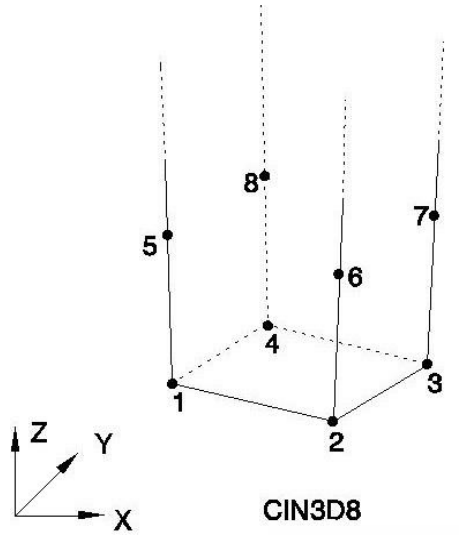
ABAQUS/Explicit ile yapılan çalışmada Şekil 6.1'de gösterilen geometrik kesite sahip bir hedef plak incelenmiştir. Çözüm için harcanan zamanı azaltabilmek için simetri özelliğinden faydalanılarak modelin yarısı, üç boyutlu, 8 düğüm noktalı, düzgün katı elemanlar kullanılarak modellenmiştir (Şekil 6.2) [15]. Bu eleman tipi kullanılarak yapılan bir analizde her düğüm noktası için ***x***, ***y***, ve ***z*** yönlerindeki yer

değiştirme bilgilerinin yanında, her eleman için tüm yönlerdeki gerilme bilgilerini de elde etmek mümkündür [15].



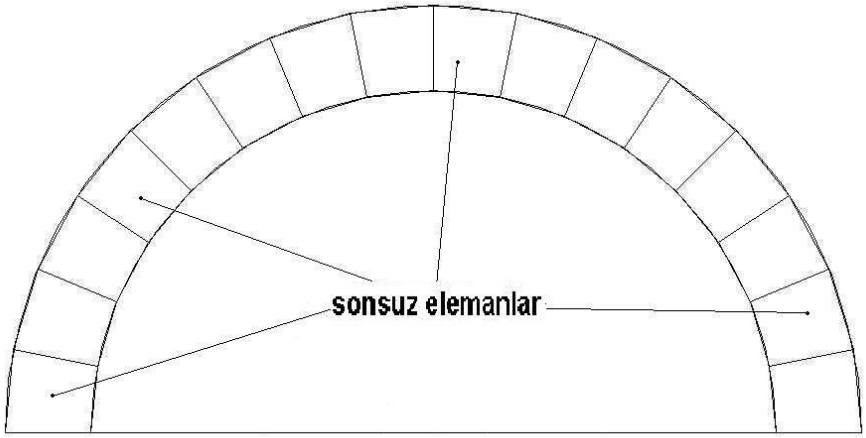
Şekil 6.2 Modelde kullanılan 3-boyutlu, katı eleman (C3D8R) [15]

Modelde kullanılan bir diğer eleman tipi de "sonsuz eleman"dır (Şekil 6.3) [15]. Bu eleman tipi sadece 1-2-3-4 düzleminden bağlandığı katı eleman için ankastre bir sınır koşulunu temsil eder; bunun dışında hiçbir gerilme ve yüke maruz kalmaz ve analizde sonsuz elemanlarla ilgili herhangi bir sonuç bilgisi elde edilmez.



Şekil 6.3 Sonsuz eleman (CIN3D8) [15]

Sınır koşullarını temsil edebilmek için plağın simetri ekseni dışında kalan dairesel yüzü "sonsuz" elemanlarla çevrelenmiştir (Şekil 6.4.a). Böylece çarpmaya maruz kalan bölge, sonsuza uzanan bir plağın küçük bir parçası gibi düşünülmektedir. Modelde kullanılan simetri özelliği için de hedef plağın x-y düzlemindeki kesitinde y-eksenine göre simetrik sınır koşulu tanımlanmıştır (Şekil 6.4.b).



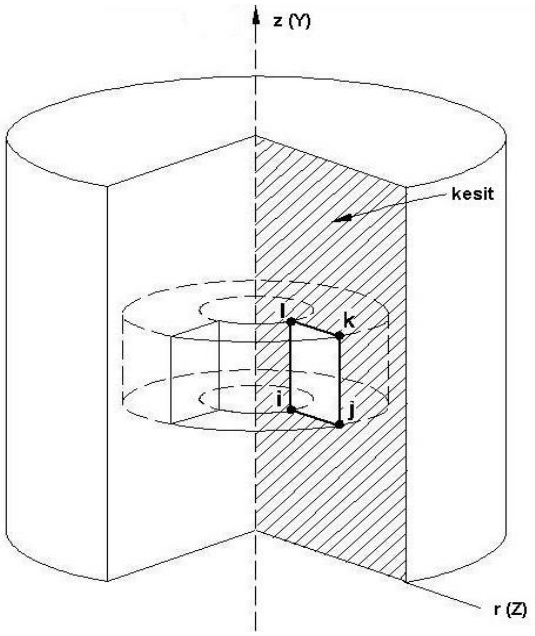
(a)



(b)

Şekil 6.4 Sınır koşulları

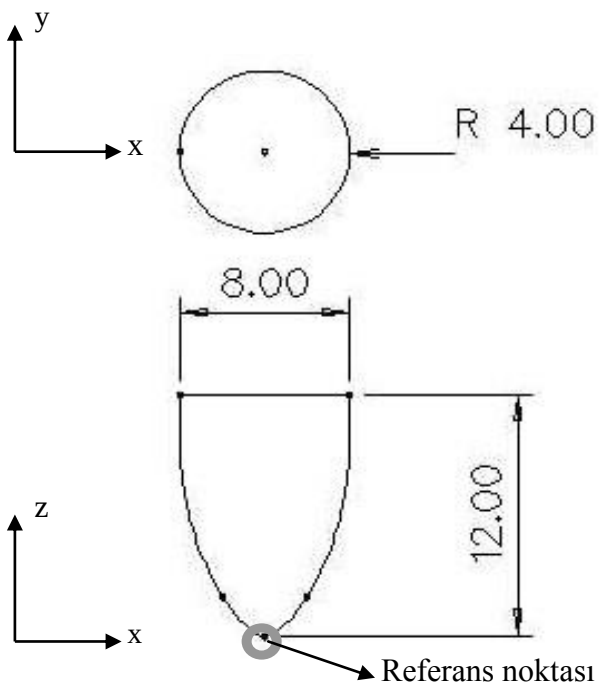
Hedef plağın dairesel olarak modellenmesiyle hem sınır koşullarının hem de üç boyutlu gerilme dalga yayılımının çözüme etkisini en ideal şekilde incelemek amaçlanmıştır.



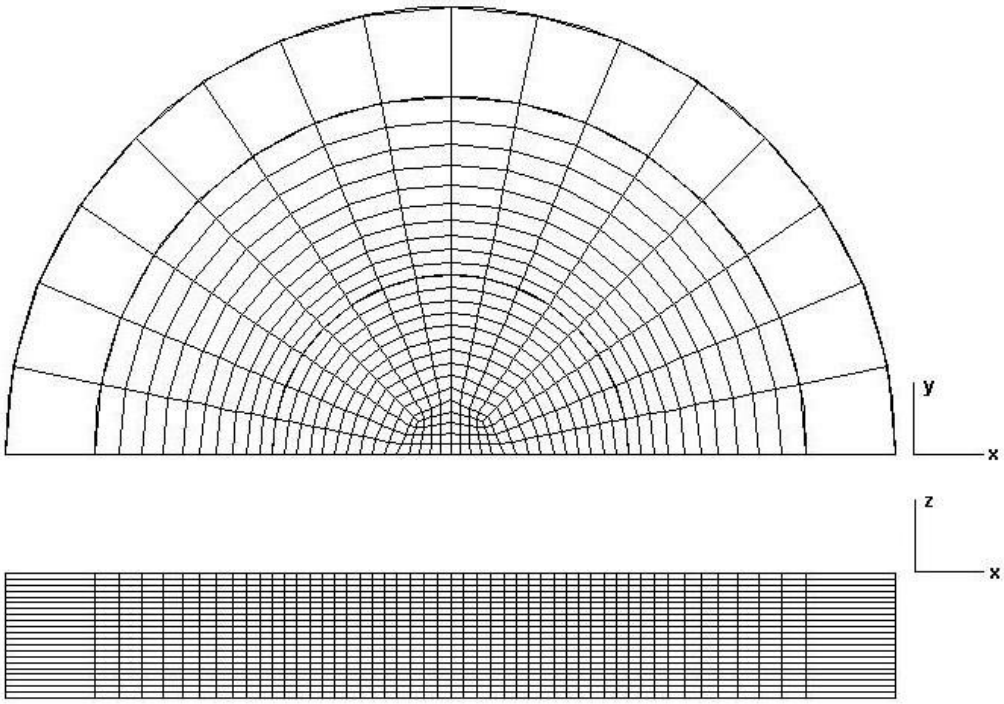
Şekil 6.5 Eksenel simetrik elemanlar (CAX4R) [15]

Tüm bu işlemleri; iki boyutlu "eksenel simetrik" (axisymmetric) elemanlar kullanarak sadece düzlemsel kesitin modellenmesi şeklinde gerçekleştirmek mümkündür (Şekil 6.5) [15]. Böylece çok daha az sayıda eleman kullanarak ve çok daha kısa bir hesaplama zamanı ile hassas bir analizin yapılabileceği öngörülebilir; ancak bu yöntemle elde edilen sonuçlar çok tatmin edici olmadığından üç boyutlu model tercih edilmiştir.

