



Charpy darbe testinin deneysel ve sayısal analizi

Mustafa ALBAYRAK*

İnönü Üniversitesi, Malatya Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Malatya
mustafaalbayrak@inonu.edu.tr ORCID: 0000-0002-2913-6652, Tel: (422) 211 86 75 (162)

Mete Onur KAMAN

Fırat Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ
mkaman@firat.edu.tr ORCID: 0000-0003-0178-6079, Tel: (424) 237 00 00 (5315)

Geliş: 30.10.2018, Revizyon: 17.12.2018, Kabul Tarihi: 15.02.2019

Öz

Bu çalışmada, St37 çelik ve AA7075-T651 alüminyum numunesi üzerine Charpy darbe testi uygulayarak malzemelerin darbe absorbe enerjileri incelenmiştir. Deliksiz ve ortasında farklı delik geometrilerine sahip delikli numune modelleri kullanılmıştır. Deneysel prosedürde, numuneler 50x20x2 mm boyutlarında hazırlandıktan sonra dairesel delik etkisini inceleyebilmek için numune merkezine 9 mm çapında dairesel delik açılmıştır. Deneyler universal Charpy darbe test cihazında, dairesel delikli ve deliksiz St37 çelik numuneler için üçer kez tekrar edilmiştir. Test cihazının vurucu kütlesi 6.784 kg olup kapasitesi 49.05 J dir. Sayısal çalışmada, ANSYS yazılımı ön işlemci olarak, LS-DYNA ise çözücü olarak kullanılmıştır. St37 çelik ve AA7075-T651 alüminyum malzeme numunesi için, çözücüde Mat 15(Johson-Cook) malzeme modeli tercih edilmiştir. Vurucu ve mesnet modeli için Mat 20 (Rigid) malzeme modeli seçilmiştir.

Enerji sönümleme mekanizması hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle analiz edilerek, delikli ve deliksiz numuneler için karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilere göre St37 çelik numuneler için deliksiz numunelerin darbe dirençleri, merkezinde 9 mm çapında dairesel delik bulunan numunelerle kıyaslandığında önemli bir üstünlüğe sahip olduğu gözlemlenmiştir. Numune kesitinde sürekliliğin bozulmasıyla birlikte darbe sönümleme enerjisinin deneysel olarak % 46.53 oranında düştüğü tespit edilmiştir. Numunelerin deneysel çalışmalar sonrasında ölçülen darbe absorbe enerjileri ile sonlu elemanlar metodu kullanılarak elde edilen sayısal analiz sonuçları karşılaştırılarak grafikler halinde sunulmuştur. Çalışma sonucunda, sayısal ve deneysel yöntemlerle elde edilen sonuçlar arasındaki maksimum fark tüm numuneler için %4.62 olarak elde edilmiştir. Kullanılan sayısal darbe test metodunun deneylere gerek kalmadan karmaşık ve farklı geometrilere sahip numuneler için uygulanabilirliği ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: St37; LS-DYNA; Charpy Darbe Testi; Johnson-Cook; ANSYS;

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Malzemelerin darbe davranışı ve kırılma tokluğu tasarım için oldukça önemli parametrelerdir. Bu verilerin elde edilmesinde uygulanacak deneysel veriler ışığında sayısal darbe analizlerinin gerçekleştirilmesi tasarımcılar için oldukça kolaylık sağlayacaktır. Darbe deneylerinin genel amacı, malzemelerde gevrek kırılmaya neden olacak gerilme birikimini darbe esnasında malzeme tabanına yapay olarak uygulayıp, malzemenin bu durumda dinamik zorlamalara karşı göstereceği direnci tayin etmektir. Darbe deneyinde, numunenin dinamik bir zorlama altında kırılması için gereken enerji miktarının doğru tayin edilmesi gerekir. Elde edilen bu değer o malzemenin darbe direnci (darbe mukavemeti) olarak tanımlanır. Endüstriyel uygulamalarda malzemelerin ortam sıcaklığına ve maruz kaldığı yük türüne göre hasara uğradıkları görülmektedir. Mühendisler malzeme seçimlerinde, kullanacakları malzemelerin çalışma şartlarında meydana gelebilecek sünek ya da gevrek kırılmalara karşı ne kadarlık bir enerji sönümleyebileceği hakkında bilgi sahibi olmak isterler. Bu amaçla, malzemelerin dinamik yükler altında dayanabilecekleri maksimum kırılma enerjilerini belirlemek veya ani darbe anında absorbe edebileceği enerji miktarını tespit ederek malzemenin sünek veya gevrek davranışı hakkında bilgi elde etmek için *Charpy* darbe deneyi yapılır.

