

# DÜŞÜK HIZLARDA DARBEME MARUZ KALAN 1050 H14 VE 3003 ALÜMİNYUM ALAŞIMI PLAKALARDA HASAR OLUŞUMU VE SONLU ELEMANLAR SİMÜLASYONLARI

Cenk Kılıçaslan\*

Makine Yük. Müh.,  
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü  
Dinamik Test ve Modelleme Lab.,  
Gülbağçe Kampüsü, Urla/İzmir  
cenkkilicaslan@iyte.edu.tr

İsmet Kutlay Odacı

Makine Yük. Müh.,  
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü  
Dinamik Test ve Modelleme Lab.,  
Gülbağçe Kampüsü, Urla/İzmir  
kutlayodaci@iyte.edu.tr

## ÖZET

Bu çalışmada düşük hızlarda darbeye maruz kalan 1050 H14 ve 3003 alüminyum alaşımı plakalarda oluşan hasar, düşen ağırlık test cihazı ile gerçekleştirilen çarpışma deneyleriyle belirlenmiş, sonlu elemanlar simülasyonları ile deneysel olarak oluşan hasar ve kuvvet karşılaştırılmıştır. Testler sırasıyla 1,5 ve 6,1 m/s darbe hızı aralığında, 15,778 kg darbe yüküyle gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modelleri LS-DYNA programı kullanılarak oluşturulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, plakalarda düşük çarpışma hızlarında sadece çökme meydana geldiği, daha yüksek hızlarda ise delinme, deformasyon bölgesinde çanak ve radyal çatlakların oluştuğu belirlenmiştir. Simülasyonlarda oluşan hasar şeklinin, kullanılan ağ yapısındaki eleman büyüklüğüne ve kullanılan hasar değerine bağlı olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Darbe, hasar, alüminyum, simülasyon, LS-DYNA

## Failure Evolution and Finite Element Simulations of 1050 H14 and 3003 Aluminium Alloys Subjected To Low Velocity Impact

### ABSTRACT

In this study failure evolution in 1050 H14 and 3003 aluminium alloys subjected to low velocity impact were determined by experiments carried out with drop weight impact test machine and failure-force results of finite element simulations and experiments were compared. Experiments were carried out in the impact velocity range of 1.5 and 6.1 m/s with 15.778 kg impact mass. Finite element simulations were generated using LS-DYNA software. Experiments showed that plates subjected to lower impact velocities only experienced deflection while penetration, petalling and radial cracks in the deformation area formed at higher impact velocities. Failure evolution in finite element simulations was found to be highly dependent on element size of mesh and failure criterion.

**Keywords:** Impact, failure, aluminium, simulation, LS-DYNA

\* İletişim yazarı

Geliş tarihi : 26.07.2012  
Kabul tarihi : 15.10.2012

Kılıçaslan, C., Odacı, İ. K. 2012. "Düşük Hızlarda Darbeye Maruz Kalan 1050 H14 ve 3003 Alüminyum Alaşımı Plakalarda Hasar Oluşumu ve Sonlu Elemanlar Simülasyonları," TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 53, sayı 632, s. 40-48

## 1. GİRİŞ

Günümüzde otomobil, havacılık, savunma ve uzay endüstrilerinde kullanılan malzemelerin darbe ve balistik dayanımların araştırılması ve oluşacak hasarların önceden belirlenip tasarımların eniyilenmesi büyük önem kazanmıştır. Özellikle orta ve yüksek hızlarda darbeye maruz kalan bu malzemelerin davranışlarının incelenmesi gerekmektedir. Literatüre bakıldığında metaller [1-3], kompozitler [4-9] ve sandviç malzemeler [10] üzerinde gerçekleştirilen düşük hızlardaki darbe davranışlarıyla ilgili çalışmalar bulunabilir. Bunlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Martinez vd. [1] 2024-T3 alüminyum alaşımını çeşitli hızlarda ve sıcaklıklarda yaptıkları çekme deneyleriyle mekanik olarak karakterize etmiş ve bu malzemeden yapılan plakaları farklı başlangıç sıcaklıklarında düşen ağırlık test cihazıyla 0,5 ve 4,5 m/s darbe hızı aralıklarında test etmişlerdir. Deneylerden elde ettikleri sonuçları literatürde aynı işlemin çeliklere uygulanmasıyla elde edilen sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Delinen alüminyum plakaların deformasyon bölgesinde çanak ve kırık oluşumu olduğunu ve bu plakaların enerji sönmüleme miktarlarının çeliğe kıyasla düşük olduğu sonucuna varmışlardır. Grytten vd. [3] 3,5 ve 15,8 m/s hız aralıklarında darbeye maruz kalan AA5083-H116 alüminyum plakaların deformasyonlarını deneysel olarak, negatif deformasyon sertleşmesinin, plastik anisotropinin ve ısı yumuşamanın etkilerini ise nümerik modellerle incelemişlerdir. Darbe kuvvetinin yalnızca negatif deformasyon sertleşmesinden, hasar derecesinin ve şeklinin ise sadece ısı yumuşamadan etkilendiğini belirlemişlerdir. Plastik anisotropinin etkisiz olduğu görülmüştür. Fan vd. [5] yaptıkları çalışmada fiber-metal katmanlı (FMK) plakaları düşük hızlarda darbeye maruz bırakarak oluşan deformasyon ve hasarı incelemişlerdir. Çalışmadaki FMK 2024-0 alüminyum ve çapraz cam elyaf içermektedir. Katman miktarının artmasıyla artan plaka kalınlığının ve artan penetratör büyüklüğünün yapının darbe enerji sönmüleme kapasitesini arttırdığını görmüşlerdir. Sevkati vd. [8] çalışmalarında düz örgülü S2 cam elyaf/epoksi, düz örgülü IM7 grafit/epoksi ve dokuma kumaş S2 cam elyaf-IM7-grafit lifli/epoksi kompozit malzemelerin dört farklı hızda düşen ağırlık testlerini ve modelleme çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde 6,15 kg'lık darbe yükü 3,9, 4,4, 4,8 ve 6,3 m/s hızlarında kompozit malzeme üzerine atılmış ve oluşan kuvvetler zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Modelleme aşamasında ise LS-DYNA programının MAT43 malzeme modeli kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre S2 cam elyaf/epoksi kompozit malzeme en çok darbe dayanımına sahipken, IM7 grafit/epoksi kompozit malzeme en az darbe dayanımına sahiptir. Testlerden elde edilen kuvvet-zaman eğrileriyle modelleme sonuçlarından elde edilen kuvvet-zaman eğrilerinin birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Zucchelli vd. [9] yaptıkları çalışmada DC04ED tipi düşük karbon içerikli diktörtgen çelik plaka ve