Bir çarpma olayının gelişimini belirleyen önemli unsurlardan biri de çarpma koşulları, yani merminin geometrisi ve çarpma hızıdır. Bu çalışmada; gerçek bir mermi çekirdeğine yakın bir geometriye sahip, 4 mm yarıçapında ve 12 mm uzunluğunda, üç boyutlu, rijid bir mermi modeli oluşturularak hedef plağa 325 m/s hızla çarpması tasarlanmıştır. Merminin çarpma istikametindeki boyutunun, yani uzunluğunun, rijid mermi yaklaşımı göz önüne alındığında hedefte oluşan penetrasyon açısından yeterli bir seviyede olduğu düşünülmektedir. Modelde merminin ağırlığı 13 g olarak kullanılmış ve referans noktası olan uç noktasında tanımlanmıştır. Merminin geometrisi Şekil 6.6'da görülmektedir.



Şekil 6.6 Merminin geometrik şekli

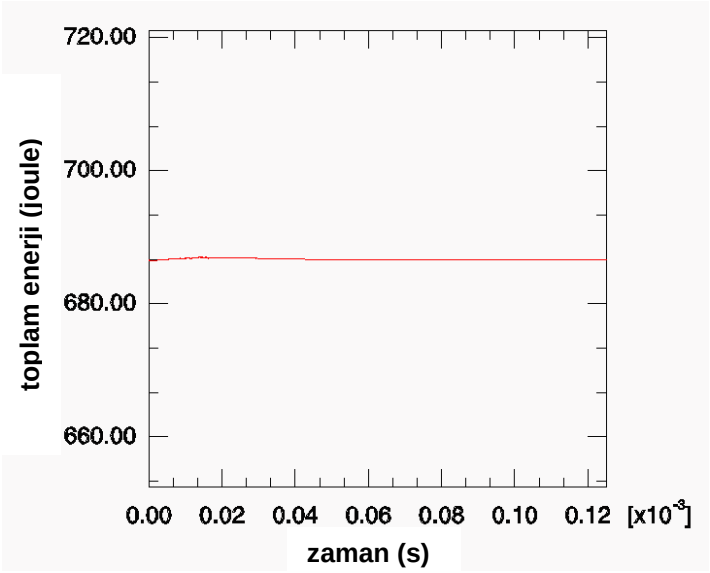


Şekil 6.7 Modelin ağ yapısı (mesh generation)

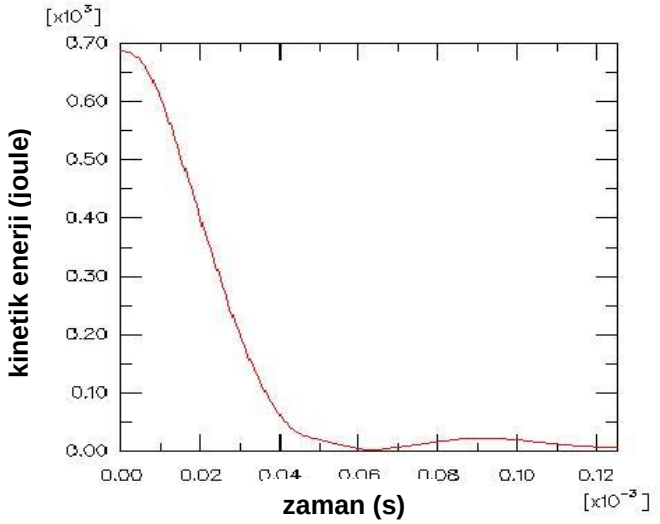
Bir sonlu elemanlar analizinde diskritizasyon, yani modelin küçük elemanlara bölünmesi, sonucun etkinliğini çok yakından etkileyen bir faktördür. Yapılan çalışmada mermi ile doğrudan temas halinde olan çarpma bölgesi diğer bölgelere göre daha küçük elemanlara bölünmüş, böylece çözüm zamanının çok fazla uzamasına neden olmadan mümkün olduğu kadar hassas bir çözüm elde edilmeye çalışılmıştır (Şekil 6.7).

6.6. Analiz

ABAQUS / Explicit ile gerçekleştirilen analizde; 13 g ağırlığındaki rijid bir merminin 325 m/s ilk hızla üç tabakalı entegre bir zırha çarpması üç boyutlu olarak modellenmiştir. Çalışmanın ana amacı; tasarlanan zırhın, belirlenen özel çarpma koşullarında balistik olarak uygun olup olmadığının belirlenmesidir. Ayrıca meydana gelen deformasyonlar ve gerilmeler incelenerek zırhın çarpma davranışı konusunda fikir edinilmeye çalışılmıştır.



Şekil 6.8 Sistemdeki toplam enerji

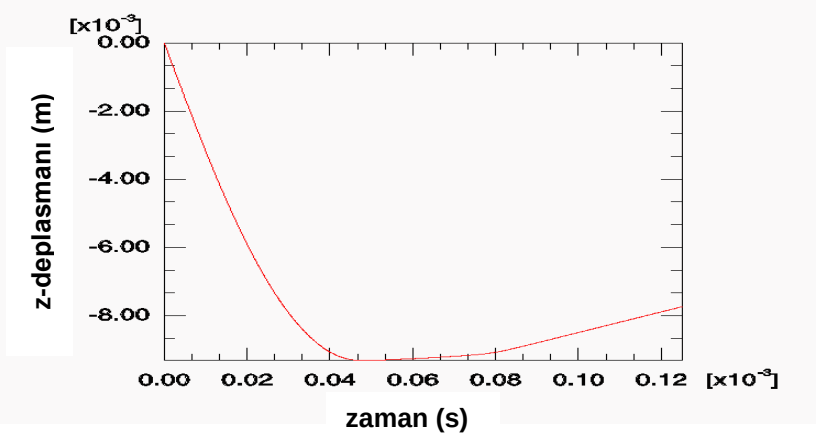


Şekil 6.9 Kinetik enerji

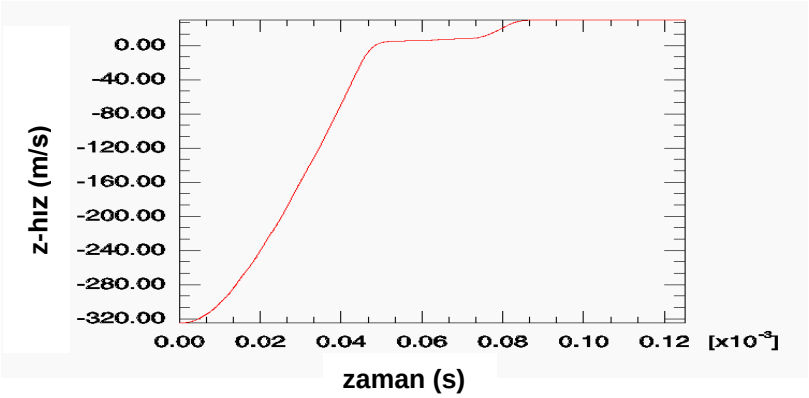
Daha önceki konularda da izah edildiği gibi bir sistemin sahip olduğu toplam enerji proses boyunca sabit kalır. Fiziğin bu temel korunum yasası, gerçekleştirilen analizin de kontrol edilmesi gereken parametrelerinin başında gelir. Şekil 6.8'de toplam enerjinin zamanla değişimi görülmektedir. Buna göre sistemdeki toplam enerji çok küçük ve ihmal edilebilir sapmalar dışında prosesin başında merminin sahip olduğu kinetik enerji olan 6.866×10^2 joule civarında sabit kalmaktadır.

Merminin hızından dolayı sahip olduğu kinetik enerji hedefle temas ettiği andan itibaren hedefe aktarılır ve mermi hızını kaybetmeye başlar. Bu durumda sistemdeki toplam kinetik enerjide de azalma meydana gelir (Şekil 6.9). Kinetik enerjinin

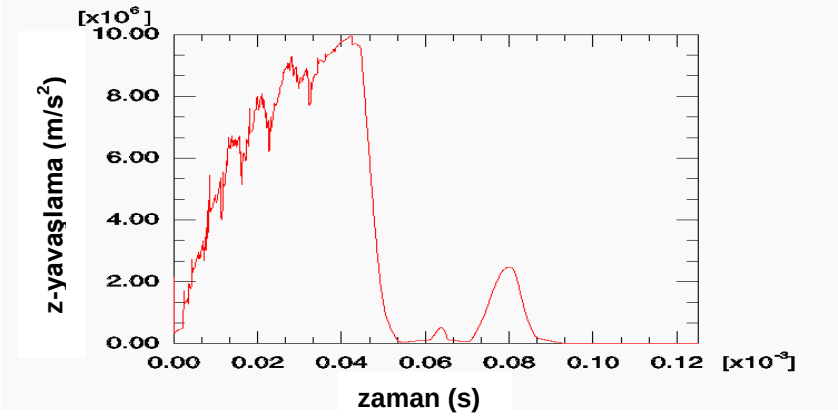
azalması merminin zırh içerisinde yavaşladığının en belirgin göstergesidir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi kinetik enerji 60 μs civarında sıfıra oldukça yakın bir değere ulaşmaktadır. Bu durumda merminin zırh içinde durduğu sonucuna ulaşılabilir. Çarpmanın etkisiyle zırhta meydana gelen hareket de sistemdeki kinetik enerji hesabına katıldığı için merminin durduğu düşünülen andan sonra da sistemde kinetik enerji mevcuttur.



a) Yer değiştirme



b) Hız

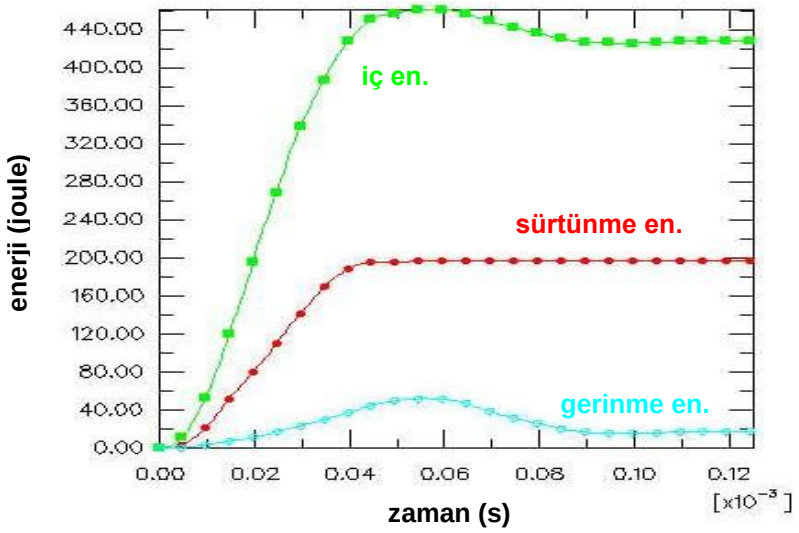


c) Yavaşlama

Şekil 6.10 Merminin kinematik geçmişi

Merminin referans noktasının çarpma yönündeki yer değiştirme-zaman grafiği Şekil 6.10.a'da görülmektedir. Şekilden de anlaşılabileceği gibi mermi 43 μs civarında maksimum yer değiştirme değerine (8.65 mm) ulaşmaktadır. Bu değer hedef plaktaki elastik deformasyonu da içerdiğinden prosesin geri kalanında mermi, hedefin elastik enerjisinin boşalması ile birlikte geriye doğru çekilir. Dolayısı ile mermi, seramik tabakanın sonlarına doğru 8 mm civarında bir deplasman sonunda durmaktadır.

