



ALÜMİNYUM PLAKALARIN BALİSTİK PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Mevlüt HAKAN¹, Recep GÜNEŞ² ve M. Kemal APALAK³

¹ Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 38039 Kayseri, TÜRKİYE

^{2,3} Erciyes Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 38039 Kayseri, TÜRKİYE

ABSTRACT

As a result of extensive research and studies of metallurgists, aluminum plates are frequently used in a wide variety of applications including aircraft structures, ships, bridges, and buildings, in addition to light protection systems because of the characteristics of low density, high structural strength and energy absorption capacity. The aim of this study was to investigate the ballistic performance of aluminum plates. 10-mm thick and 50x50mm sized 2024-T3 aluminum plates were used in structures. The plate angle and plate thickness of aluminum plates were changed and optimum values were investigated subject to the FSP (Fragment Simulating Projectile) projectile sent with a velocity of 750 m/s. Furthermore, ballistic limit velocity according to Lambert-Jonas approach was identified in such a way that the angle which 10 mm plate and projectile make with the normal would be $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ and 60° .

Key Words: Aluminum Alloys, Ballistic Test, Ballistic Limit, Oblique Impact

ÖZET

Metal bilimcilerin geniş araştırma ve çalışmaları sonucu alüminyum alaşımı levhalar düşük yoğunluk, yüksek yapısal mukavemet ve enerji emiş kapasitesi özellikleri nedeniyle uçak yapıları, gemi, bina ve köprü gibi çok çeşitli uygulamaların yanında hafif korunma sistemlerinde de sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Alüminyum plakaların balistik performansının araştırılması yapılmıştır. Yapıda kullanılan plakalar 10 mm kalınlığında ve 50x50mm boyutunda 2024-T3 alüminyum alaşımıdır. Alüminyum plakaların plaka açısı ve plaka kalınlığı değiştirilerek $v=750$ m/s hızda gönderilen FSP (Parçacık Benzetimli Mermiler) mermiye karşı optimum değerleri hesaplanmaya çalışılmıştır. Ayrıca 10 mm plaka ve merminin normalle yaptığı açı $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ve 60° olacak şekilde Lambert-Jonas yaklaşımına göre V_{50} balistik limit hızı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum Alaşımlar, Balistik Test, Balistik limit, Açılı Darbe

GİRİŞ

Alüminyum alaşımı levhalar yüksek özgül mukavemetleri düşük yoğunluk değerleri sayesinde hedef balistiği biliminin önem verdiği malzemelerin başında gelmektedirler. Ağırlığın önemli bir unsur olarak göze çarptığı hafif koruma sistemlerinde alüminyumun düşük yoğunluğu çeliğe oranla tercih edilmesini sağlamaktadır. Örneğin AA 2024 içerdiği bakır ve magnezyum elementleri sayesinde

yaşlandırma özelliğine sahip olup, özellikle uçak, uzay ve koruma endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır [1].

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 belirgin örneklerini teşkil eder.

Yüksek hızlı çarpma konusunda geniş bir uygulama alanı olmasına 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 [2].

Balistik; uygun bir sistem yardımıyla ateşlenen ya da fırlatılan nesnelerin atmosferik koşullarda yerçekiminin de etkisiyle yapmış olduğu hareketi inceleyen bilim dalı olarak açıklanabilir. Balistik konusunda çeşitli çalışmalar halen günümüzde ilerleyen şekilde devam etmektedir. Bu çeşitli çalışmalar mermi uç geometrisi, mermi hızı, şekli ve açısı, hedef destekleme metodu, hedef şekli ve malzemesi konularında sürdürülmektedir.

Yüzeye normal çarpma halinde gerilme halinin iki boyutlu olduğu eğik çarpışmalarda yüklemenin asimetrisinden dolayı ilave eğilme gerilmeleri meydana gelmektedir. Mermi geometrisi, malzeme özellikleri, çarpma hızı gibi parametrelere bağlı olarak meydana gelen eğilme ve çekme gerilmeleri, mermi hasarına veya sekmesine neden olmaktadır [3-4].

Balistik zırhlarda çeşitli parametreler değiştirilerek çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca katmanlı yapılar gibi çeşitli malzemeler de balistik zırhlarda kullanılmaktadır. Bu konular ile ilgili yapılan birçok çalışma değişik zırh sistemlerinin balistik başarımlar açısından birbiri ile karşılaştırılmasına imkân vermektedir [5].

Homojen ve farklı veya benzer özelliklerin bir araya getirilmesiyle oluşmuş kompozit yapıların değişik malzeme kombinasyonlarıyla darbe ve balistik çarpma yükleri altındaki dinamik davranışları ve balistik limit araştırmaları konularında çalışmalar yapılmıştır. Balistik davranışları üzerine yapılan bu çalışmalarda; homojen plakalar [6-8], seramik kompozitler, metal kompozitler, hibrid kompozitler, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler [9-13], kumaş takviyeli kompozitler [14-15], sandviç yapılar [16-17] incelenmiştir.