üzere camı emaye ile kaplı düşük karbon içerikli diktörtgen çelik plaka olmak üzere iki farklı malzeme kullanmıştır. Bu malzemeler piezoelektrik yük ölçer içeren düşen ağırlık test cihazında düşme mesafesi değiştirilerek farklı enerji gruplarında test edilmiş ve aynı zamanda bilgisayar ortamında modelleme çalışması yapılmıştır. Test sonuçları değerlendirildiğinde camı emaye kaplı çelik plakaların kaplı olmayan çelik plakalara göre 6 kat daha fazla kritik enerji seviyesine sahip olduğu belirlenmiş ve modelleme çalışmalarıyla da doğrulanmıştır. Crupi vd. [10] yaptıkları çalışmada, cam elyaf kompozit yüzü PVC göbekli sandviç ve alüminyum plaka yüzeyli alüminyum köpük göbekli sandviç malzemelerin çarpışma mukavemetlerini karşılaştırmıştır. Cam elyaf kompozit yüzü PVC göbekli sandviç yapıların düşen ağırlık testlerinde 7 kg yük kullanılmış ve 4 - 9 m/s hız aralığında test numuneleri üzerine bırakılmıştır. Alüminyum plaka yüzeyli alüminyum köpük göbekli sandviç yapıların düşen ağırlık testlerinde ise yük sabit tutulurken çarpma hızı aralığı 4 - 8 m/s aralığında tutulmuştur. Deney sonuçları incelendiğinde cam elyaf kompozit yüzü PVC göbekli sandviç yapıların tamamen hasar alması için gereken enerji miktarı alüminyum plaka yüzeyli alüminyum köpük göbekli sandviç yapılardan daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Bu çalışmada düşük hızlarda darbeye maruz kalan 1050 H14 ve 3003 alüminyum alaşımı plakalarda oluşan hasar, düşen ağırlık test cihazı ile gerçekleştirilen çarpışma deneyleriyle belirlenmiş, sonlu elemanlar simülasyonlarıyla deneysel olarak oluşan hasar ve kuvvet karşılaştırılmıştır. Testler sırasıyla 1,5 ve 6,1 m/s darbe hızı aralığında, 15,778 kg darbe yüküyle gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modelleri LS-DYNA programı kullanılarak oluşturulmuştur.

## 2. MALZEME KARAKTERİZASYONU VE DÜŞEN AĞIRLIK DENEYLERİ

Çalışılan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ASTM standartlarına [11] uygun olarak çekme numuneleri hazırlanmıştır. Çekme deneyleri SHIMADZU universal test cihazında  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde numunenin aksiyal yöndeki uzama miktarı, deney sırasında ekstansiyometre kullanılarak direkt olarak numuneden okunmuştur. Deneyler sonunda simülasyonlarda kullanılmak üzere malzemelerin gerilme-gerinim eğrilerinden eşitlik 1 ve 2 kullanılarak gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrileri çıkarılmıştır;

$$\sigma_{\text{gerçek}} = \sigma (1 + \epsilon) \quad (1)$$

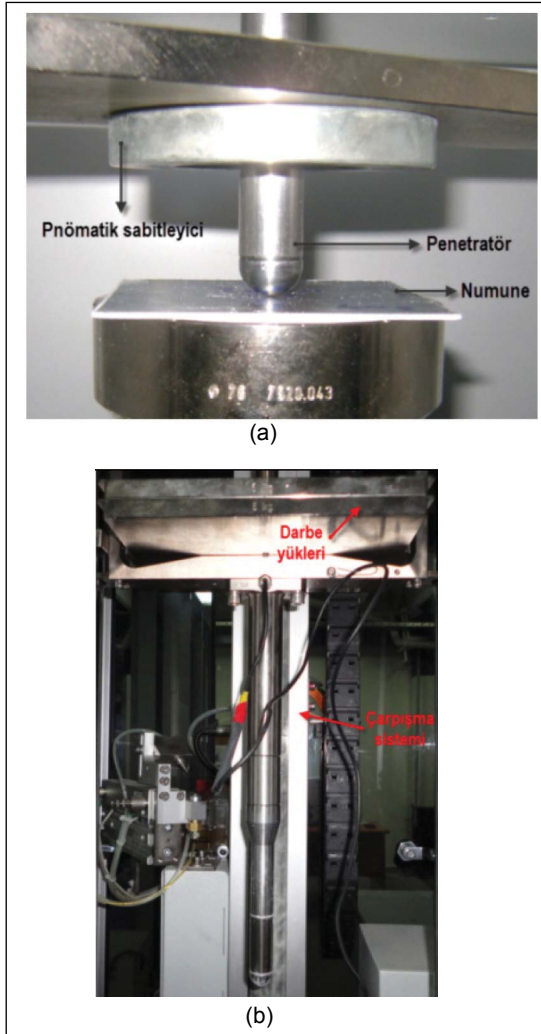
$$\epsilon_{\text{gerçek}} = \epsilon_n (1 + \epsilon) \quad (2)$$

Bu denklemlerde  $\sigma$ ,  $\epsilon$ ,  $\sigma_{\text{gerçek}}$ ,  $\epsilon_{\text{gerçek}}$  sırasıyla gerilme, gerinim, gerçek gerilme ve gerçek gerinimdir. Malzemelerin hasar gerinim değerleri ise eşitlik 3 kullanılarak bulunmuştur;

$$\epsilon^f = \ln \frac{A_f}{A_0} \quad (3)$$

Bu denklemde  $\epsilon^f$  hasar gerinimi,  $A_0$  başlangıçtaki kesit alanı ve  $A_f$  ise deney sonundaki kesit alanıdır.

Düşen ağırlık deneyleri FRACTOVIS test cihazında 20 mm çaplı küresel uçlu penetratör kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1(a)). Düşen ağırlık deneyinde numune, içi boş silindirik geometriye sahip pnömatik sabitleyiciler arasında konmakta ve üzerine belirli miktarda basma kuvveti uygulanmaktadır (Şekil 1(b)). Daha sonra cihazın penetratör kısmına her biri 5 kg olan darbe yükleri istenilen değere ulaşmaya kadar çarpışma sistemine eklenmektedir (Şekil 1(b)). Çarpışma sırasında meydana gelen kuvvet, penetratörde bulunan piezo-elektrikli sensörler tarafından ölçülerek veri toplama cihazında işlenmekte ve buna bağlı bulunan bilgisayar programında istenilen formatta kaydedilmektedir.