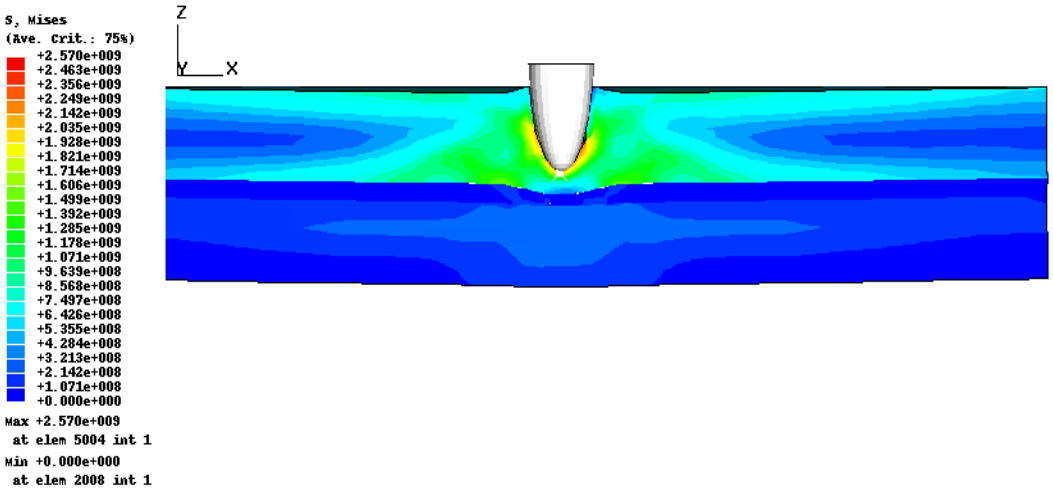
Şekil 6.10.b ve 6.10.c'de merminin hız ve yavaşlama eğrileri görülmektedir. Bu grafiklerde daha önce incelenen kinetik enerji ve yer değiştirme grafiklerinde elde edilen sonuçları doğrulayan değişimler söz konusudur. Mermi, yer değiştirme miktarıyla paralel bir şekilde yavaşlamakta ve hızı sıfır (0) değerine ulaştıktan sonra plağın elastik enerjisinden dolayı başlangıçtaki çarpma yönüyle ters yönde hızlanmaktadır.



Şekil 6.11 Enerji dağılımı

Çarpma olayı boyunca zırh tarafından absorbe edilen enerjinin dağılımı Şekil 6.11'de gösterilmektedir. Mermi tarafından hedefe aktarılan enerji sistemin iç enerjisinin artmasına neden olur. İç enerji çok genel bir yaklaşımla meydana gelen elastoplastik deformasyonun göstergesi olarak düşünülebilir. Deformasyonun elastik bölümünü oluşturan enerji prosesin sonunda sönümlenecek ve hedefte oluşan elastik deplasman eski halini alacaktır. Bu nedenle sistemde üretilen gerinme (strain) enerjisi hedefteki kalıcı deformasyonun daha açık bir ifadesidir. Grafik incelendiğinde iç enerjinin analiz sonundaki (125 μs) değerinin toplam enerjiye eşit olmadığı görülür. Bu fark, mermi ile zırh arasındaki sürtünme nedeni ile oluşan sürtünme enerjisinden

kaynaklanmaktadır. Sürtünme enerjisi ile iç enerjinin toplamı sistemdeki toplam enerji değerini sağlamaktadır.

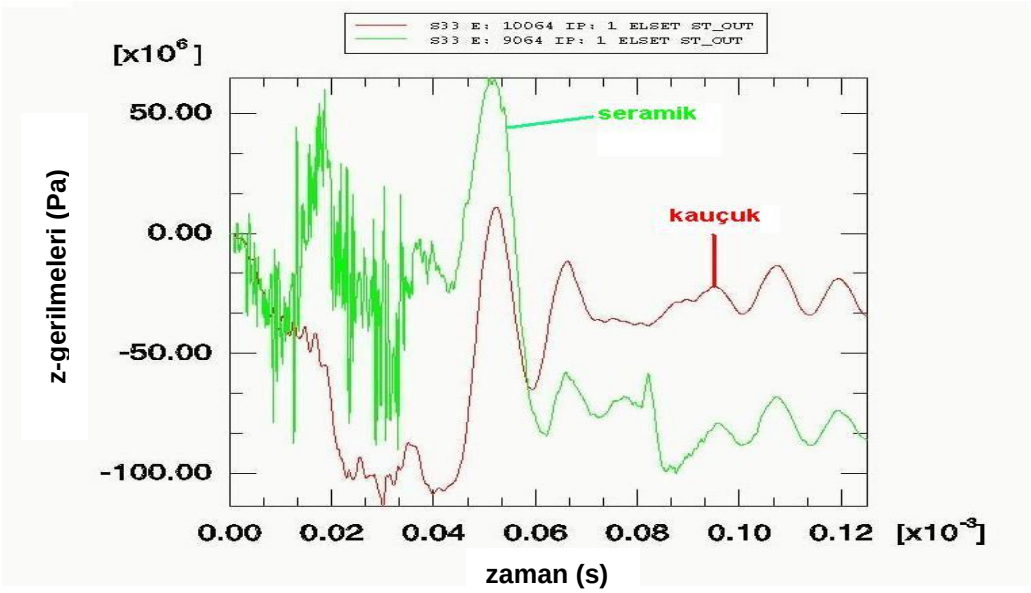


Şekil 6.12 Zırhın 75 μs anındaki görüntüsü

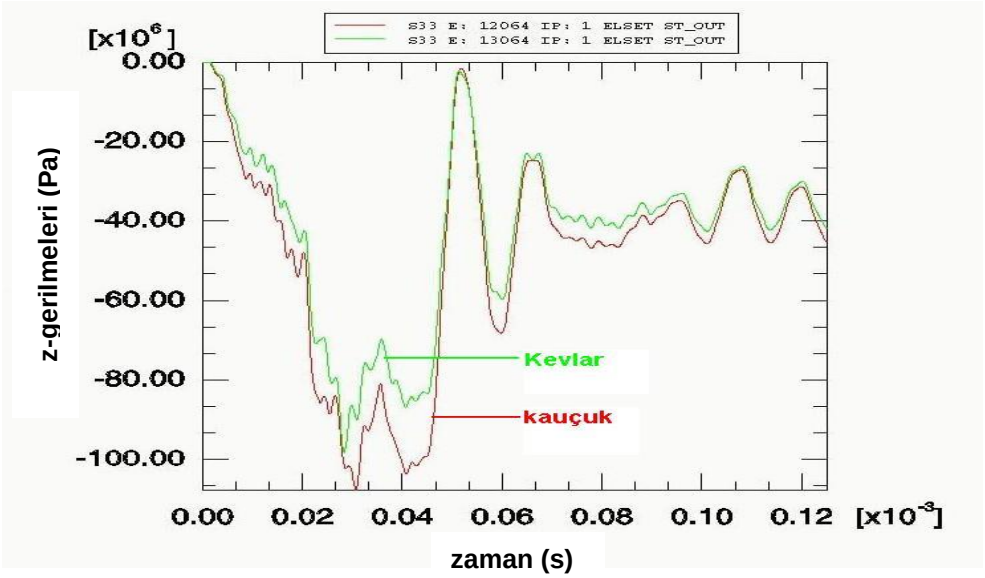
Hedefte meydana gelen deformasyon ve gerilme dağılımı, tasarlanan zırhın, incelenen özel çarpma koşullarında arkasındaki personel ya da teçhizatın emniyetini ne seviyede koruduğunun anlaşılabilmesi açısından önemlidir. Şekil 6.12'de hedefin 75 μs anındaki deforme olmuş görüntüsü ve gerilme kontur dağılımı görülmektedir. Şekil incelendiğinde merminin seramik ön tabakanın sonlarına yakın bir yerde durduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, kalınlığın %50'sine kadar penetrasyonun balistik limit için uygun bir değer olacağı yaklaşımı dikkate alındığında, incelenen çarpma şartları için düşünülen 325 m/s'lik mermi ilk hızının tasarlanan zırh için balistik limit civarında olabileceği sonucunu vermektedir. Şekilden de kolayca anlaşılabileceği gibi seramik tabaka mukavim ve kırılgan yapısından dolayı diğer tabakalara göre daha fazla gerilmeye maruz kalmakla beraber, eğilme tarzında oldukça küçük bir deformasyona uğramaktadır. Aynı şekilde hedefteki gerilme dağılımı incelendiğinde, global olarak kauçuk ve kompozit tabakalardaki gerilme değerleri seramik tabakaya oranla çok daha düşük seviyelerde kalmaktadır.