Balistik darbe olayının incelenmesinde karşılaşılan problemlerden birisi de bir cismin hasara uğramadan dayanabileceği hızın tespitidir. Bu hız, genellikle kritik çarpma hızı veya balistik limit adını alır. Kritik hız değeri, V_{50} ile gösterilir. Bu hız (V_{50}) parçacığın hedefe dik konumda çarpması sonucu hedefi %50 delme kapasitesine haiz olduğu hızdır. V_{50} hızının tespitinde istatistiksel yaklaşımlardan faydalanılır. En basit olarak tam nüfuziyete sebep olan en düşük üç hız ile kısmi nüfuziyete sebep olan en yüksek üç hızın ortalaması alınarak balistik limit hız tespit edilir. Kısmi nüfuziyete sebep olan en düşük hız ile tam nüfuziyete sebep olan en yüksek hız arasındaki fark, 46 m/s'yi aşmamalıdır. Uygulamada zaman ve ekonomik faktörler elde edilecek veriler üzerine sınırlamalar getirmektedir. Balistik limit ile ilgili incelemelerde, merminin şekli ve boyutları, çarpma hızı ve hedefin kalınlığı gibi etkenler de hesaplamalarda ön plana çıkmaktadır. Malzemenin iş görmezliğine neden olabilecek çekme basma veya eğilme gerilmeleri, katmanlar arası ayrılma gibi hasar biçimleri delinme için gerekli enerji miktarının, dolayısıyla balistik limitin hesaplanabilmesi için çok iyi belirlenmelidir. Literatürde, balistik limitin belirlenmesi ve onu etkileyen faktörler üzerine yapılmış kuramsal, deneysel ve sayısal çalışmalar mevcuttur [18-19].

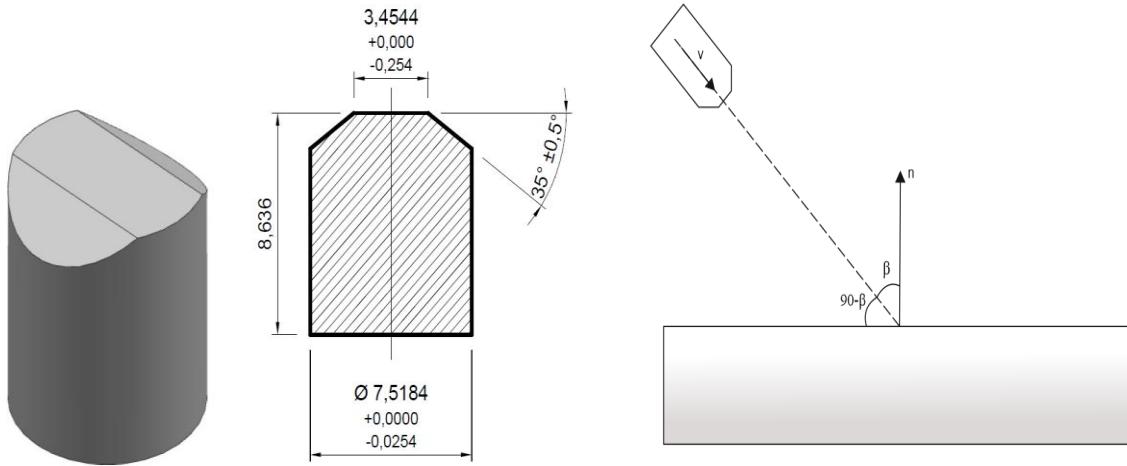
Balistik çarpma olayında, levhanın davranışı kadar, çarpan cisim ya da mermilerin özellikleri de önemli bir etkindir. Farklı uç geometrisine sahip mermilerin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi birçok çalışmaya konu olmuştur. Silindirik şekilli, konik, oval-sivri, yarıküresel ve düz uçlu çubuğun veya merminin hedefe çarpma durumu ve plakada oluşan gerilme dalgaları incelenmiştir [20-21].

Borvik ve arkadaşları [22], AA5083-H116 alüminyum metalinin balistik özelliklerini incelemişlerdir. Numuneler 15-30 mm aralığında kalınlıklara sahiptir ve 20 mm çapında, 98 mm uzunluğunda, 53 HRC sertlikte konik uçlu sertleştirilmiş merminin bu numunelere nüfuziyeti ölçülmüştür. Alüminyum çeliğe göre %25 daha hafif olmasına rağmen çalışmalarda eşit dirençler gösterdiği ve çarpma sırasında alüminyumun enerji absorbe etme özelliği çeliğe göre çok daha iyi olduğu görülmüştür. İqbal ve arkadaşları [23], çalışmalarında ise 12 mm Weldom 460 E çelik plakalar kullanarak vurucu uç açısının balistik limit ve hasar mekanizmasına etkileri araştırılmıştır. Bunun için vurucunun burun açısına 33.4°, 60°, 90°, 120°, 150° ve 180° olacak şekilde açı verilmiş ve hedef plakalarda 0°, 15°, 30°, 45°, 60° açılarda olacak şekilde darbe analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma göstermiştir ki hedef plaka açısı arttıkça ve vurucu burun açısı azaldıkça balistik limit değerleri artmıştır.

MATERYAL ve METOD

Problemin Tanımı

Bu çalışmada, Alüminyum plakaların balistik performansının araştırılması yapılmıştır. Yapıda kullanılan plakalar 10 mm kalınlığında ve 50x50mm boyutunda 2024-T3 alüminyum alaşımıdır. Yapıda, plakaların balistik performansını belirlemek için MIL-DTL-46593B (MR) [24] ve STANAG 2920 [25] standartlarına göre tanımlanmış 0.30 kalibre (7.62 mm) 4340H çeliği FSP (Fragment Simulating Projectile-Parçacık Benzetimli Mermi) mermiler kullanılmıştır. Çalışma kapsamında oluşturulan mermi ve plakalar LS-DYNA[®] sonlu elemanlar paket programı ile modellenmiştir. Sonlu elemanlar modellerinin oluşturulmasında ANSYS Parametrik Tasarım Dili (APDL-ANSYS Parametric Design Language) kullanılmıştır.