Şekil 1. Düşen Ağırlık Test Sistemi: (a) Numune Yerleşimi ve (b) Çarpışma Sistemi

Bu çalışmada sabitleme kuvveti ve darbe yükü sırasıyla 200 N ve 15,778 kg olarak seçilmiştir. Numuneler tel erazyon tezgâhında 100x100 mm ölçülerinde kare olarak kesilmiştir. Her bir numune yaklaşık 1,5 mm kalınlığa sahiptir. Darbe hızları plakalarda meydana gelen hasara göre belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan darbe hızları Tablo 1’de gösterilmektedir.

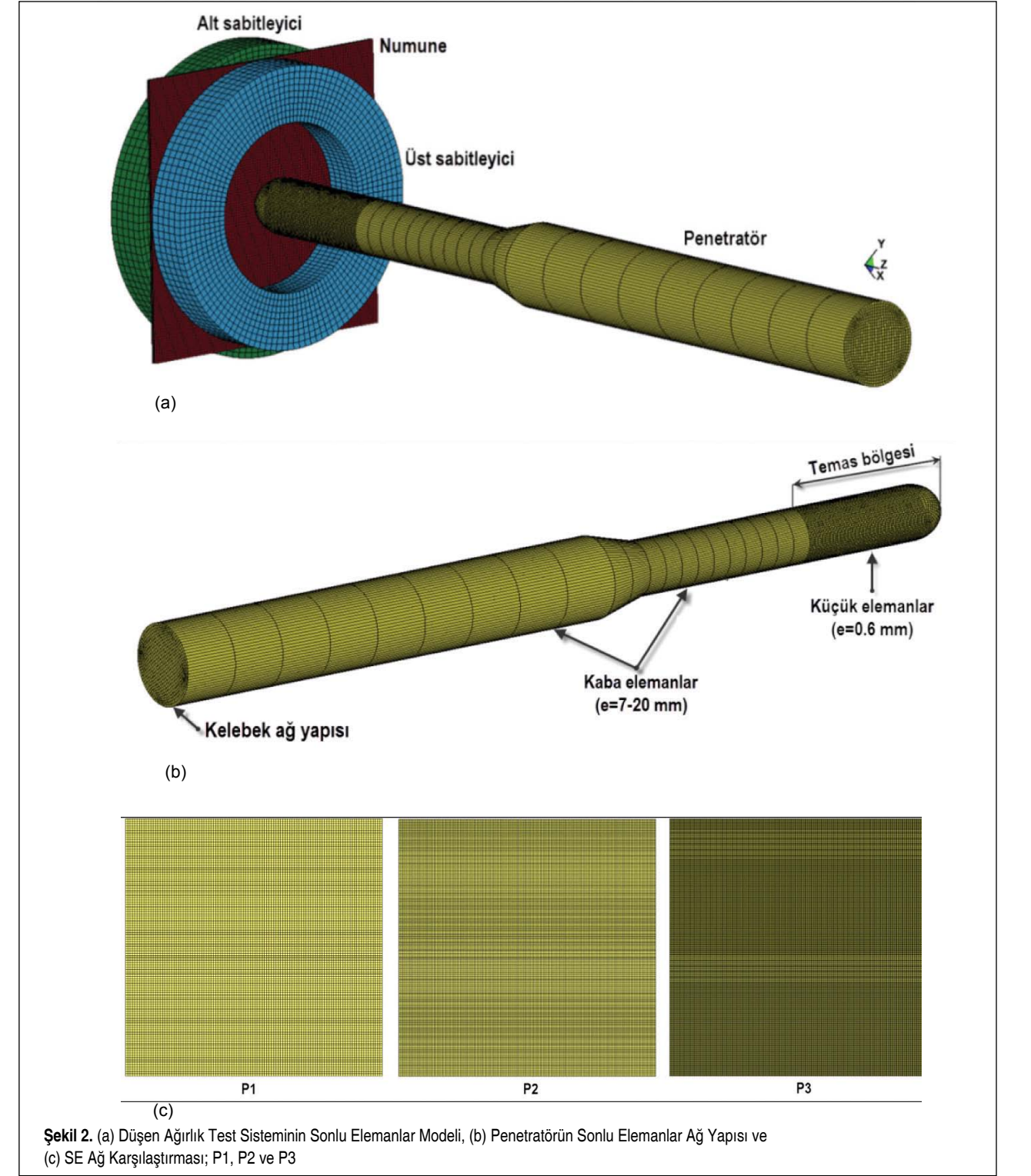
Tablo 1. Düşen Ağırlık Test Değişkenleri

Plaka malzemesi	Darbe yükü [Kg]	Çarpışma hızı [m/s]
1050 H14 alüminyum alaşımı	15,778	1,5 2,2 2,8 6,1
3003 alüminyum alaşımı	15,778	2,2 2,8 3,4 6,1

### 3. SONLU ELEMANLAR MODELLERİ

Sonlu elemanlar simülasyonları LS-DYNA v971 programı kullanılarak oluşturulmuştur. Tüm çözümler dinamik problemler için uygun olan “explicit” çözücüsüyle gerçekleştirilmiştir. Düşen ağırlık deney sisteminin sonlu elemanlar modeli Şekil 2(a)’da gösterilmiştir. Model, numune, sabitleyiciler ve penetratörden oluşmaktadır. Her bir parçanın sonlu elemanlar ağında dört düğümlü ve dört kenarlı eleman tipi ile “constant stress solid element” formülasyonu kullanılmıştır. Penetratör üzerinde homojen dağılıma sahip olmayan ağ yapısı oluşturulmuştur (Şekil 2(b)). Penetratörün numuneye temas içerisinde bulunduğu bölgede küçük elemanlar (eleman boyutu=0.6 mm), temas noktasından uzak olan bölgelerde ise kaba elemanlar (eleman boyutu=7-20 mm) kullanılmıştır. Böylece çözüm süresince eleman işleme süresinin çok uzun olmasının önüne geçilmiştir. Penetratör kesitinde ise sonlu elemanlar ağ yapısının kalitesini arttıran kelebek ağ yapısı kullanılmıştır. Numunede oluşan hasarın nümerik değişkenlerden en az şekilde etkilenmesi için, homojen dağılıma sahip sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar ağının sonuçlara etkisini incelemek amacıyla üç farklı eleman boyutuna sahip plakalar oluşturulmuştur. Bu plakalar P1 (0,9x0,9x0,3 mm), P2 (0,6x0,6x0,3 mm) ve P3 (0,3x0,3x0,3mm) olarak adlandırılmıştır (Şekil 2 (c)). P1 plakası 36963, P2 plakası 139445 ve P3 plakası 459045 adet deforme olabilen eleman içermektedir. Analizlerde deformasyon sırasında numuneye ait elemanlarda oluşacak bozulmaları önlemek için 5. tip HOURGLASS tanımlanmış ve 0.05 katsayısı kullanılmıştır.