Hedefte çarpma nedeniyle meydana gelen deformasyonun, yapının mukavemetindeki değişimin ve zırh tarafından korunan personel ya da teçhizatın emniyetinin değerlendirilebilmesi için plağın çeşitli bölgelerindeki gerilme dağılımlarının

incelenmesi faydalı olacaktır. Şekil 6.13 çarpma yönündeki gerilmeleri (σ_z),Seramik-Kauçuk ve Kauçuk-Kevlar® ara yüzeylerde göstermektedir.



a) Seramik-Kauçuk



b) Kauçuk-Kevlar®

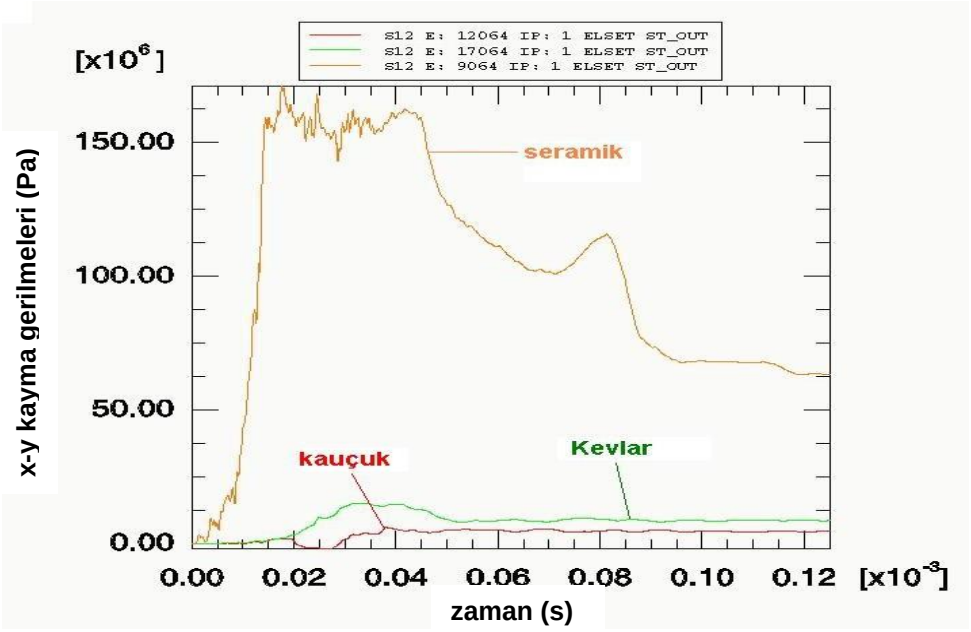
Şekil 6.13 Çarpma yönündeki gerilme dağılımları

Seramik-Kauçuk ara yüzeyindeki gerilme dağılımı incelendiğinde (Şekil 6.13.a), seramik tabakadaki σ_z gerilmesinin merminin hareketi boyunca gerilme dalga yayılımına bağlı olarak çekme ve basma yönlerinde değiştiğini, merminin kinetik enerjisi sona erdikten sonra ise basma yönünde kaldığını görmekteyiz. Kauçuk tabakada ise gerilme proses boyunca basma yönündedir. Her iki tabakadaki gerilme

değerleri çarpma olayı boyunca genellikle zıt yönlerde ve farklı büyüklüklerde olduğundan seramik-kauçuk ara yüzeyinin ayrılma eğiliminde olduğu söylenebilir.

Kauçuk-Kevlar® ara yüzeyindeki σ_z gerilme dağılımına bakıldığında, her iki katmanda da yaklaşık olarak aynı seviyelerde olduklarını söylemek mümkündür (Şekil 6.13.b). Bu durum, merminin seramik tabakada durmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısı ile Kauçuk-Kevlar® ara yüzeyinde, belirlenen çarpma koşulları için tabakalar arası ayrılmanın olmayacağı sonucuna varılabilir.

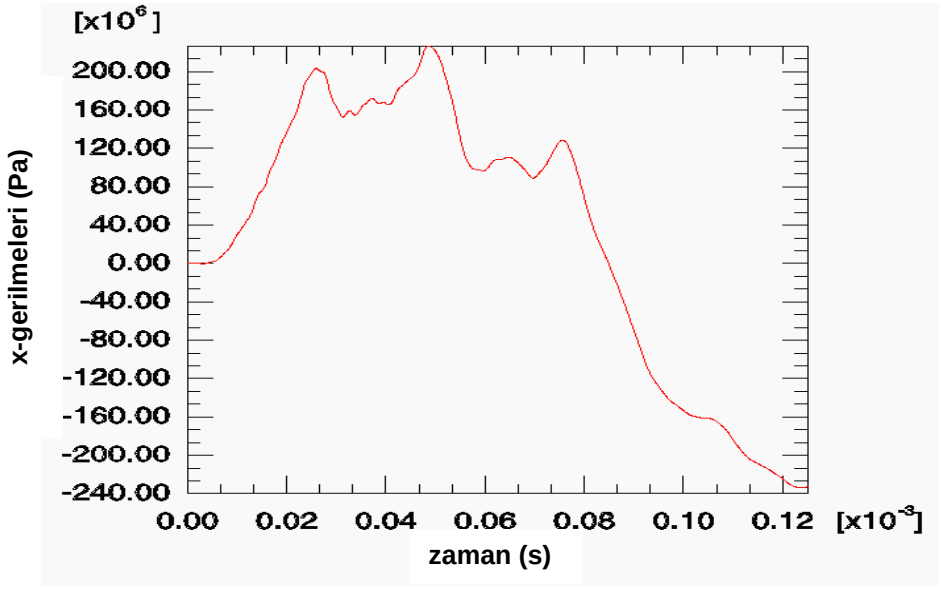
Şekil 6.14'de τ_{xy} kayma gerilmeleri görülmektedir.



Şekil 6.14 τ_{xy} Kayma gerilmeleri

Grafiğe göre kayma gerilmeleri, kauçuk ve kompozit tabakalarda çok düşük seviyelerde iken, seramik tabakada oldukça yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu, merminin zırh içindeki hareketinin seramik tabaka ile sınırlı oluşunun doğal bir sonucudur.

Penetrasyon nedeniyle zırhın arka yüzeyinde şişme ve eğilme deformasyonlarının oluşacağı daha önceki bölümlerde açıklanmıştı. Bu deformasyon tarzlarının karakteristiğini yorumlayabilmek için arka yüzeydeki σ_x gerilmelerini incelemek gerekir (Şekil 6.15).

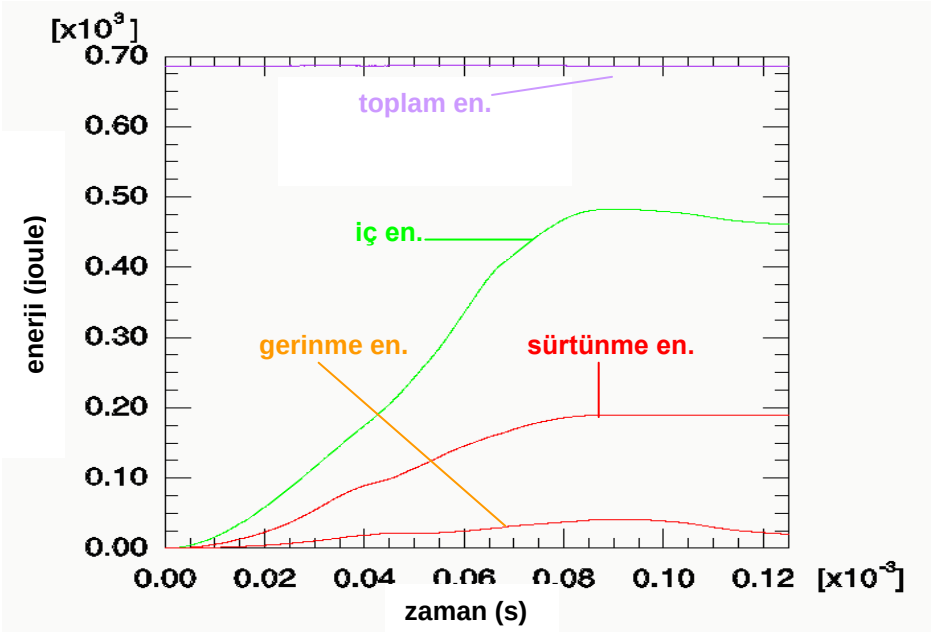


Şekil 6.15 Arka yüzeydeki σ_x gerilmeleri

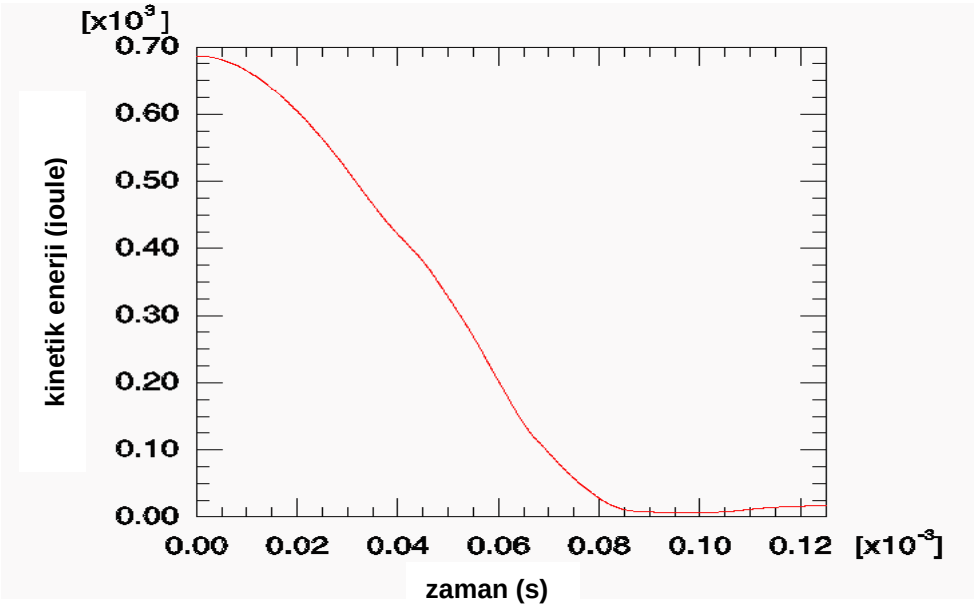
Hedefin arka yüzeyindeki σ_x gerilme dağılımına göre merminin ileri hareketi devam ettiği süre boyunca gerilme artmaktadır. Bu noktada, arka yüzeydeki şişme yüzeyinin genişlemesi beklenir. Mermi durduktan ve geriye hareketine başladıktan sonra ise gerilme seviyesinde bir azalma ve ardından ters yönde artma söz konusudur.