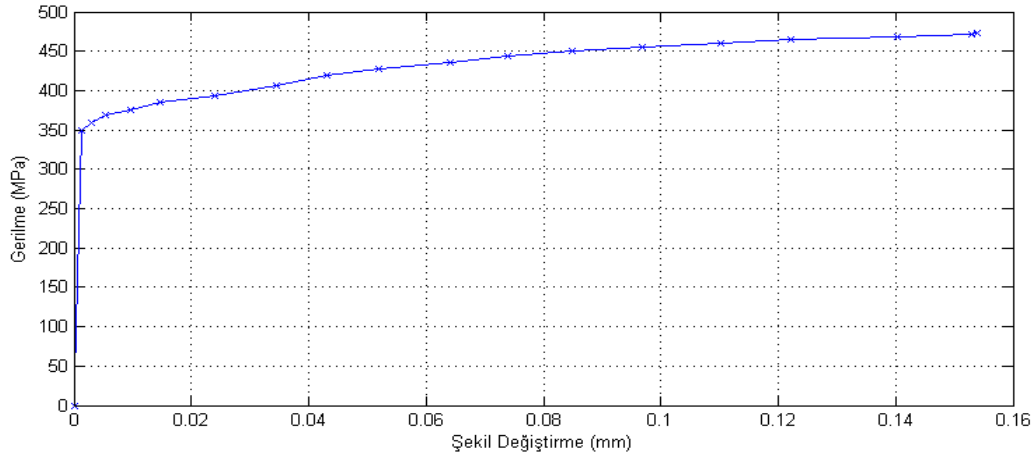


Şekil 1. FSP merminin geometrik özellikleri, normal ile yaptığı açı ve darbe noktası

Alüminyum plakalar balistik performans açısından üç aşamada incelenmiştir. İlk aşamada mermi $v=750$ m/s hızında , $\beta = 0^\circ$ olacak şekilde plakaya gönderilmiş ve plakayı delemeyi optimum plaka kalınlığı bulunmaya çalışılmıştır. İkinci aşamada plaka kalınlığı 10 mm sabit kalacak şekilde mermi plakaya $v=750$ m/s hızında farklı β açılarında gönderilerek plakanın delinemediği optimum açı araştırılmıştır. Üçüncü aşamada ise 10mm kalınlıktaki plakada, merminin normalle yaptığı açı $\beta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ve 60° olacak şekilde Lambert-Jonas yaklaşımına göre V_{50} balistik limit hızı tespit edilmiştir.

Malzeme

Öncelikle Alüminyum plakalardan (2024-T3) üretilen çekme numuneleri kullanılarak malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışı tespit edilmiştir. Alüminyumun yüksek hızda deformasyon davranışlarını tespit edebilecek deney düzeneğimiz mevcut olmadığından dolayı sayısal analizler için Alüminyumun çekme testiyle elde edilen gerilme-şekil değiştirme davranışları kullanılmıştır.



Şekil 2. Alüminyum 2024-T3 çekme testiyle elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı

Çekme deneyleri, Erciyes Üniversitesi Teknoloji ve Araştırma Uygulama Merkezi'nde tek eksenli çekme testi yapılarak elde edilmiştir. Şekil 2. Alüminyum plakanın gerilme-şekil değiştirme eğrisini göstermektedir.

Kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiş olan 2024-T3 alaşımı ısıtılmış bir alaşım olup T3 sembolü çözeltiye alınıp soğuk işlem gördüğünü göstermektedir.

Tablo 1. Al 2024-T3 Kimyasal Bileşimi (%)

Fe	Si	Cu	Cr	Mn	Mg	Zn	Zi+Ti	Diğer	Al
0.5	0.5	3.8-4.9	0.1	0.3-0.9	1.2-1.8	0.25	0.15	0.15	Kalan

Mermide kullanılacak AISI 4340H çeliğinin mekanik özellikleri literatürden elde edilmiştir [26]. Alüminyum plaka ve FSP mermi için malzeme özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

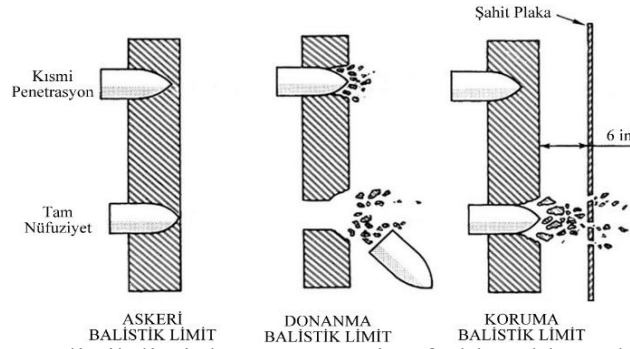
Tablo 2. Alüminyum plaka ve FSP mermi mekanik özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Poisson Oranı	Elastiklik Modülü (GPa)	Akma Gerilmesi (MPa)	Kopma Şekil Değiştirmesi
Al 2024-T3	2780	0.33	73.1	350	0.62
AISI 4340H	7860	0.30	200	970	0.77