Simülasyonlarda test plakasının akış gerilmesi MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY malzeme modeliyle modellenmiştir. Bu modele malzemeye ait mekanik değişkenler (elastisite modülü, poisson oranı, akma gerilmesi gibi) ile çekme deneyinden elde edilen gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrisi ve son olarak hasar kriteri olarak kopma anındaki plas-



Şekil 2. (a) Düşen Ağırlık Test Sisteminin Sonlu Elemanlar Modeli, (b) Penetratörün Sonlu Elemanlar Ağ Yapısı ve (c) SE Ağ Karşılaştırması; P1, P2 ve P3

tik gerçek gerinim değeri girilmektedir. Penetratör ve sabitleyiciler rijit olarak kabul edilmiş ve MAT\_RIGID malzeme modeli ile modellenmiştir. Rijit malzemenin elastisite modülü 210 GPa, poisson oranı ise 0,3 olarak alınmıştır. Simülasyonlarda sabitleyicilerin x-y-z eksenlerinde, penetratörün ise x-y eksenlerinde hareketi engellenmiştir. Sabitleyiciler tarafın-

dan numune üzerine etki eden basma kuvveti LOAD\_SEGMENT\_SET kartı tanımlanarak modele uygulanmıştır. Böylece DEFINE\_CURVE kartıyla tanımlanan kuvvet değerleri seçilen tüm düğümlere etki etmektedir. Plaka ile sabitleyiciler arasında AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. LS-DYNA kullanıcı kılavuzunda

bu temas algoritması aşağıdaki denklemiyle ifade edilir [12]:

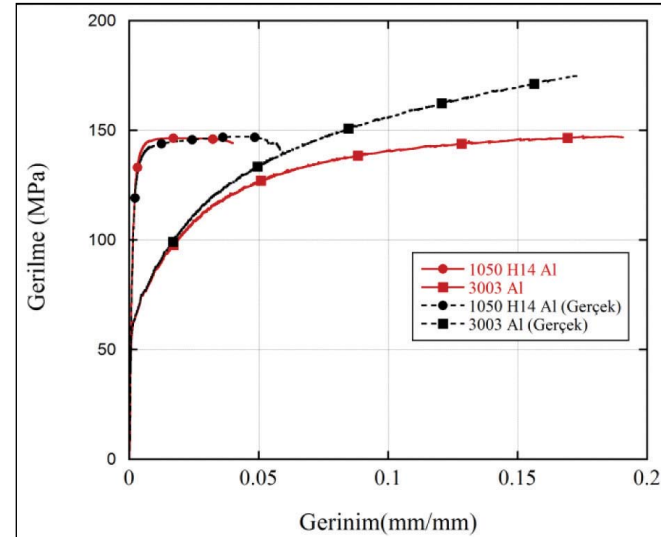
$$\mu = FD + (FS - FD)e^{-DC|V_{rel}|} \quad (4)$$

Bu denklemde  $FD$  dinamik sürtünme katsayısı,  $FS$  statik sürtünme katsayısı,  $DC$  üstsel bozulma katsayısı ve  $V_{rel}$  ise temas yüzeylerinin hızıdır. Plaka ile penetratör arasında ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE temas algoritması kullanılmaktadır. Her iki temas algoritmasında statik ve dinamik sürtünme katsayısı 0,3 ve 0,2 olarak alınmıştır.

## 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 4.1 Mekanik Karakterizasyon

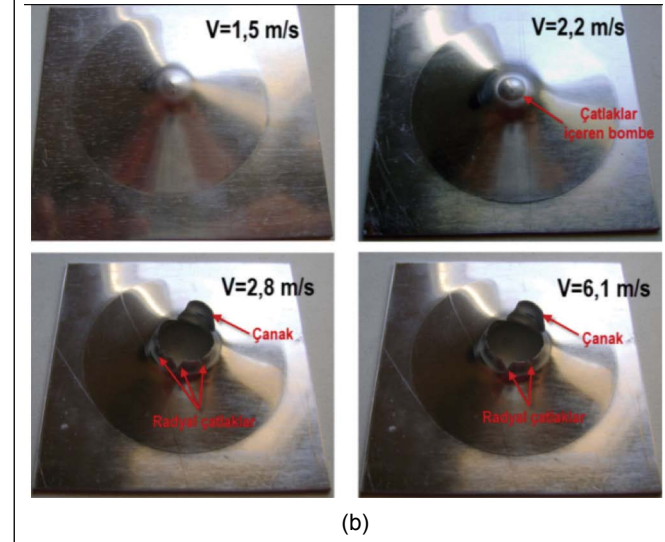
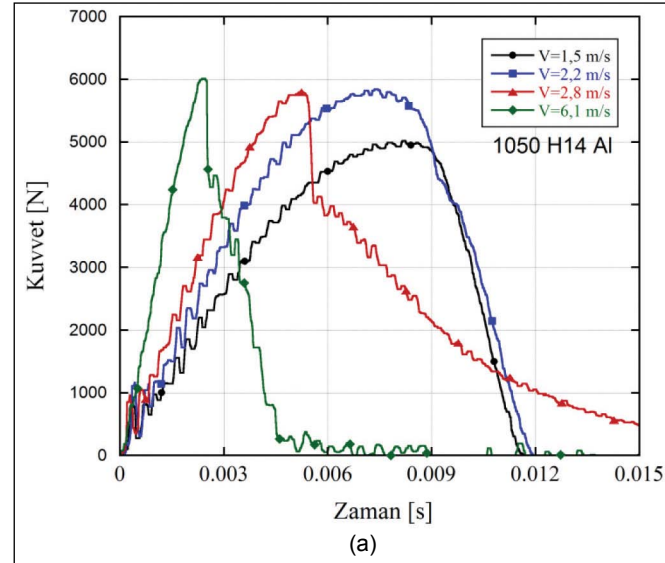
Şekil 3'te 1050 H14 ve 3003 alüminyum alaşımlarının çekme deneylerinden elde edilen gerilme-gerinim ve gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrileri gösterilmektedir. Deney sonucunda 1050 H14 alüminyum alaşımının elastisite modülü 70 GPa, akma gerilmesi 102 MPa, hasar gerinimi 0,62, 3003 alüminyum alaşımının elastisite modülü 69 GPa, akma gerilmesi 57 MPa, hasar gerinimi ise 0,4 olarak bulunmuştur.