Tüm bu bulguların ışığında, belirlenen çarpma şartları için tasarlanan zırhın etkin bir koruma sağlayacağı sonucuna ulaşmak mümkündür. Ancak bu sonucu doğrulamak için mermi ve zırh konfigürasyonunda bazı değişiklikler yaparak analizleri tekrarlamak sağlıklı bir sonuç elde edebilmek için gereklidir. Bu amaçla öncelikle zırhın konfigürasyonunun uygunluğu sorgulamak için çarpma şartları korunmak kaydıyla seramik ve Kevlar® tabakaların yerleri değiştirilerek analiz yapılmıştır. Zırhtaki bu değişiklik, çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde "**CNF2**" kodu ile belirtilecektir. Daha önce olduğu gibi ilk olarak sistemin enerji dağılımları incelenmiştir (Şekil 6.16). Grafiklere göre toplam enerji proses boyunca korunmaktadır. Kinetik enerjinin deformasyon enerjisine dönüşmesini sağlayan enerji emiş tarzları açısından sürtünme ve yer değiştirme enerjileri ile iç enerjinin proses boyunca ulaştığı değerler, daha önce incelenen zırhtan çok farklılıklar taşımamakta, ancak zamana göre dağılımları değişiklikler göstermektedir (Şekil 6.16.a). Merminin yer değişiminin de bir göstergesi olan kinetik enerji dağılımı incelendiğinde ise merminin durma zamanının oldukça artarak 85 μs civarında

gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Bu farklılık, seramiğin Kevlar®'a oranla basma yönünde daha mukavim bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

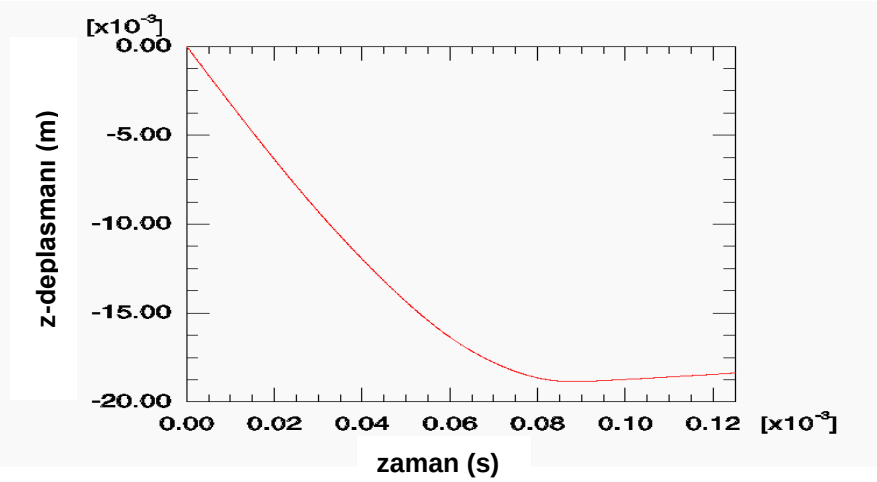


a) Enerji emilişi

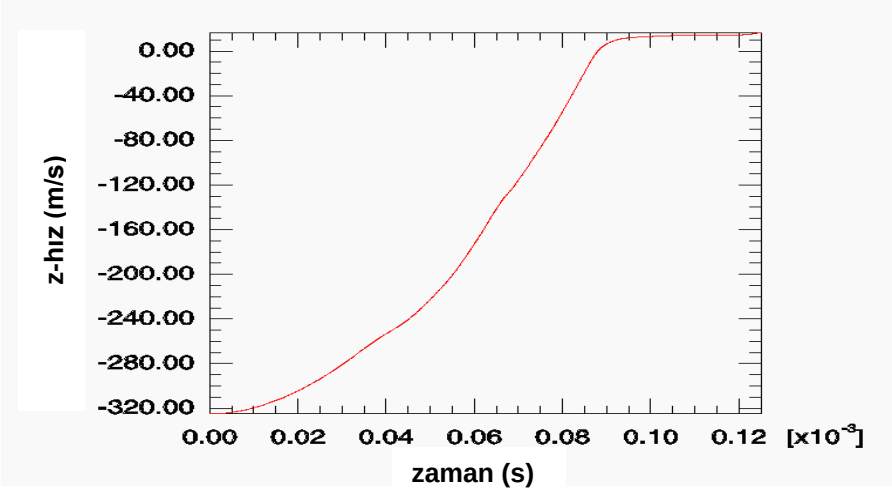


b) Kinetik enerji

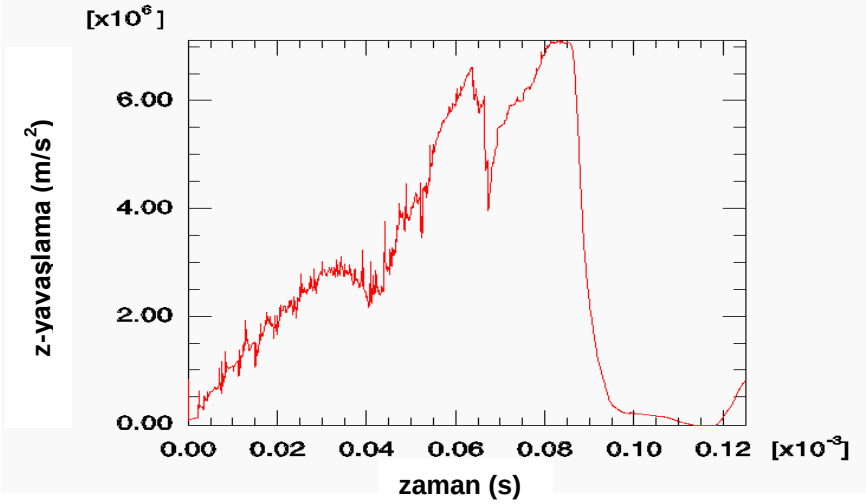
Şekil 6.16 Enerji dağılımları (CNF2)



a) Yer değiştirme



b) Hız

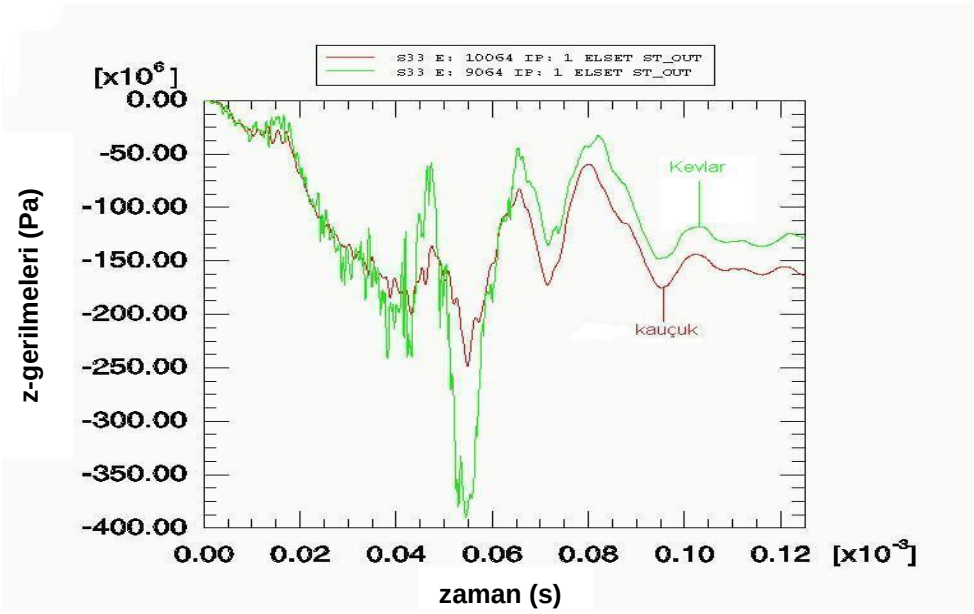


c) Yavaşlama

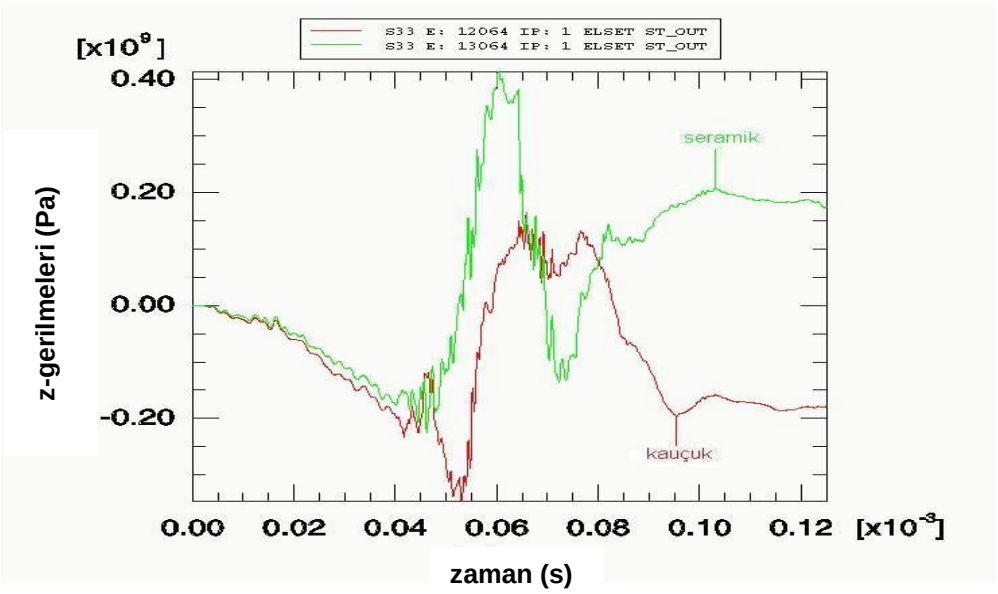
Şekil 6.17 Merminin kinematik geçmişi (CNF2)

Şekil 6.17'de merminin yer değiştirme, hız ve yavaşlama grafikleri görülmektedir. Buradan da kolayca anlaşılacağı gibi zırhı oluşturan tabakaların yerleri değiştirildiğinde mermi neredeyse zırhın tamamını delip geçmekte ve yaklaşık 19 mm deplasmana uğradıktan sonra 85 μs anında durmaktadır.