Balistik Limit

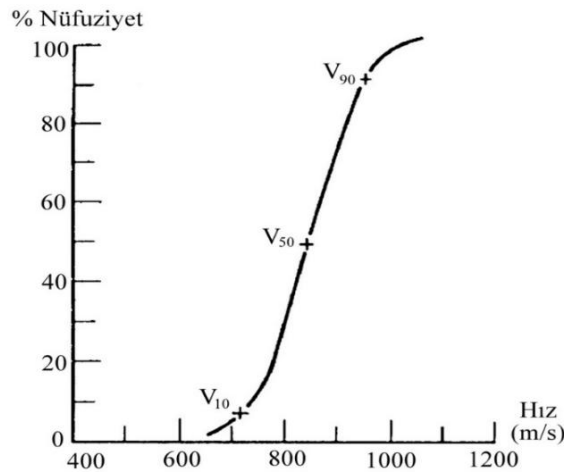
Balistik limit kavramı için literatürde farklı yaklaşımlar mevcuttur ve bu yaklaşımları tanımlamak gerekir. Balistik limit hızı V_{BL} , merminin hedefe tamamen nüfuz edemediği hız ve bu hızın altındaki hızlar olarak tanımlanmıştır. Şekil 3' de balistik limit kavramı üzerine farklı yaklaşımlar

gösterilmiştir. Bu yaklaşımlar arasındaki temel fark perforasyon (delinme) olayının tanımlanmasındaki farklı kriterlerdir [18].



Şekil 3. Balistik limit kavramı üzerine farklı yaklaşımlar [18]

Balistik limit hızının belirlenmesindeki gerçek değerlendirme istatistiksel çalışmalara dayalı olan testlerle yapılır. Balistik limit hızı V_{50} ile gösterilir ve bu hız merminin hedefe dik konumda çarpması sonucu hedefin % 50' sini delme kapasitesine sahip olduğu hızdır. Bahsedildiği gibi V_{50} hızının tespitinde istatistiksel yaklaşımlardan faydalanılır. Temel olarak, tam nüfuziyete sebep olan en düşük üç hız ile kısmi nüfuziyete sebep olan en yüksek üç hızın ortalaması alınarak balistik limit hızı tespit edilir. Deney sonuçlarında hedefi delip geçen en düşük hız ve delip geçmeyen en yüksek hız arasındaki fark ne kadar az ise balistik limit tahmininin doğruluğu o kadar yüksek demektir. Balistik darbe için tipik bir V_{50} diyagramı Şekil 4'de gösterilmiştir [27].



Şekil 4. Balistik limit eğrisi [27]

Balistik limit kavramı üzerine diğer bir yaklaşım da Lambert-Jonas yaklaşımıdır. Eşitlik 1 Lambert-Jonas yaklaşımını göstermektedir [19].

$$v_{res} = a(v_{imp}^p - v_{bl}^p)^{1/p}, \quad v_{imp} > v_{bl} \quad (1)$$

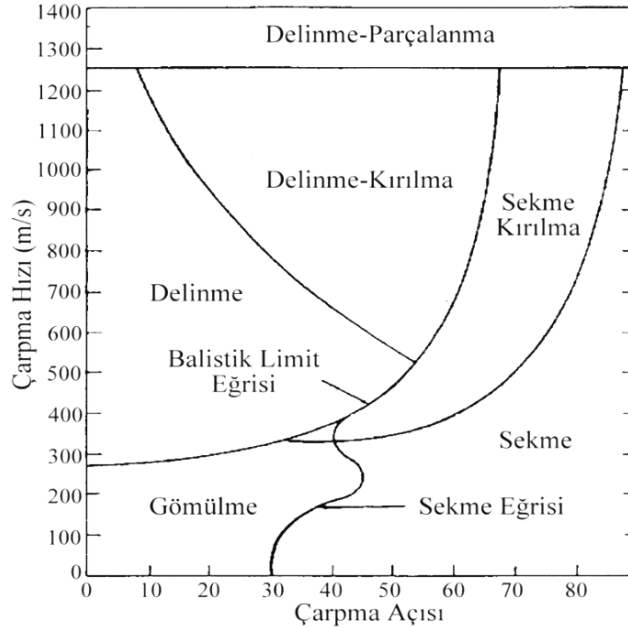
Burada, v_{imp} merminin çarpma hızını, v_{res} merminin plakayı deldikten sonra kalan artık hızı ve v_{bl} balistik limit hızını göstermektedir. a ve p deneysel verilerden elde edilen katsayılar olup, $p = 2$ olduğu zaman eşitlik Recht-Ipson yaklaşımı (Eşitlik 2) adını almaktadır.

$$v_{res} = a(v_{imp}^2 - v_{bl}^2)^{1/2}, \quad a = M/(M + m) \quad (2)$$

a katsayısının bulunmasında kullanılan M merminin kütlesini ve m ise çarpışma ile mermiden kopan parçanın kütlesini göstermektedir. Lambert-Jonas eşitliğine göre balistik limit eğrisi çizildiğinde yatay eksen çarpma hızını, dikey eksen ise artık hızı göstermektedir. Eğrinin yatay

ekseni kestiği nokta balistik limit hızını vermektedir. Yani $v_{res} = 0$ olduğunda çarpma hızı v_{imp} , balistik limit hızı v_{bl} 'ye eşit olur.

Yüksek hızlı çarpışma olayını diyagramlar yardımıyla göstermek sistemin anlaşılması bakımından daha faydalı olmaktadır. Bu diyagramlar oluşturulurken hız, hedef kalınlığı, çarpma açısı, çarpma kinetik enerjisi, itme, kuvvet ve zaman gibi etkiler dikkate alınmaktadır. Şekil 5 oval-sivri bir merminin 6.35 mm kalınlığındaki 2024-T3 alüminyum plakaya nüfuziyeti halinde elde edilen balistik faz diyagramını göstermektedir. Balistik limit, mermi ve zırh performansının tespitinde temel parametredir [27].