Şekil 3. 1050 H14 ve 3003 Alüminyum Alaşımlarının Gerilme-Gerinim ve Gerçek Gerilme-Gerçek Gerinim Eğrileri

### 4.2 Düşen Ağırlık Testleri

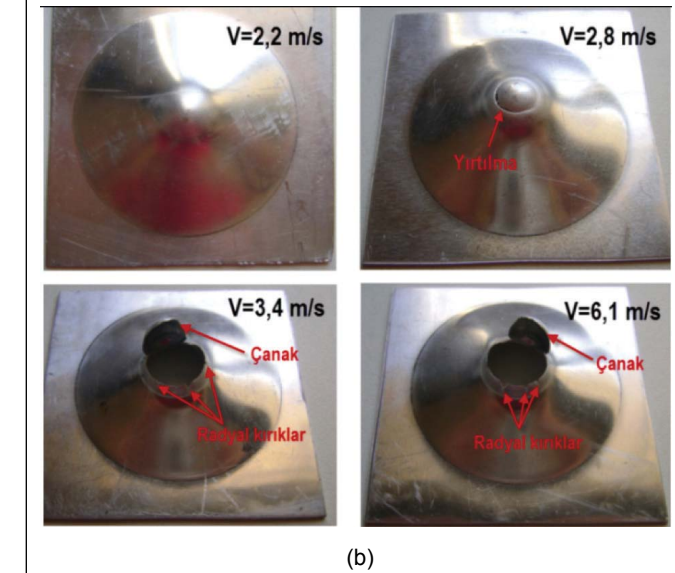
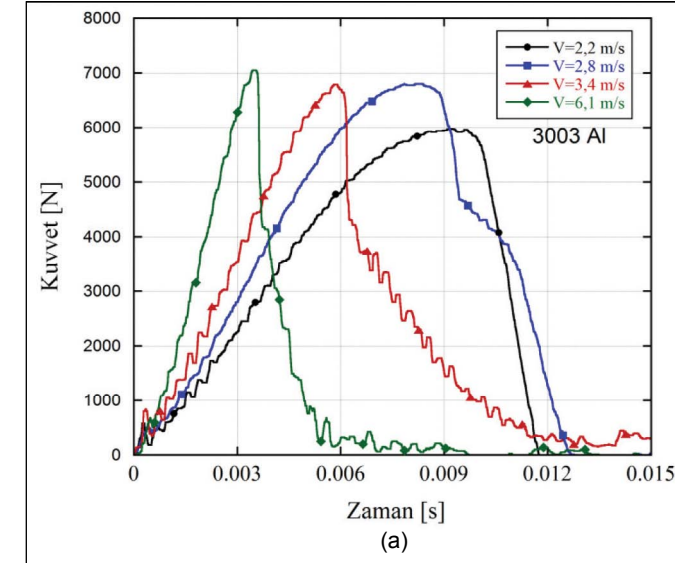
Şekil 4 (a) ve (b)'de darbeye maruz kalan 1050 H14 alüminyum alaşımı plakalara ait kuvvet-zaman ve plakalarda oluşan deformasyonlar gösterilmektedir. Darbe hızının 1,5 ve 2,2 m/s olduğu durumda kuvvet yaklaşık 0,009 saniyede maksimum değere ulaşmış ve bu noktada plastik geri sekme meydana gelmiştir (Şekil 4 (a)). Plakalarda delinme meydana gelmemiş, sırasıyla 13 ve 15,5 mm derinliğinde çökme meydana gelmiştir (Şekil 4(b)). Özellikle darbe hızının 2,2 m/s olduğu durumda, plaka delinme sınırında kalmıştır. Bu durum pla-



Şekil 4. Farklı Hızlarda Darbeye Maruz Kalan 1050 H14 Alüminyum Plakada Oluşan; (a) Kuvvet-Zaman ve (b) Deformasyon Şekilleri

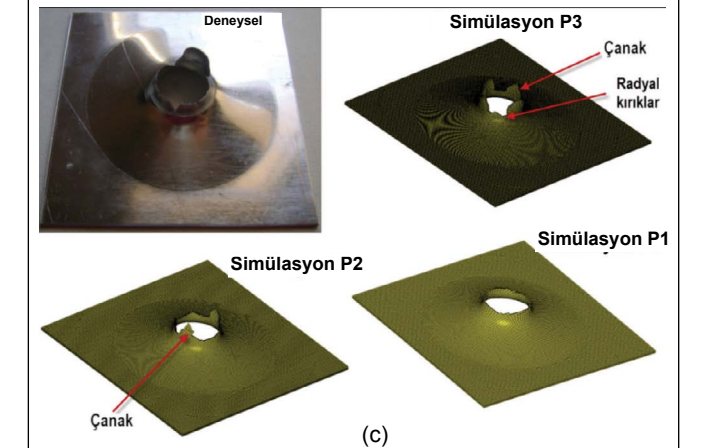
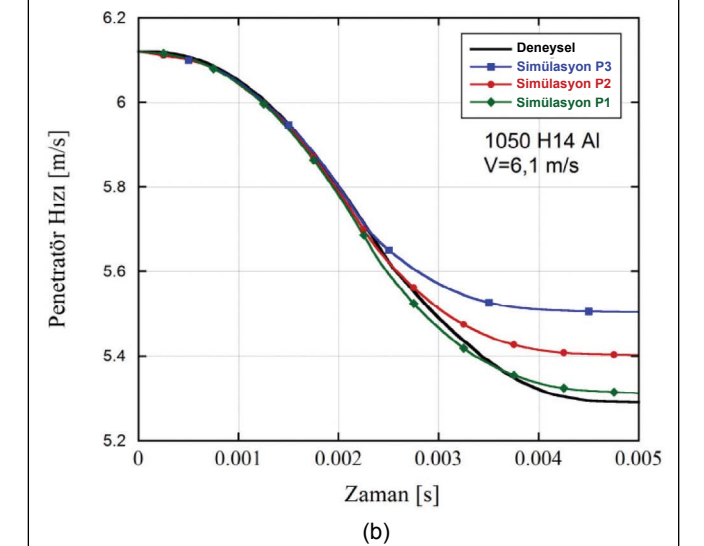
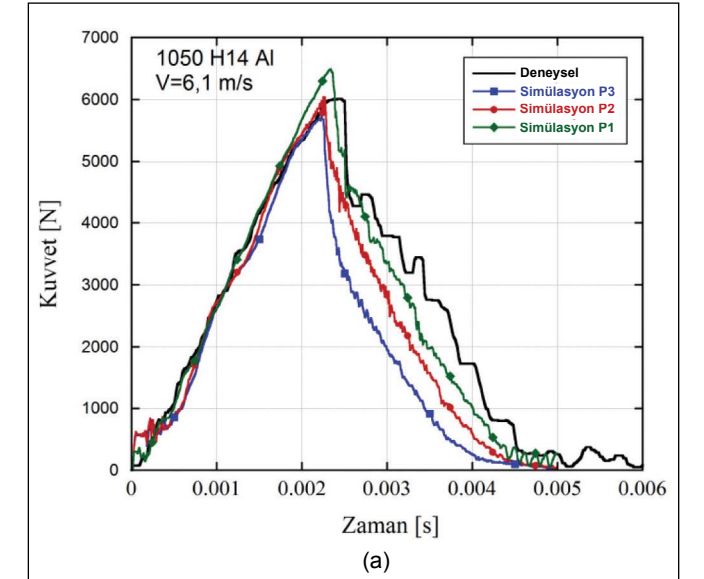
kanın çöken kısmında oluşan ve çevresinde çatlaklar içeren yuvarlak bombenin belirgin olmasından görülebilir. Darbe hızının 2,8 ve 6,1 m/s olduğu durumda, işlem başlangıcında kuvvetin zamanla lineer olarak arttığı ve daha sonra ani bir düşüş yaptığı görülmektedir. Ani düşüşün yaşandığı bu noktalarda delinme meydana gelmiştir. Delinmeden sonra kuvvet değerlerinde meydana gelen dalgalanma radyal kırık oluşumu ve delinme bölgesinde oluşan çanak kısmın penetratöre sürtünmesinden kaynaklanmaktadır (Şekil 4(b)). Bu hızlarda her iki plakalarda da 17 mm derinliğinde çökme meydana gelmiştir.