Şekil 6.18'de zırhtaki yeni malzeme sıralaması (CNF2) durumunda arayüzeylerdeki σ_z gerilme dağılımları görülmektedir.



a) Kevlar®-Kauçuk



b) Kauçuk-Seramik

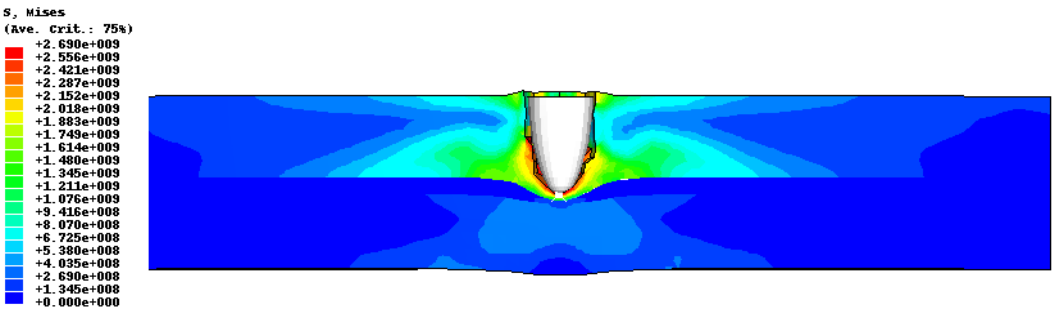
Şekil 6.18 Arayüzeylerdeki σ_z gerilme dağılımları (CNF2)

Bu grafiklere göre Kevlar®-Kauçuk arayüzeyindeki elemanlarda gerilme sürekli basma yönünde kalmaktadır. Kauçuk-Seramik arayüzeyinde ise iki tabakadaki elemanlardaki gerilmeler zaman zaman ters yönlerde değişmektedir. Her iki arayüzeydeki gerilmeler önceki konfigürasyonla karşılaştırıldıklarında dört kata kadar arttıkları gözlenmektedir.

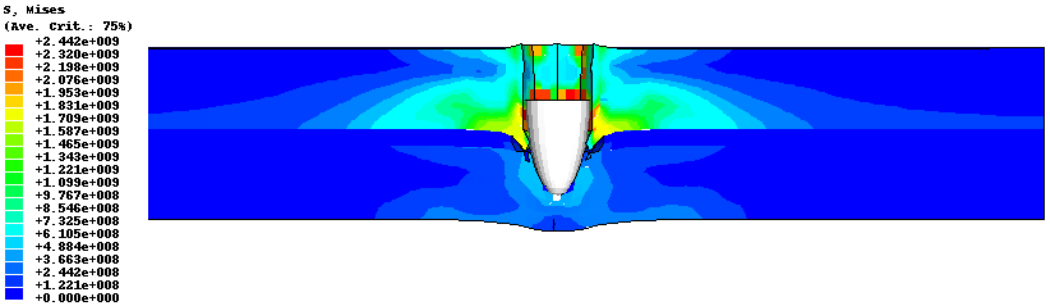
Sonuç olarak malzeme sıralamalarının değiştirilmesiyle elde edilen yeni analiz sonuçlarına göre; mermi başlangıç şartlarında her iki konfigürasyonda da aynı ilk hıza sahip olmasına rağmen kompozit tabakanın üstte olduğu çarpma durumunda (CNF2) zırh içinde çok daha fazla ilerlemekte, kompozit ve kauçuk tabakaları tamamen delip geçmekte ve seramik tabakada belli bir miktar ilerledikten sonra durmaktadır. Penetrasyon derinliğinin bu kadar fazla olması balistik performans açısından arzu edilmeyen bir durumdur. Ayrıca çarpma yönünde oluşan σ_z gerilmeleri de ilk konfigürasyondakinden çok daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Gerilmelerin yüksek olması, zırhın yapısal dayanımının zayıflamasına ve koruma görevini etkin olarak yerine getirememesine neden olur. Elde edilen bu sonuçlardan sonra, oluşturulan yeni konfigürasyona sahip zırhın koruduğu personel ya da teçhizatın emniyeti için balistik açıdan etkin olarak kullanılamayacağı sonucuna varılabilir.

Tasarlanan zırhın balistik etkinliğinin değerlendirilebilmesi için bir diğer faktör olarak mermi hızı, yani sistemin başlangıç anında sahip olduğu kinetik enerji ele alınmalıdır. Bu karşılaştırmalı analizi gerçekleştirmek üzere merminin ilk hızı incelenenden daha yüksek seviyelere artırılarak (400 m/s, 450 m/s, 500 m/s) merminin ve zırhın davranışları gözlenmiş, tasarlanan zırhın balistik limitinin mertebesi hakkında bir fikir oluşturulmaya çalışılmıştır. İlk hızlar değiştirilerek elde edilen bu yeni çarpma koşulları da "**CNF3"** kodu ile gösterilecektir.

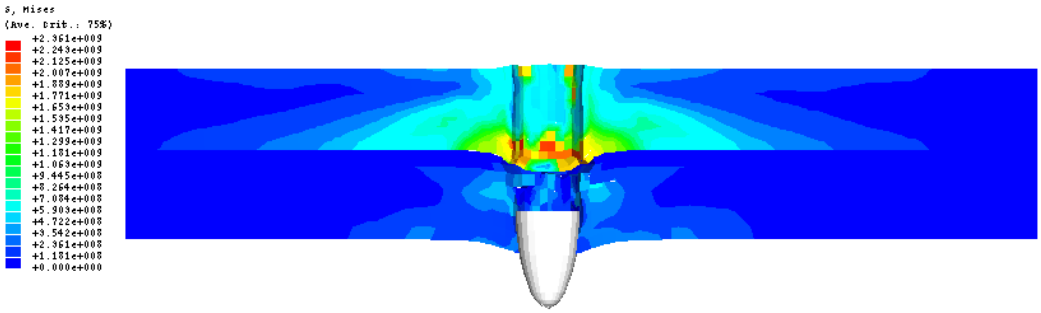
Şekil 6.19'da farklı ilk hızlara sahip merminin hedefte yarattığı deformasyonlar görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi hız arttıkça merminin, yani sistemin sahip olduğu kinetik enerji de artmakta, dolayısıyla çarpma boyunca zırha aktarılan kinetik enerji deformasyon enerjisine dönüşerek merminin zırh içine daha fazla girmesine sebep olmaktadır. Hızın 500 m/s olduğu durumda ise büyük oranda perforasyon gerçekleşmektedir.



a) V_0=400 m/s



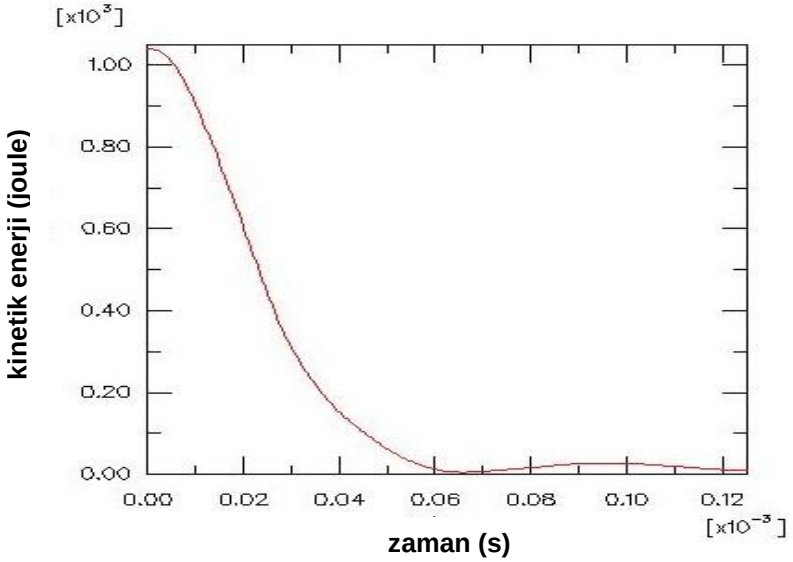
b) V_0=450 m/s



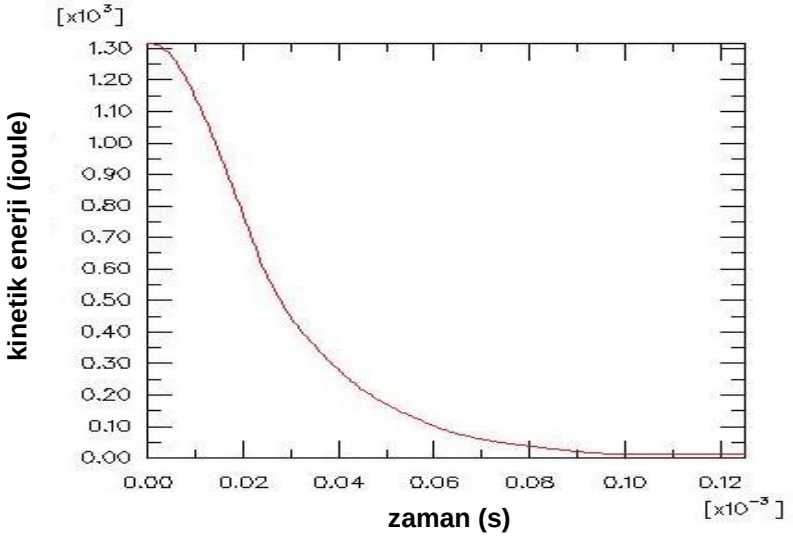
c) V_0=500 m/s

Şekil 6.19 Yüksek hızlardaki çarpmalar için deformasyonlar (CNF3)