Şekil 5. Balistik faz diyagramı [27]

Sayısal Model

Sayısal analizde, ANSYS LS-DYNA/Explicit sonlu elemanlar programı kullanıldı ve ANSYS parametrik tasarım dili (APDL – Ansys Parametric Design Language) sayesinde parametrik sayısal çalışmalar yapılmıştır. APDL sayesinde sayısal model parametrik olarak modellenmiş ve kullanılan formülasyon ve algoritmalar için makro oluşturulmuştur.

Sayısal analizlerde kullanılacak olan geometrilere uygun olarak ANSYS-LSDYNA'da 10 mm kalınlığında, 50x50 mm boyutlarında Alüminyum plaka ve Şekil 1'de gösterilen geometrik ölçülere uygun olarak FSP mermi modellendi. FSP mermi ve Alüminyum plaka için katı eleman kullanarak SOLİD 164 ile modelleme yapıldı.

Analizlerde Alüminyum plakanın elasto-plastik malzeme davranışını modelleyebilmek için MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modelinde malzemeye ait mekanik değişkenler (elastiklik modülü, poisson oranı ve akma gerilmesi) ile çekme deneyinden elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrisinin akma gerilmesinden sonraki değerleri ve son olarak da hasar kriteri olarak malzemenin kopma anındaki efektif plastik şekil değiştirme değeri (kopma şekil değiştirmesi) tanımlanmaktadır. Alüminyum plakanın mekanik özellikleri Tablo 2' de verilmiştir. Ayrıca malzemelerin akma sonrası gerilme şekil değiştirme eğrileri Şekil 2'de verilmiştir. FSP mermi MAT_PLASTIC_KINEMATIC malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir.

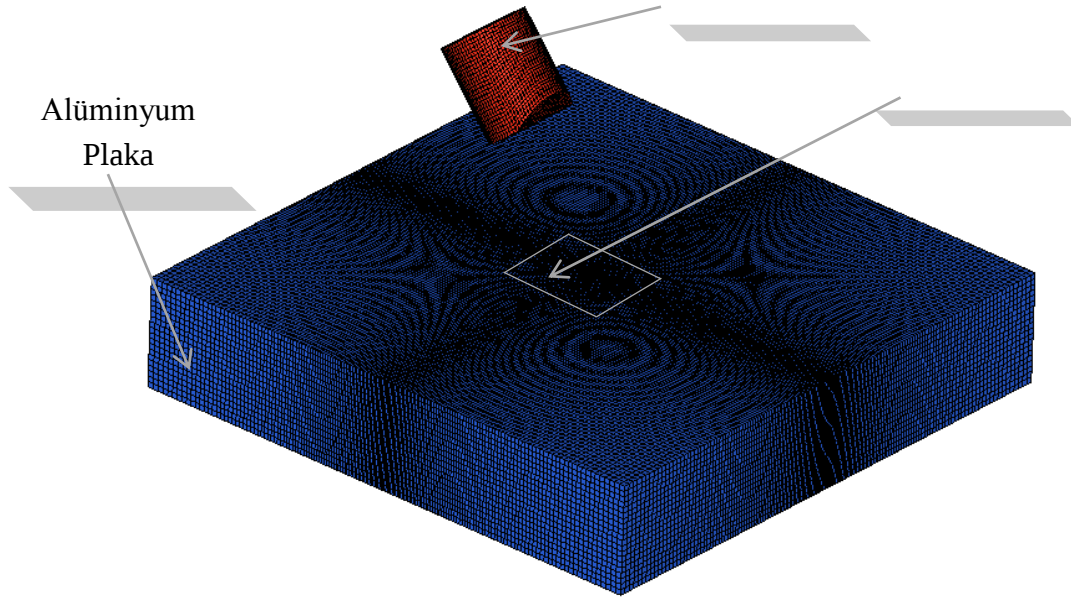
Analizlerde Alüminyum plakada darbe etkisiyle oluşan hasar mekanizmasını da görebilmek için malzemelerin kopma şekil değiştirmesi tanımlanmıştır. Plakaların kopma şekil değiştirmesi, çekme testi sonucu elde edilen veriler ile 3 eşitliği kullanılarak elde edilmiştir. FSP mermi malzemesinin kopma uzaması ise literatürden alınmıştır [26].

$$\varepsilon_f = \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) \quad (3)$$

Burada; ε_f malzemenin kopma uzamasını, A_0 orijinal kesit alanını ve A_f koptuğu andaki kesit alanını göstermektedir.

2024-T3 alüminyum alaşımı ve AISI 4340H çeliği için kopma uzamaları sırasıyla 0.62 ve 0.77 olarak elde edilmiştir.