Ali ve diğerleri (2011), alüminyum 6061 ve düşük karbonlu 1050 çeliği üzerine yaptıkları *Charpy* darbe deneyinde, numunelerin malzeme özelliklerine bağlı olarak darbe enerjisi sönümleme miktarlarını kıyaslamışlardır. Ghaith ve Fadi (2010), *AISI 4140* çelik alaşımı numuneler kullanarak farklı test sıcaklıklarının malzeme darbe enerjileri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca yapmış oldukları sonlu elemanlar modelinde, sonlu eleman sıklığının deneysel ve sayısal çalışma arasındaki hata oranına etkisini analiz etmişlerdir. Serizawa ve diğerleri (2001), *Charpy* darbe deneyi sonrasında farklı çentik tiplerinin plastik şekil değiştirme miktarları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Jeong ve diğerleri (2008), çentiksiz numunelerin

darbe dayanımlarını değerlendirmek amacıyla sonlu elemanlar analizi üzerinde çalışmışlardır. Ozturk (2010), vurucu tipi, ölçüleri, numune kalınlığı ve malzeme özelliği gibi parametrelerin darbe enerjileri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Kumar ve diğerleri (2012), farklı vurucu hızlarının numuneler üzerindeki dinamik etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca statik olarak ta asal gerilmelerin değişimlerini analiz etmişlerdir. Ghaith ve diğerleri (2013), *AISI 4140* çeliği ve Alüminyum *A6061*'den üretilmiş numuneler üzerinde *Charpy* darbe deneyi gerçekleştirmişlerdir. Sonuçta numunelerin absorbe enerjilerini ve maksimum şekil değiştirme miktarlarını kıyaslamışlardır. Altenhof ve diğerleri (2004), çentiksiz test numunelerini *ASTM - E23* standartlarında imal ettikten sonra *Charpy* darbe test cihazında deneylere tabi tutmuşlardır. Deneyler sonucunda: vurucunun çarpma hızının maksimum reaksiyon yükü, toplam enerji ve absorbe enerjisi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kılıçaslan ve diğerleri (2012), düşük hızlarda darbeye maruz kalan *1050 H14* ve *3003* alüminyum alaşımından imal edilen plakalarda oluşan hasarı, düşen ağırlık test cihazı ile gerçekleştirilen darbe deneyleriyle belirlemişlerdir. Madhusudhan ve diğerleri (2018), V çentikli zırh çelikleri üzerine farklı hızlarda vurucu düşürerek numunelerin darbe enerjilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında plastik deformasyon için *Johnson-Cook* hasar kriterini uygulamış ve çentik etrafındaki gerilme dağılımlarını incelenmişlerdir. Majzoobi ve diğerleri (2018), alüminyum ve titanyum tabakaların farklı dizilişleri ile elde edilen fiber metal numuneler üzerinde yüksek hızlı darbe deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada numunelerin absorbe enerjilerini belirleyerek balistik davranışlarını incelemişlerdir. Puech ve diğerleri (2018), kısa kevlar takviyeli bio kompozitlerin darbe davranışlarını deneysel ve sayısal olarak karşılaştırmışlardır. Farklı darbe enerjileri altındaki numunelerin zamana bağlı temas kuvveti değişimlerini incelemişlerdir. Trajkovski ve diğerleri (2015), *PROTAC 500* zırh çeliğine ait *Johnson-cook* malzeme parametrelerini ve hasar kriterlerini belirlemişlerdir. Sonrasında numuneleri *Charpy*