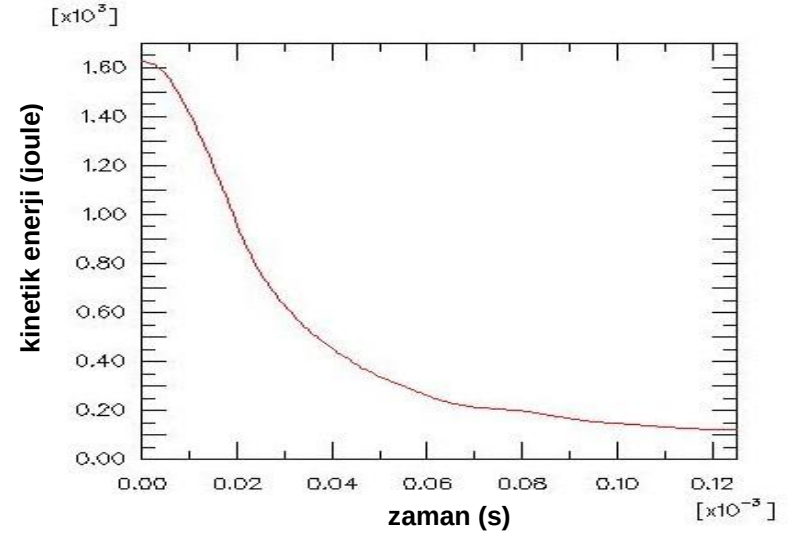
Aynı şekilde değişik hızlardaki mermilere ait kinetik enerji değişimleri de mermideki yavaşlamanın ilk hızla orantılı olarak geciktiğini ve 500 m/s ilk hızda gerçekleşen çarpma neticesinde proses sonunda kinetik enerjinin küçük bir değere sahip olduğu, yani merminin zırhın hemen hemen tamamını delip geçtikten sonra durabildiği sonucunu vermektedir (Şekil 6.20). Bu durumda tasarlanan üç katmanlı entegre zırh için 500 m/s'ye yakın bir balistik limite sahip olduğunu söylemek mümkündür.



a) V_0=400 m/s

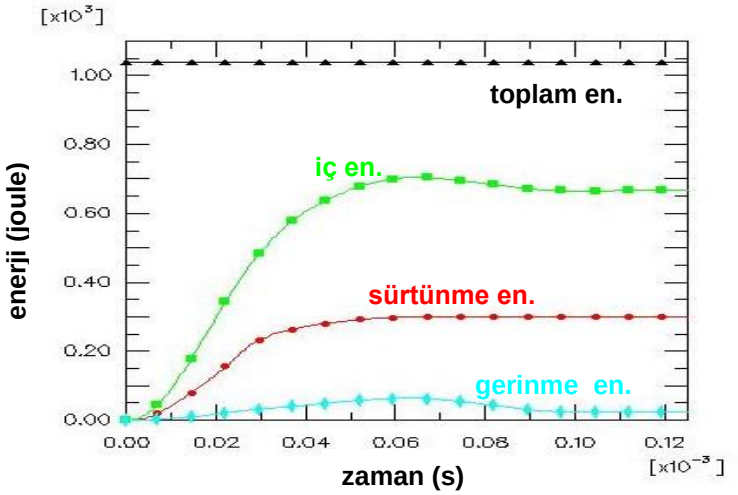


b) V_0=450 m/s

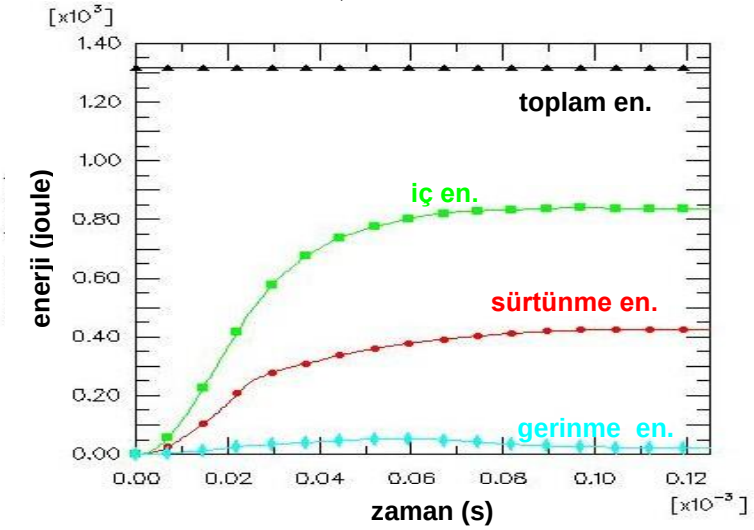


c) V_0=500 m/s

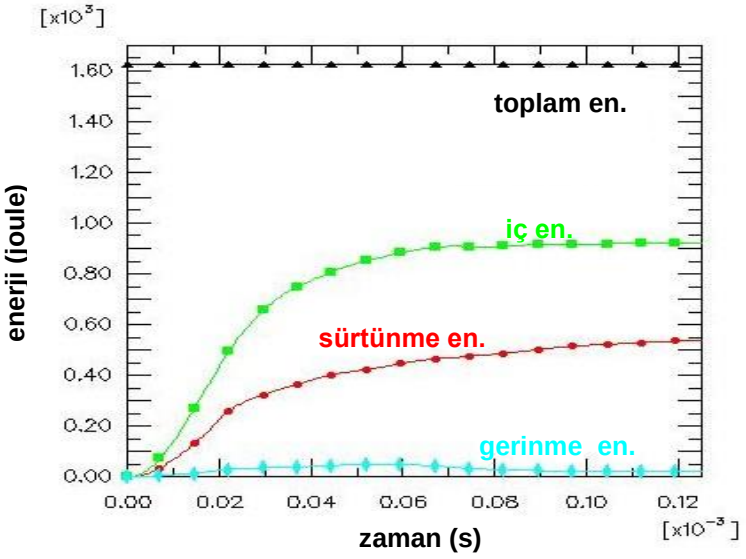
Şekil 6.20 Kinetik enerji değişimleri (CNF3)



a) V_0=400 m/s



b) V_0=450 m/s



c) V_0=500 m/s

Şekil 6.21 Enerji dağılımları (CNF3)

Şekil 6.21'de ele alınan seviyelerdeki hızlar için kinetik enerjilerin deformasyon enerjisine dönüşümleri görülmektedir. Grafiklerden, hızlardaki artışlarla yapılan yeni analizlerde de temel korunum yasalarına uygun olarak sistemdeki toplam enerjilerin başlangıç değerlerini proses boyunca korudukları, bunun dışında enerji dönüşümlerinin genel karakteristiklerinde bir değişiklik olmadığı anlaşılmaktadır.

Bu sonuçlara göre mermi hızı arttıkça beklendiği gibi merminin zırh içinde aldığı yol da artmakta, balistik limite yakın olarak düşünülen 500 m/s ilk hızla gerçekleşen çarpmada ise mermi zırhı tamamıyla delmektedir. Böylece zırhın %50'sinin penetrasyonunun balistik limit değerlendirmesi için doğru bir yaklaşım olacağı da düşünülürse çalışmada ele alınan çarpma hızı olan 325 m/s'nin incelenen model için uygun seviyelerde olduğu sonucuna varmak mümkündür.

6.7. Sonuçlar

Bu çalışmada ABAQUS/Explicit sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yüksek hızlı çarpma yükleri altındaki entegre bir zırhın davranışları incelenmiştir. Modelde üç boyutlu, 8 düğüm noktalı, düzgün katı elemanlar kullanılmıştır. Sınır şartları sonsuz elemanlarla temsil edilmiş ve böylece model sonsuz bir plağın küçük bir parçası gibi düşünülmüştür. Simetri özelliğinden yararlanılarak hedef plağın yarısı modellenmiş ve analiz süresinin azaltılması planlanmıştır. Hedefe çarpacak cisim 8 mm çapında, 12 mm uzunluğunda ve 13 g ağırlığında rijid bir mermi çekirdeği olarak tasarlanmış ve 325 m/s ilk hıza sahip olması öngörülmüştür. Elde edilen analiz sonuçlarının değerlendirilebilmesi için zırhı oluşturan katmanların sıralaması ve merminin ilk hızında değişiklikler yapılarak farklı kofigürasyonlar elde edilmiş ve analizler tekrarlanmıştır.

Yapılan analizler neticesinde şu bulgular elde edilmiştir:

1. Sistemin toplam enerjisi proses boyunca başlangıçtaki kinetik enerji miktarına eşit değerde sabit kalmaktadır. Mermi zırh içinde ilerledikçe sahip olduğu kinetik enerji zırha aktarılmakta ve deformasyon enerjisine dönüşmektedir. Oluşturulan modelin bu yönleriyle fiziğin temel korunum yasalarına ve bir çarpma olayının genel karakterine uygun bir yapıda olduğu görülmektedir.