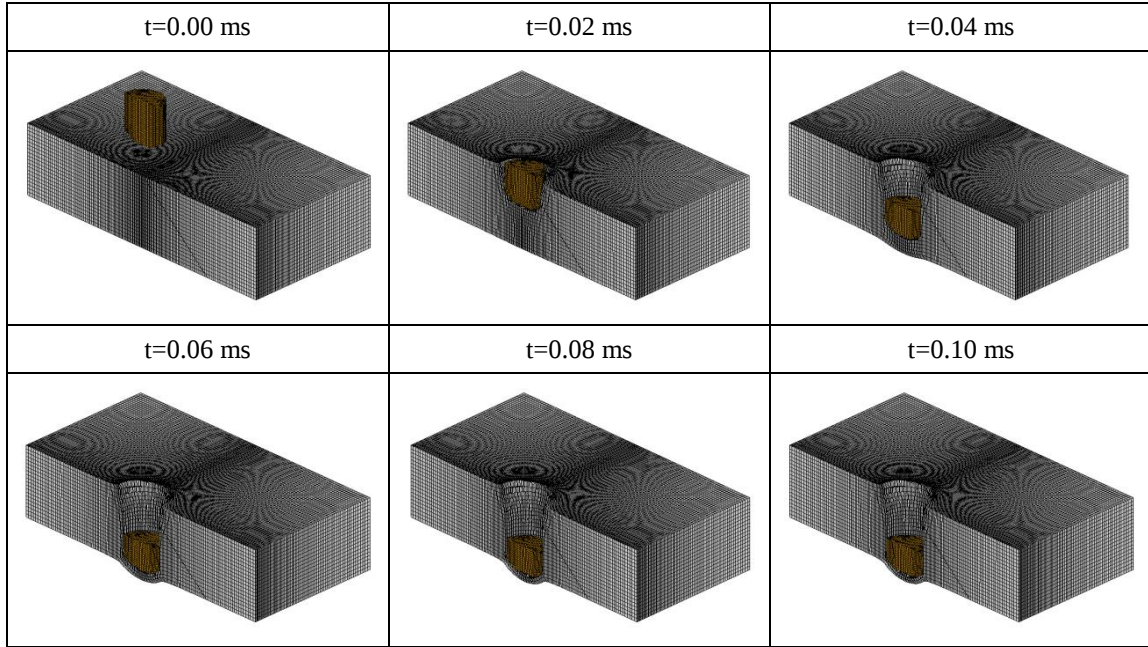
Çarpma analizlerinde temas modelinin tanımlanması oldukça önemli bir adımdır. Bu çalışmada, FSP mermi ile alüminyum plaka arasında malzemelerin kopma uzamaları tanımlandığı ve yapıda hasar veya delinme gerçekleşebileceği için CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Sayısal modellemede sınır şartı olarak alüminyum plaka dört kenarından ankastre olarak sabitlenmiştir. Alüminyum yapının balistik analizleri için oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. FSP mermi ve Alüminyum plakanın sonlu elemanlar modeli

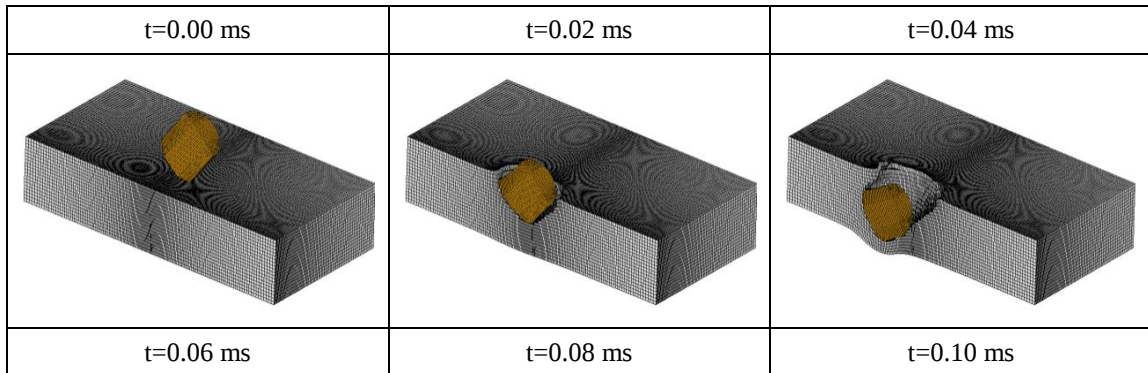
SONUÇLAR ve ÖNERİLER

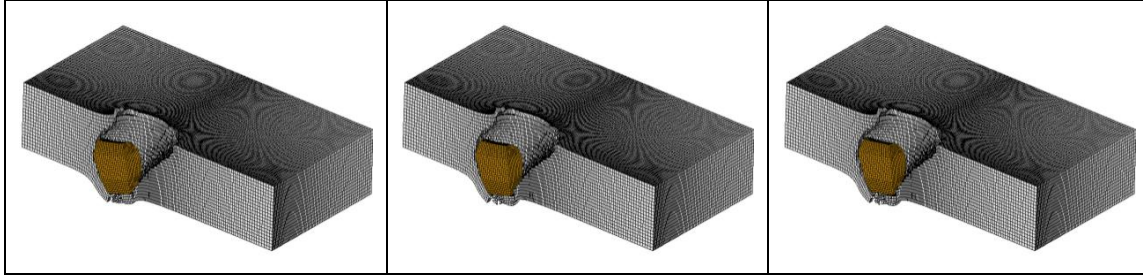
Daha öncede söylediği üzere Alüminyum plakalar balistik performans açısından üç aşamada incelenmiştir. İlk aşamada mermi 7.62 mm mermi hızında $v=750$ m/s , $\beta = 0^\circ$ olacak şekilde plakaya gönderildi ve plakayı delemeyi optimum plaka kalınlığı bulunmaya çalışıldı. Bunun için plaka kalınlığı 10 mm’den başlayarak 1mm artırılarak analizler tekrarlandı. Bu hız için optimum kalınlığın 14mm olduğu tespit edildi (Şekil 7).