darbe test cihazında testlerden geçirerek, malzemeye ait bu özelliklerin geçerliliğini sayısal sonuçlarla karşılaştırılarak kontrol etmişlerdir. Buzyurkin ve diğerleri (2015), titanyum alaşımlarından üretilmiş bir uçak motorunun fan kasasına yüksek hızlı darbe testi uygulamışlardır. Dinamik yüklemeler altında malzeme davranışlarını incelemek için *Johson-cook* malzeme modelini ve hasar kriterini kullanmışlardır. Liu ve diğerleri (2017), fiber metal tabaka ve alüminyum köpükten oluşan, geliştirilmiş yeni nesil sandviçler üzerinde düşük hızlı darbe çalışarak köpük kalınlıklarına bağlı olarak darbe sönümlenme enerjilerini karşılaştırmışlardır. Santiago ve diğerleri (2018), polipropilenden üretilmiş takviye elemanına sahip yeni nesil termoplastik fiber metal tabakalı kompozitlerin darbe davranışları üzerinde çalışmışlar. Düşük hızlı ve yüksek hızlı darbe testleri sonucunda numunelerin balistik sınırlarını ve darbe absorbe enerjilerini belirlemişlerdir. Wang ve diğerleri (2016), farklı çekirdek malzemelerine sahip sandviç panellerin orta hızlı darbe altındaki dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Çekirdek malzemelerine göre sandviç panellerin temas kuvvetlerini ve enerji absorbe özelliklerini karşılaştırmışlardır. Ansari ve Chakrabarti (2016), kevlar takviyeli kompozitler üzerinde farklı ağırlıklara sahip, deforme olabilen vurucular kullanarak düşük ve yüksek hızlı darbe testleri gerçekleştirmişlerdir. Vurucu hızlarına bağlı olarak hasar ilerlemesi üzerinde çalışmışlardır. Zmindak ve diğerleri (2016), alüminyum, çelik ve kompozit levhalar üzerine yüksek hızlı darbe testi gerçekleştirmişlerdir. Kompozit için *Hashin* hasar kriterini uygularken, alüminyum ve çelik için *Johson-cook* malzeme modeli ve hasar kriterini tanımlayarak levhalar üzerindeki *von Mises* gerilme dağılımlarını incelemişlerdir. Kim ve diğerleri (2015), tungsten ağır alaşımı üzerine *Charpy* darbe testi gerçekleştirerek, darbe absorbe enerjilerini ve *Wierzbicki-Xue* hasar modeline ait katsayıları tespit etmişlerdir.

Araştırmalarda genellikle darbe testi üzerinde malzeme etkisi deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Ayrıca kenar çentik geometrisinin

incelendiği çalışmalar da mevcuttur (Madhusudhan ve diğerleri (2018), Srizawa ve diğerleri (2001)). Literatürden farklı olarak bu çalışmada ise *St37* çelik ve *AA7075-T651* alüminyum malzemesinden yapılmış ortasında farklı delik geometrilerine sahip numuneler üzerinde *Charpy* darbe testleri sayısal olarak gerçekleştirilerek numunelerin darbe dayanımları belirlenmiştir. Çalışmanın amacı numunelerin delik geometrilerinin darbe enerji sönümlemesi üzerine etkilerinin incelenmesidir. Bu amaçla başlangıçta deliksiz ve dairesel delikli numunelerin deneysel testleri gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler sayısal sonuçlarla doğrulanmıştır. Sonrasında ise elde edilen sayısal veriler ışığında farklı delik geometrilerine sahip numunelerin darbe absorbe enerjileri sayısal olarak hesaplanmıştır. Ayrıca deliksiz ve dairesel delikli numunelerde, vurucunun numuneye teması ile birlikte ortaya çıkan *von Mises* gerilme dağılımları ve numunenin vurucu doğrultusundaki zamana bağlı şekil değişim miktarları grafikler halinde sunulmuştur. Sayısal analizde, numune ve mesnetler *LS-DYNA* paket programında üç boyutlu olarak modellenmiş olup, vurucu modeli *SolidWorks* programından aktarılmıştır. Gerekli sınır şartları ve temas parametreleri tanımlandıktan sonra analiz gerçekleştirilmiş ve sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak grafikler halinde verilmiştir.

Materyal ve Yöntem

Deneysel Çalışma

Darbe testi *St37* çeliği üzerinde uygulanmış olup ortasında dairesel delik bulunan ve deliksiz numuneler için gerçekleştirilmiştir *St37* çeliğine ait numuneler 50x20x2 mm ölçülerinde olacak şekilde üçer adet hazırlanmıştır (Şekil 1). Ortasında dairesel delik bulunan numuneler için universal matkap tezgâhları kullanılarak delik çapı 9 mm olacak şekilde dairesel delikler açılmıştır (Şekil 2). *Charpy* darbe testleri, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında bulunan 49.05 J kapasiteli universal *Veb Werkstoffprüfmaschinen Leipzig* marka *Charpy* test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).