2. Mermi, seramik tabakanın sonlarına kadar ilerledikten sonra durmuştur. Bu durum zırhın %50'sinin penetrasyonunun emniyetli bir sonuç olacağı yaklaşımına göre uygun bir model kullanıldığını göstermektedir. Ancak mermi modellenirken rijid olduğu varsayıldığından çarpma boyunca herhangi bir deformasyona uğramamıştır. Dolayısıyla seramik tabaka asıl işlevlerinden biri olan merminin uç şeklini bozarak penetrasyonu zorlaştırma görevini yerine getirememiştir. Bu nokta dikkate alındığında, eğer mermi için de elastoplastik bir model oluşturulursa belirlenen çarpma koşulları için penetrasyonun daha düşük bir seviyede olacağı ve mermi ilk hızının gerçekte olması muhtemel balistik limitin altında kalacağı öngörülebilir.

3. Arayüzeylerdeki σ_z gerilmeleri incelendiğinde, seramik-kauçuk arayüzeyindeki iki tabakaya ait gerilme farklılıklarının bir ayrılmaya neden olabileceği, kauçuk-Kevlar® arayüzeyindeki gerilmelerin ise birbirlerine çok yakın ve daha düşük seviyelerde kaldıkları gözlenmiştir. Kayma gerilmelerinde ise seramik tabakada diğerlerine oranla çok daha yüksek değerler söz konusudur. Bu durum penetrasyonun neden olduğu deformasyonun yoğun olarak seramik tabaka içinde sınırlı kalmasından kaynaklanmaktadır. Zırhın arka yüzeyindeki σ_x gerilmeleri oluşan şişme deformasyonunun bir göstergesi olarak merminin durduğu ana kadar artmakta, zırhta depolanan elastik enerjinin boşalmasıyla bu gerilme değerinde de azalma ve daha sonra ters yönde artma meydana gelmektedir.

4. Zırhı oluşturan katmanların sıralaması değiştirildiğinde, mermi zırh içinde daha fazla ilerlemekte ve yapıda oluşan gerilmeler 4 katına kadar artmaktadır. Bu farklılık seramiğin Kevlar®'a göre basma yönünde daha mukavim bir yapıda olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak Kevlar®'ın maruz kaldığı çarpma yüklerini geniş bir alana yayma özelliği nedeniyle enerji emiş kapasitesinin yüksek oluşu dikkate alınırsa bu sonuç beklenenden bir miktar uzak olarak değerlendirilebilir. Önceki bölümde ele aldığımız, Zhu tarafından gerçekleştirilmiş olan çalışmanın sonuçları incelendiğinde, kontrol için oluşturulan yeni konfigürasyondaki (CNF2) Kevlar® katmanın kalınlığına yakın kalınlıktaki bir örnekle yapılan çarpma testlerinden elde edilen balistik limit değerinin 150 m/s civarında olduğu görülmektedir (Şekil 5.6 ve Tablo 5.3) [13]. Aynı çalışmada merminin çıkış hızlarının gösterildiği grafik 325 m/s çarpma hızını kapsamamakla birlikte, bu çarpma hızında merminin çıkış hızının 250-

300 m/s arasında olması beklenebilir (Şekil 5.7) [13]. Yeni modelin (CNF2) kinematik geçmişi incelendiğinde (Şekil 6.17), merminin kompozit tabakayı geçtiği zaman anında hızının 325 m/s'den 280m/s civarlarına düşmüş olduğu anlaşılmaktadır. Bu çıkış hızının balistik limit olarak düşünülen 150 m/s'den bu kadar uzak olmasına; kinetik enerjinin, hızın karesi ile doğru orantılı olarak değişmesinin yanında, Kevlar® kompozitin aynı malzeme özelliklerine sahip katı bir yapı şeklinde modellenmesinin de neden olabileceği düşünülmektedir. Ancak önceki bölümde incelenen çalışmanın sonuçları ile yapılan karşılaştırma neticesinde elde edilen paralellik, oluşturulan modelin uygunluğunu ve geçerliliğini destekler niteliktedir.

5. Çalışmanın sonuçlarını değerlendirmek amacıyla hızların artırılmasıyla elde edilen yeni çarpma şartlarında yapılan analizler neticesinde, hız arttıkça penetrasyon derinliğinin de arttığı, 500 m/s civarında ise teorik olarak balistik limite ulaşıldığı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] **Zukas, J.A.,** 1990. High Velocity Impact Dynamics, John Wiley & Sons Inc., Chichester.

[2] **Abrate, S.,** 1998. Impact on Composite Structures, Cambridge University Press, Cambridge.

[3] **Shim, V.P.W., Lim, C.T. and Foo, K.J.,** 2001. Dynamic mechanical properties of fabric armour, *Int. J. Impact Engineering*, **25,** 1-15.

[4] **Naik, N.K. and Meduri, S.,** 2001. Polymer-matrix composites subjected to low velocity impact: effect of laminate configuration, *Composites Science and Technology*, **61,** 1429-1436.

[5] **Kang, T.J. and Kim, C.,** 2000. Energy absorption mechanisms in Kevlar® multiaxial warp-knit fabric composites under impact loading, *Composites Science and Technology*, **60,** 773-784.

[6] **Billon, H.H. and Robinson, D.J.,** 2001. Models for the ballistic impact of fabric armour, *Int. J. Impact Engineering*, **25,** 411-422.

[7] **Roylance, D., Chammas, P., Ting, J. and Scott, B.,** 1995. Numerical Modeling of Fabric Impact, *Proceedings of the National Meeting of the American Society of Mechanical Engineers (ASME),* San Francisco, October 1995, USA.

[8] **Abrate, S.,** 2001. Modeling of impacts on composite structures, *Composite Structures,* **51,** 129-138.

[9] **Thiruppukuzhi, S.V. and Sun, C.T.,** 2001. Models for the strain-rate dependent behavior of polymer composites, *Composites Science and Technology*, **61,** 1-12.

[10] **Christoforou, A.P.,** 2001. Impact dynamics and damage in composite structures, *Composite Structures*, **52,** 181-188.

[11] **Mahfuz, H., Zhu, Y., Haque, A., Abutalib, A., Vaidya, U., Jealani, S. and Gama, B.,** 2000. Investigation of high-velocity impact on integral armor using finite element method, *Int. J. Impact Engineering*, **2,** 203-217.

[12] **Zhu, G., Goldsmith, W. and Dharan, C.K.H.,** 1992. Penetration of laminated Kevlar® by projectiles-I. Experimental Investigation, *Int. J. Solids Structures,* **4,** 399-420.

[13] **Zhu, G., Goldsmith, W. and Dharan, C.K.H.,** 1992. Penetration of laminated Kevlar® by projectiles-II. Analytical Model, *Int. J. Solids Structures,* **4,** 421-436.

[14] **Vural, M.,** 2000. Ballistic performance and impact behavior of alumina armor ceramics, *Ph.D. Thesis,* Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, İstanbul.

[15] ABAQUS User's Example and Theory Manual, 1998. Hibbitt, Karlson & Sorenson Inc.

[16] **Munz, D. and Fett, T.,** 1999. Ceramics: Mechanical Properties, Failure Behaviour, Materials Selection, Springer, Berlin.

[17] **Yanagida, H., Koumoto, K. and Miyayama, M.,** 1996. The Chemistry of Ceramics, John Wiley & Sons Inc., Chichester.

[18] **Barbero, E.J.,** 1999. Introduction to Composite Materials Design, Taylor & Francis Inc., Philadelphia.

[19] Selection and Application Guide to Police Body Armor, October 1998. U.S. National Institute of Justice Guide 100-88, The National Institute of Justice's National Law Enforcement and Corrections Technology Center, Rockville.

[20] **Yarin, A.L., Rubin, M.B. and Roisman, V.,** 1995. Penetration of a rigid projectile into an elasto-plastic target of finite thickness, *Int. J. Impact Engineering,* **16,** 801-831.

[21] **Yossifon, G., Rubin, M.B. and Yarin, A.L.,** 2001. Penetration of a rigid projectile into a finite thickness elastic-plastic target – comparison between theory and numerical computations, *Int. J. Impact Engineering,* **25,** 265-290.

[22] **Perche, N., Hilare, B., Maile, J.C. and Scanzi, J.M.,** 1998. Effect of ballistic impact on the compression behaviour of carbon/glass hybrid composite sandwich panels for military bridging structures, in *Mechanics of Sandwich Structures,* pp. 239-246, Kluwer Academic Publishers, Netherland.

[23] **Tarım, N., Fındık, F. and Uzun, H.,** 2002. Balistic impact performance of composite structures, *Composite Structures,* **56,** 13-20.

[24] **Chocron, S., Anderson, C.E., Grosch, D.J. and Popelar, C.H.,** 2001. Impact of the 7.62 mm APM2 projectile against the edge of the metallic target, *Int. J. Impact Engineering,* **25,** 423-437.

[25] **Woodward, R.,L.,** 1996. Modelling geometrical and dimensional aspects of ballistic penetration of thick metal targets, *Int. J. Impact Engineering,* **18,** 369-381.

ÖZGEÇMİŞ

Evren ÖZŞAHİN, 1975 yılında Sinop'ta dünyaya geldi. İlk ve orta öğrenimini Sinop'ta tamamladı. 1991 yılında girdiği Hava Harp Okulu Uçak Mühendisliği bölümünden 1995 yılında mezun oldu. 1997 yılında, Uçak Bakım Subay Temel Eğitiminin ardından 6ncı Ana Jet Üs K.lığına (Bandırma/BALIKESİR) atandı. Bu birlikte çeşitli kademelerde üç yıl Uçak Bakım Subayı olarak görev yaptı. 2000-2001 Eğitim-Öğretim yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans Eğitimine başladı. Halen Hava Harp Okulu Dekanlığında öğretim elemanı olarak görev yapmaktadır.