Şekil 7. $v=750\text{m/s}$ hızında $\beta = 0^\circ$ açıda gönderilen mermiye 14mm kalınlıktaki plakanın darbe etkisi

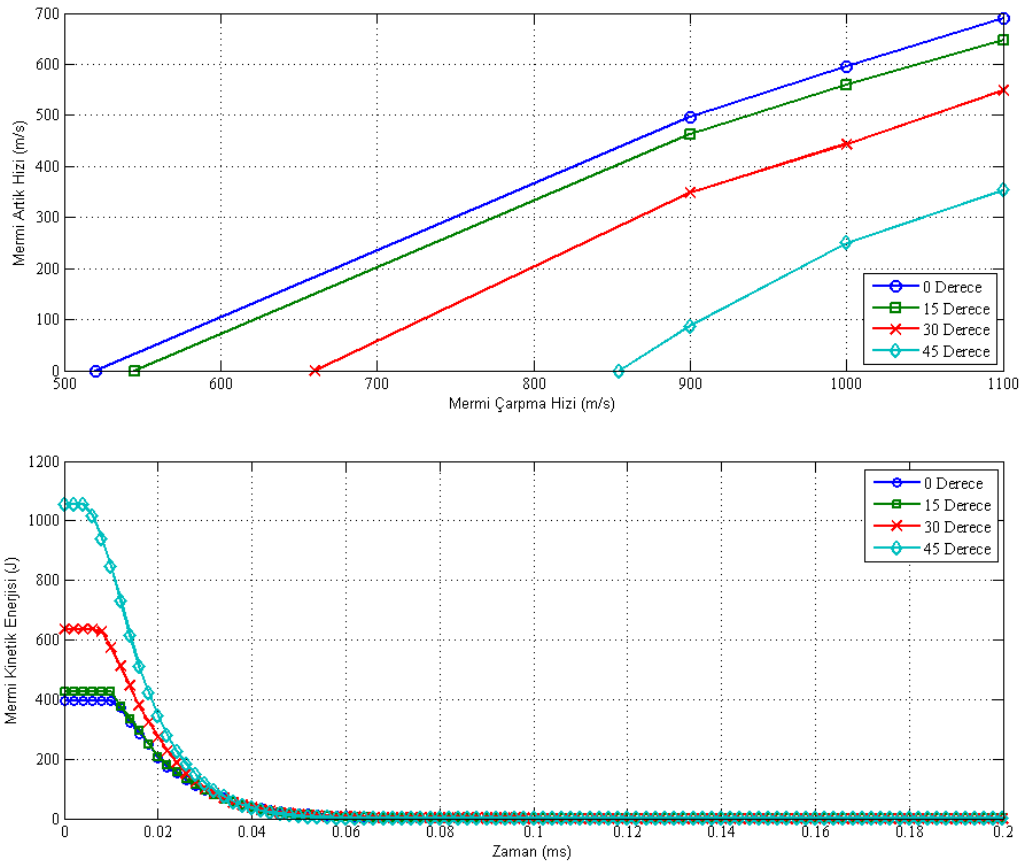
İkinci aşamada plaka kalınlığı 10 mm sabit kalacak şekilde mermi plakaya $v=750\text{ m/s}$ hızında farklı β açılarında gönderilerek plakanın delinmediği optimum açı araştırıldı. İkinci aşama için yapılan analizlerde 10 mm kalınlıktaki plakaya gönderilen sabit $v=750\text{ m/s}$ hızdaki mermi ile plakanın normali arasındaki açı β artırılarak analizler tekrarlandı ve plakanın normali ile arasındaki açı $\beta = 39^\circ$ olduğunda plakanın delinmediği tespit edildi. Şekil 8’de $v=750\text{m/s}$ hızında $\beta = 39^\circ$ açıda gönderilen mermiye 10mm kalınlıktaki plakanın darbe etkisi, zaman $t=0.1\text{ ms}$ aralığında 5 adımda gösterilmiştir.





Şekil 8. $v=750\text{m/s}$ hızında $\beta = 39^\circ$ açıda gönderilen mermiye 10mm kalınlıktaki plakanın darbe etkisi

Son aşama olarak 10mm kalınlıktaki plakada, merminin normalle yaptığı açı $\beta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ve 60° olacak şekilde değiştirilerek Lambert-Jonas yaklaşımına göre V_{50} balistik limit hızı tespit edilmiştir.



Şekil 9. $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ve 60° açıda gönderilen mermi ve 10 mm plakada balistik limit hız değerleri ve mermi kinetik enerjileri

Lambert-Jonas yaklaşımına göre V_{50} balistik limit hızı araştırılmasında, tam nüfuziyete sebep olan en düşük üç hız ile kısmi nüfuziyete sebep olan en yüksek üç hız şeklinde analizler tekrarlandı ve bunların ortalaması alınarak balistik limit hızı tespit edilmiştir. Balistik limit hızı belirlendikten sonra balistik limit hız değerlerinin üzerindeki hızlarda artık hızları görmek amacıyla mermi hızı $v=900, 1000$ ve 1100 m/s olacak şekilde analizler her bir açı için tekrarlanmıştır. 60° ile gönderilen mermilerde plaka delinme göstermemiş mermi plakanın üzerinden sekmiştir ve bu yüzden balistik limit hızı belirlenememiştir.