Darbe testleri gerçekleştirilirken, numuneler mesnet yuvasına yerleştirildikten sonra sarkaç kola bağlı vurucunun serbest bırakılmadan önceki yüksekliği ile çarpma sonrası ulaştığı yükseklik arasındaki potansiyel enerji farkı, numuneye ait darbe sönümlenme enerjisi olarak cihaz ölçüm kadranından okunmuştur.



1 nolu numune: N1
Boyutlar 50x20x2 mm

2 nolu numune: N2
Boyutlar 50x20x2 mm

3 nolu numune: N3
Boyutlar 50x20x2 mm

Şekil 1. St37 çeliğinden üretilmiş deliksiz numuneler.



1 nolu numune: DN1
Boyutlar 50x20x2 mm
 $d = 9$ mm

2 nolu numune: DN2
Boyutlar 50x20x2 mm
 $d = 9$ mm

3 nolu numune: DN3
Boyutlar 50x20x2 mm
 $d = 9$ mm

Şekil 2. St37 çeliğinden üretilmiş delikli numuneler.

Sayısal Çalışma

Sonlu Elemanlar Metodu

Çalışmada *LS-DYNA* yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. *SolidWorks* programında oluşturulan vurucu geometrisi *LS-DYNA* programına aktarılmıştır. Eleman tipi olarak *Solid164* seçilmiştir. Numune modeli olarak, deliksiz numunelerin yanı sıra ortasında üçgen, dörtgen, beşgen, altıgen ve dairesel delik bulunan modeller kullanılarak delik geometrisinin darbe dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Numunelere ait farklı delik geometrileri Şekil 4'te verilmiştir. Daha hassas sonuçlar elde etmek için geometriyi uygun sonlu elemanlar ağ yapısına bölerek optimum ağ sıklığı elde edilmiştir. Çalışmada deliksiz numuneler için 39.334 düğüm, dairesel delikli numuneler

için ise 57.626 düğüm kullanılmıştır. Dairesel delikli numune için sonlu elemanlar ağ yapısı Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 3. Universal Charpy darbe test cihazı

Bu çalışmada malzeme modeli olarak *Johnson-Cook* malzeme modeli, hasar kriteri olarak ta *Johnson-Cook* hasar kriteri kullanılmıştır (Banerjee ve diğerleri, 2015). *Johnson-Cook* malzeme modeli izotropik malzemeler için kullanılır. *St37* çelik ve *AA7075-T651* alüminyum malzeme numunesi için, çözücüde *Mat 15 (Johnson-Cook)* malzeme modeli tercih edilmiştir. Vurucu ve mesnet modeli için *Mat 20 (Rigid)* malzeme modeli seçilmiştir. Deneysel test cihazının vurucu kütlesi 6.78 kg'dır. Sayısal darbe testlerinde çözüm zamanı önemli bir parametredir. Numuneye göre oldukça büyük, bu kütlede bir vurucu modelini sayısal olarak yapmak model hacmini ve eleman sayısını dolayısıyla da çözüm zamanını artıracaktır. Bu nedenle aynı vurucu kütlesini elde edecek şekilde yoğunluk artırılıp, numune hacmi küçültülmüştür. Dolayısıyla da çözüm zamanı azaltılmıştır. Vurucu modellemesi yapılırken vurucunun temas yüzeyi, test cihazındaki vurucu temas yüzeyi ile aynı boyutlarda tasarlanmıştır. Temas yüzeyi boyutları değişmediği için kontak gerilmeleri değişmeyecektir. Vurucu ve mesnet malzemelerine ait mekanik özellikler Tablo 1'de

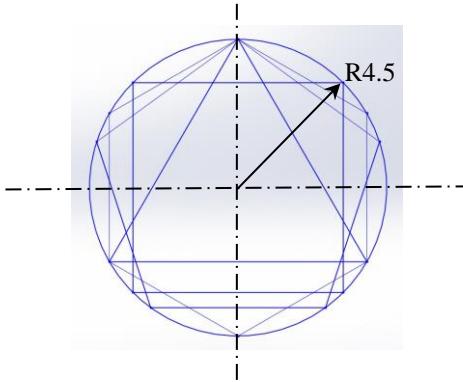
verilmiştir. Alüminyum AA7075-T651 ve St37 malzeme modeline ve hasar kriterlerine ait özellikler ise Tablo 2- 5'te sunulmuştur.