Şekil 5 (a) ve (b)'de darbeye maruz kalan 3003 alüminyum alaşımı plakalara ait kuvvet-zaman ve plakalarda oluşan deformasyonlar gösterilmektedir. Şekil 5(a)'dan görüleceği üzere 2,2 m/s darbe hızında plastik geri sekme meydana



Şekil 5. Farklı Hızlarda Darbeye Maruz Kalan 3003 Alüminyum Plakada Oluşan; (a) Kuvvet-Zaman ve (b) Deformasyon Şekilleri

gelmiştir. Aynı şekilde 2,8 m/s darbe hızında da geri sekme meydana gelmiştir. Ancak yaklaşık 0,0010-0,0011. saniye zaman aralığında gerçekleşen geri yükleme sırasında, kuvvet eğrisinde sapma görülmüştür. Bu sapmanın nedeni Şekil 5(b)'de numune üzerinde gösterilen yırtılmanın oluşmasıdır. Plakalarda delinme meydana gelmemiş, sırasıyla 12,5 ve 13 mm derinliğinde çökme meydana gelmiştir. Darbe hızının 3,4 ve 6,1 m/s olduğu testlerde ise plakalarda delinme gözlemlenmiştir. Bu hızlarda plakalarda 19 ve 20,5 mm derinliğinde çökme meydana gelmiştir. 3003 alüminyum plakalardaki radyal kırık sayısının, 1050 H14 alüminyum plakalarda oluşan kırık sayısından daha az sayıda olduğu görülmüştür. Bunun nedeni 3003 alüminyum alaşımının 1050 H14 alüminyum alaşımından daha sünek olmasıdır.



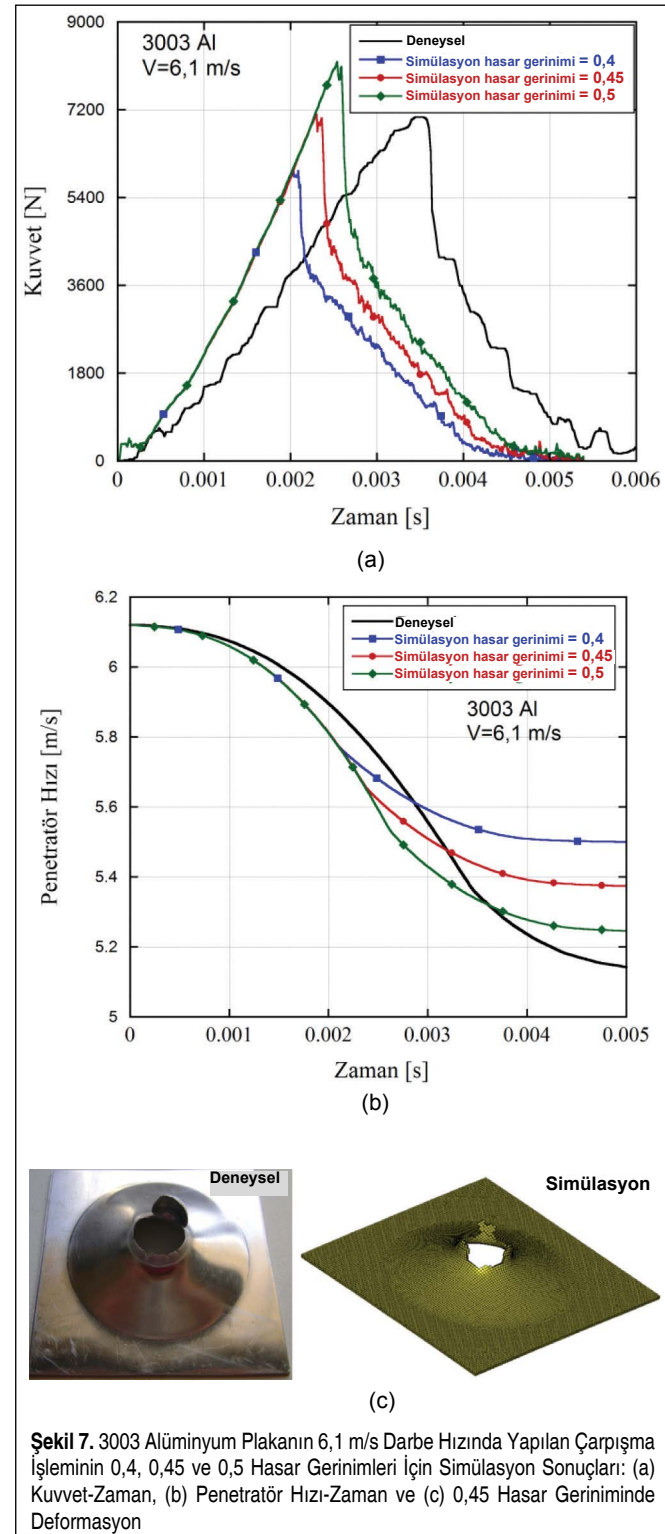
Şekil 6. 1050 H14 Alüminyum Plakanın 6,1 m/s Darbe Hızında Yapılan Çarpışma İşleminin P1, P2 ve P3 Plakaları İçin Simülasyon Sonuçları: (a) Kuvvet-Zaman, (b) Penetratör Hızı-Zaman ve (c) Oluşan Deformasyon