Yapılan çalışmada alüminyum plaka kalınlığı 10mm'den 14mm'ye artırılarak 7.62 mm mermi hızında $v=750$ m/s gönderilen FSP mermiye plakada delinme olmadan karşı koyulabileceği, 10mm plakanın aynı hızda mermi için mermi açısı $\beta = 39^\circ$ den büyük açılarda delinmeden kalabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca Şekil 9'daki grafiklerden de görüldüğü üzere mermi açısı arttıkça alüminyum plakalar için balistik limit hızı artmıştır. Koruma amaçlı kullanılan zırh ve benzeri yapılar kullanılacağı yerlere göre açılı şekilde yerleştirilerek koruma sağlanabileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından sağlanan 112M917 nolu araştırma projesi desteği ile yapılmıştır. Desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] A. A. Cerit, *Partikül ve Fiber Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitin Balistik Performansının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
- [2] E. Özşahin, *Entegre bir zırhın, yüksek hızlı çarpma yükleri altındaki davranışları*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.
- [3] A. J. Zukas, *Impact Dynamics*, Kringer Publishing Comp.,1992.
- [4] B. Üner, G. Ağır, S. Koç, *Ateşli Silahlar ve Balistiğin Tarihçesi*, II. Adli Bilimler Sempozyumu, İzmir, Nisan 4-5, 1997.
- [5] M. Erdem, M. Türker, *7039 Alüminyum Alaşımının Kaynak Öncesi ve sonrası mekanik ve balistik özelliklerinin araştırılması*, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 26, No 1, 17-26, 2011.
- [6] H. N. K. T. Paletti, S. Gurusamy, S. Kumar, R. Soni, B. John, R. Vaidya, A. Bhoge, N. K. Naik, Ballistic impact performance of metallic targets, *Materials and Design*. 39 (2012) 253-263. doi:10.1016/j.matdes.2012.02.033.
- [7] J. K. Holmen, J. Johnsen, S. Jupp, O. S. Hopperstad, T. Børvik, Effects of heat treatment on the ballistic properties of AA6070 aluminium alloy, *International Journal of Impact Engineering*. 57 (2013) 119–133. doi:10.1016/j.ijimpeng.2013.02.002.
- [8] M. D. Sciuva, C. Frola, S. Salvano, Low and high velocity impact on Inconel 718 casting plates:ballistic limit and numerical correlation, *International Journal of Impact Engineering*. 28 (2002) 849–876. doi:10.1016/S0734-743X(02)00156-2.
- [9] G. Nilakantan, S. Nutt, Effects of fabric target shape and size on the V50 ballistic impact response of soft body armor, *Composite Structures*. 116 (2014) 661–669. doi:10.1016/j.compstruct.2014.06.002.
- [10] K. S. Pandya, J. R. Pothnis, G. Ravikumar, N.K. Naik, Ballistic impact behavior of hybrid composites, *Materials and Design*. 44 (2012) 128–135. doi:10.1016/j.matdes.2012.07.044.
- [11] Z.Fawaz, W. Zheng, K. Behdinan, Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armours, *Composite Structures*. 63 (2004) 387-395. doi:10.1016/S0263-8223(03)00187-9.
- [12] M. Aydın, *Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Balistik Davranışı*, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.

- [13] G. Nilakantan, S. Nutt, Effects of fabric target shape and size on the V_{50} ballistic impact response of soft body armor, *Composite Structures*. 116 (2014) 661–669. doi:10.1016/j.compstruct.2014.06.002.
- [14] C.Y. Tham, V.B.C. Tan, H.P. Lee, Ballistic impact of a KEVLARs helmet: Experiment and simulations, *International Journal of Impact Engineering*. 35 (2007) 304–318. doi:10.1016/j.ijimpeng.2007.03.008
- [15] B. L. Buitrago, C. Santiuste, S. Sánchez-Sáez, E. Barbero, C. Navarro, Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact, *Composite Structures*. 92 (2009) 2090–2096. doi:10.1016/j.compstruct.2009.10.013.
- [16] C. Kılıçaslan, M. Güden, İ. K. Odacı, A. Taşdemirci, The impact responses and the finite element modeling of layered trapezoidal corrugated aluminum core and aluminum sheet interlayer sandwich structures, *Materials and Design*. 46 (2013) 121–133. doi:10.1016/j.matdes.2012.09.059
- [17] R. Laible, *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, Elsevier Scientific Publishing Company, 2012.
- [18] G. Ben-Dor, A. Dubinsky, T. Elperin, On the Lambert-Jonas approximation for ballistic impact, *Mechanics Research Communications*. 29 (2002) 137–139. doi:10.1016/S0093-6413(02)00246-X.
- [19] N.K. Gupta, M.A. Iqbal, G.S. Sekhon, Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of aluminum plates, *International Journal of Solids and Structures*. 44 (2006) 3411–3439. doi:10.1016/j.ijsolstr.2006.09.034.
- [20] T. Børvik, M. Langseth, O.S. Hopperstad, K.A. Malo, Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses: Part I: Experimental study, *International Journal of Impact Engineering*. 27 (2002) 19–35. doi:10.1016/S0734-743X(01)00034-3.
- [21] S. Deya, T. Børvik, O. S. Hopperstad, J.R. Leinum, M. Langseth, The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes, *International Journal of Impact Engineering*. 30 (2004) 1005–1038. doi:10.1016/j.ijimpeng.2004.06.004.
- [22] M. A. Iqbal, A. Diwakar, A. Rajput, N. K. Gupta, Influence of projectile shape and incidence angle on the ballistic limit and failure mechanism of thick steel plates, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 62 (2013) 40–53. doi:10.1016/j.tafmec.2013.01.005.
- [23] MIL-DTL-46593B (MR) w/AMENDMENT 1, *Detail Specification, Projectile Calibers .22, .30, .50 and 20 mm Fragment-Simulating*, 2008.
- [24] NATO STANAG 2920, *Ballistic Test Method for Personal Armour Materials and Combat Clothing*, 2003.
- [25] W. Lee, T. Su, Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions, *Journal of Materials Processing Technology*. 87 (1999) 198–206. doi:10.1016/S0924-0136(98)00351-3.
- [26] J. A. Zukas, *High Velocity Impact Dynamics*, John Wiley & Sons Inc., USA, 1990.