### 4.3 Sonlu Elemanlar Simülasyonları

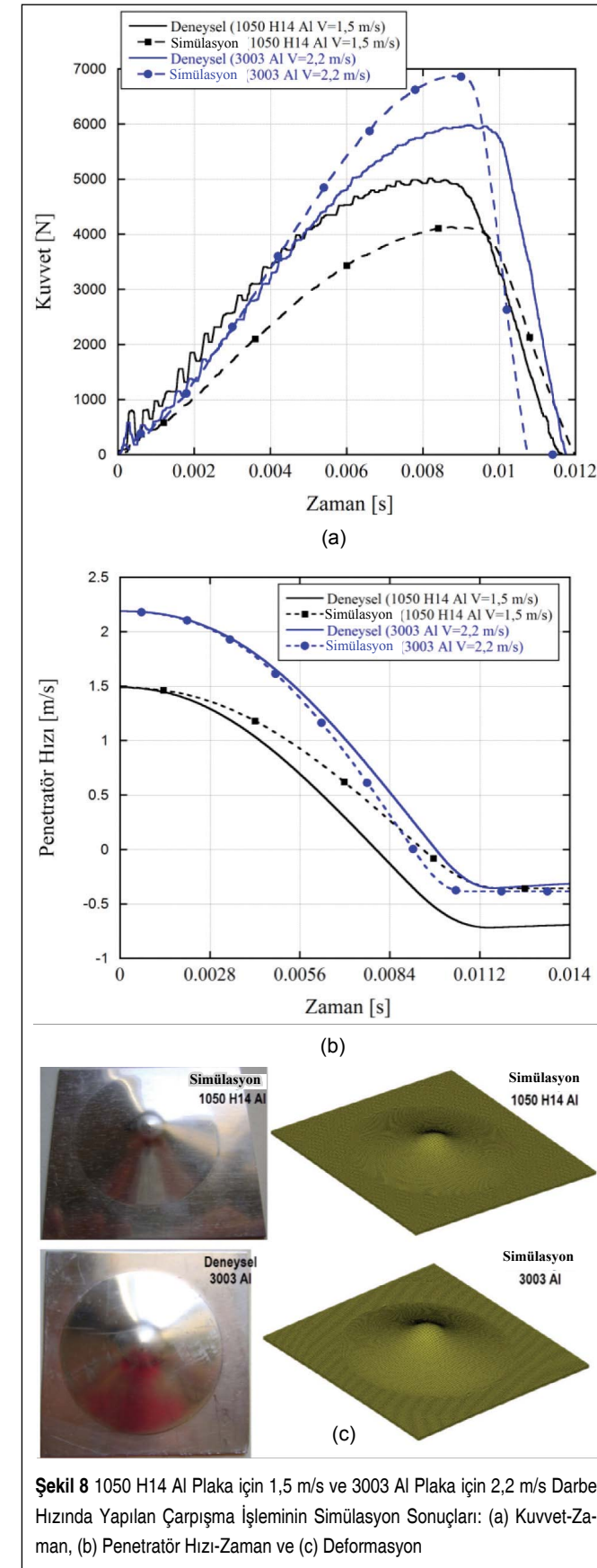
Şekil 6'da 1050 H14 alüminyum plakanın 6,1 m/s darbe hızında yapılan çarpışma işleminin simülasyon sonuçları P1, P2 ve P3 plakaları için verilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde, geri yükleme bölgesinde deneysel değere kıyasla daha az dalgalanma içerdiği görülmüştür. Bunun nedeni simülasyonlarda deformasyon bölgesindeki herhangi bir elemanın hasar kriterine ulaştığı anda sonlu elemanlar ağından silinmesidir. Bu penetratöre temas eden herhangi bir kısmın kalmamasına sebebiyet vermektedir. Deneylerde ise deformasyon bölgesinde hasar alan kısımlar penetratöre temas etmeye devam etmekte ve kuvvet-zaman eğrisinin geri yükleme kısmında görülen dalgalanmalara yol açmaktadır. Şekil 6 (a) ve (b)'den görüleceği üzere oluşan kuvvet ve penetratör hızının değişimi en iyi plakada 0,9 mm (P1) eleman büyüklüğünün kullanıldığı simülasyonlardan elde edilmiştir. Bunun nedeni daha küçük elemanların çabuk deforme olması ve hasar kriterine ulaşarak silinmesidir. Plakada oluşan çökme miktarı P1, P2 ve P3 plakaları için sırasıyla 8,46, 8,7 ve 8,5 mm'dir. Deneysel değere (8,2 mm) en yakın tahmini P1 plakasının kullanıldığı simülasyon vermiştir.

Şekil 6 (c) incelendiğinde eleman boyutunun plakada oluşan hasar şeklini doğrudan etkilediği görülmüştür. Plakada meydana gelen çanak ve radyal kırıklar yalnızca sık sonlu eleman ağ yapısına sahip P3 simülasyonunda oluşmuştur. Eleman büyüklüğünün artmasıyla radyal kırık ve çanak oluşumu gözlenmemiştir. Bundan sonra yapılacak olan simülasyonlar için hesaplama zamanının kısa olmasından dolayı P1 plakası seçilmiştir.

Şekil 7(a) ve (b)'de 3003 alüminyum plakanın 6,1 m/s darbe hızında yapılan çarpışma işleminin simülasyon sonuçları 0,4, 0,45 ve 0,5 hasar gerinimleri için verilmiştir. Çekme deneylerinden bulunan (0,4) hasar geriniminin kullanıldığı simülasyonda oluşan maksimum kuvvetin deneysel değerden yaklaşık 1600 N daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 7(a)). Bu nedenle hasar gerinimi artırılarak simülasyonlara devam edilmiştir. Hasar geriniminin 0,45 olduğu simülasyonda maksimum kuvvet deneysel değere ulaşmıştır. Ancak simülasyon sonucuyla deneysel kuvvet-zaman değerleri tam olarak çakışmamaktadır. Çekme deneylerinde görüldüğü gibi 3003 alüminyum alaşımı sünek bir malzemedir. Bu nedenle darbe esnasındaki plastik deformasyon miktarı fazladır. Simülasyonlarda ise elemanlar gerçek malzeme gibi şekil değiştirmeden silinmektedir. Sonuçlar arasında farkın olmasının temel nedeni budur. Plakada oluşan çökme miktarı 0,4, 0,45 ve 0,5 hasar gerinimleri için sırasıyla 8,7, 9,44 ve 10,1 mm'dir. Deneysel değere (11,6 mm) en yakın tahmini 0,5 hasar geriniminin kullanıldığı simülasyon vermiştir. Plakanın deformasyonu hasar geriniminin 0,45 olduğu simülasyonda yüksek doğrulukta tahmin edilmiştir (Şekil 7(c)).



Şekil 8'de 1050 H14 ve 3003 plakaların delinmediği hızlarda (1050 H14 Al için 1,5 m/s, 3003 Al için 2,2 m/s) gerçekleştirilen simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılarak gösterilmektedir. Her iki plakada da delinme olmamıştır. Maksimum kuvvet değeri, 1050 H14 Al plaka için deneysel değerden daha düşük, 3003 Al plaka için ise daha



yüksek olarak hesaplanmıştır. Ancak her iki simülasyonda yeterli yaklaşımları göstermiştir. Simülasyonlarda 1050 H14 Al plakada 9 mm, 3003 Al plakada ise 13 mm çökme meydana gelmiştir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada düşük hızlarda darbeye maruz kalan 1050 H14 ve 3003 alaşımı alüminyum plakalarda oluşan hasar, düşen ağırlık test cihazı ile gerçekleştirilen darbe deneyleriyle belirlenmiş, oluşturulan sonlu elemanlar simülasyonlarıyla deneysel hasar-kuvvet karşılaştırılmıştır. Testler sırasıyla 1,5 ve 6,1 m/s darbe hızı aralığında, 15,778 kg darbe yüküyle gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modelleri LS-DYNA programı kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışma sonunda aşağıda verilen sonuçlar çıkarılmıştır:

- Yapılan çekme deneylerinde alüminyum alaşımların mekanik özellikleri belirlenmiş, 3003 Al alaşımının 1050 H14 Al alaşımından daha sünek olduğu görülmüştür.
- 1050 H14 Al alaşımının 2,2 m/s, 3003 Al alaşımının ise 2,8 m/s'den daha yüksek darbe hızlarında tamamen delindiği görülmüştür.
- Her iki malzemede de delinme bölgesinde çanak ve radyal kırık oluşumu gözlenmiştir.
- Sonlu elemanlar simülasyon sonuçlarının oluşturulan eleman ağ büyüklüğünden fark yaratır biçimde etkilendiği görülmüştür. Eleman boyutunun büyüdükçe sonuçlardaki doğruluk yüzdesinin kuvvet için arttığı, hasar şekli için ise azaldığı görülmüştür.
- 3003 Al alaşımı gibi sünek bir malzemenin delinme içeren simülasyonlarında eleman silme esasına dayanan hasar kriterinin kullanılmasının sonuçların doğruluğuna önemli derecede etki ettiği görülmüştür.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar Cumhuriyet Akar'a 3003 alaşımli alüminyum plakaları sağlamasından dolayı teşekkür etmektedir.

## SEMBOLLER

$\sigma$	Gerilme
$\sigma_{gerçek}$	Gerçek gerilme
$\epsilon$	Gerinim
$\epsilon_{gerçek}$	Gerçek gerinim
$\epsilon^f$	Hasar gerinimi
$A_0$	Başlangıç kesit alanı
$A_f$	Deney sonundaki kesit alanı
$\mu$	Sürtünme katsayısı
$V_{rel}$	Temas yüzeyi hızı

## KAYNAKÇA

1. **Rodríguez-Martínez, J. A., Rusinek, A., Arias, A.** 2011. "Thermo-Viscoplastic Behaviour of 2024-T3 Aluminium Sheets Subjected to Low Velocity Perforation at Different Temperatures," *Thin-Walled Structures*, vol. 49, p. 819-832.
2. **Mannan, M. N., Ansari, R., Abbas, H.** 2008. "Failure of Aluminium Beams Under Low Velocity Impact," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, p. 1201-1212.
3. **Grytten, F., Børvik, T., Hopperstad, O.S., Langseth, M.** 2009. "Low Velocity Perforation of AA5083-H116 Aluminium Plates," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, p. 597-610.
4. **Caprino, G., Spataro, G., Del Luongo, S.** 2004. "Low-Velocity Impact Behaviour of Fibreglass–Aluminium Laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, p. 605-616.
5. **Fan, J.Z., Guan, W., Cantwell, W. J.** 2011. "Numerical Modelling of Perforation Failure in Fibre Metal Laminates Subjected To low Velocity Impact Loading," *Composite Structures*, vol. 93, p. 2430-2436.
6. **Ghelli, D., Minak, G.** 2011. "Low Velocity Impact and Compression After Impact Tests on Thin Carbon/Epoxy Laminates," *Composites Part B: Engineering*, vol. 42, p. 2067-2079.
7. **Liu, Y., Liaw, B.** 2009. "Drop-Weight Impact Tests and Finite Element Modeling of Cast Acrylic/Aluminum Plates," *Polymer Testing*, vol. 28, p. 808-823.
8. **Sevkat, E., Liaw, B., Delale, F., Raju, B. B.** 2009. "Drop-Weight Impact of Plain-Woven Hybrid Glass–Graphite/Toughened Epoxy Composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, p. 1090-1110.
9. **Zucchelli, A., Minak, G., Ghelli, D.** 2010. "Low-velocity Impact Behavior of Vitreous-Enameled Steel Plates," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, p. 673-684.
10. **Crupi, V., Epasto, G., Guglielmino, E.** 2010. "Low-Velocity Impact Strength of Sandwich Materials," *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 13, p. 409-426.
11. ASTM "Standard Specification for Wrought Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) Alloy for Surgical Implant Applications" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/C0033-03, www.astm.org. [Online].
12. L, LS-DYNA Keyword User's Manual vol. II: Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2007.

<http://omys.mmo.org.tr/muhendismakina/>

TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI

Mühendis ve Makina Dergisi

Online Makale Yönetimi



| ANA SAYFA (GİRİŞ SAYFASI) |

YAZAR

HAKEM

EDİTÖR

» HOŞGELDİNİZ

YAZAR GİRİŞİ

e-Posta :

Şifre :

[Yeni Kullanıcı](#) | [Şifremi Unuttum](#)

MÜHENDİS VE MAKİNA DERGİSİ'ne makale gönderebilmek için sisteme kayıt olmanız gerekmektedir. Kayıt olabilmek için sol kısımda yer alan [Yeni Kullanıcı] bağlantısına tıklayınız.

Daha önce kayıt olduysanız, e-posta adresiniz ve şifrenizi girmeniz yeterlidir.

Şifrenizi hatırlamıyorsanız, şifrenizin e-posta adresinize gönderilebilmesi için [Şifremi Unuttum] bağlantısına tıklayınız.

Sistemle ilgili sorularınızı [yayin@mmo.org.tr](mailto:yayin@mmo.org.tr) e-posta adresine gönderebilirsiniz.

**makalelerinizi online sistem üzerinden ulaştırabilirsiniz**