Johnson-Cook Plastik Malzeme Modeli

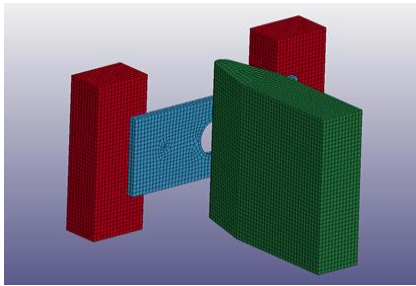
Bu izotropik malzeme modeli akma sınırının altındaki gerilmelerde *Hooke* kanununa uygun olarak lineer elastik davranış göstermektedir (Ceylan ve İlker, 2008). Akma sınırının üzerine çıkan gerilme durumlarında ise plastik davranış göstermektedir. Gerilme ve birim uzama arasındaki ilişki (1) eşitliğinde verilmektedir (Ceylan ve İlker, 2008).

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right] [1 - [T^*]^m] \quad (1)$$

Burada; σ akma mukavemeti, A akma gerilmesi, B pekleşme modülü, ε plastik birim uzama, n pekleşme üs katsayısı, C şekil değiştirme sabiti, $\dot{\varepsilon}$ deformasyon hızı, ε_0 referans deformasyon hızı, m sıcaklık üs katsayısı ve T^* Kelvin cinsinden erime sıcaklığıdır.



Şekil 4. Numunelere ait farklı delik geometrileri



Şekil 5. Vurucu, numune ve mesnetlere ait sonlu elemanlar modeli.

Tablo 1. Vurucu ve mesnet malzemelerine ait mekanik özellikler.

Özellikler	Sembol	Vurucu	Mesnet
Elastisite Modülü (GPa)	E	210	210
Yoğunluk (kg/m^3)	ρ	351803.72	7850
Poisson oranı	ν	0.3	0.3

Tablo 2. St37 malzemesine ait mekanik özellikler. (Ozturk, G., 2010).

Özellikler	Sembol	Vurucu
Elastisite Modülü (GPa)	E	210
Yoğunluk (kg/m^3)	ρ	7850
Poisson oranı	ν	0.3
Kayma Modülü (GPa)	G	73
Akma gerilmesi (GPa)	A	0.25598
Pekleşme Modülü (GPa)	B	0.16258
Pekleşme üs katsayısı	n	0.2571
Şekil değiştirme sabiti	C	0.022
Sıcaklık üs katsayısı	m	1
Erime sıcaklığı (K)	T^*	1800

Tablo 3. AA7075-T651 malzemesine ait mekanik özellikler. (Flores-Johnson vd., 2014).

Özellikler	Sembol	Vurucu
Elastisite Modülü (GPa)	E	70
Yoğunluk (kg/m^3)	ρ	2700
Poisson oranı	ν	0.3
Kayma Modülü (GPa)	G	26.92
Akma gerilmesi (GPa)	A	0.520
Pekleşme Modülü (GPa)	B	0.477
Pekleşme üs katsayısı	n	0.52
Şekil değiştirme sabiti	C	0.001
Sıcaklık üs katsayısı	m	1
Erime sıcaklığı (K)	T^*	893

Johnson-Cook Hasar Kriteri

Akma sınırının üstüne çıkan gerilme durumlarında maksimum plastik birim uzama değeri (kopma sınırı) aşıldığı anda kopma başlayacaktır (Wang, K., 2016). *Johnson-Cook* hasar kriteri (2) eşitliğinde verilmektedir (Wang, K., 2016).

$$\varepsilon_f = \left[D_1 + D_2 + \exp\left(D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_s}\right) \right] \left[1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] [1 + D_5 T^*] \quad (2)$$

Burada; D_1 , D_2 , D_3 , D_4 , D_5 hasar parametreleri, σ_m üç yöndeki normal gerilmelerin ortalaması, σ_s *von Mises* eşdeğer gerilmesidir.

Tablo 4. *St37* malzemesine ait *Johnson-Cook* hasar parametreleri. (Ozturk, G., 2010).

Özellikler	Sembol	Vurucu
HASAR PARAMETRESİ 1	D_1	0.05
HASAR PARAMETRESİ 2	D_2	3.44
HASAR PARAMETRESİ 3	D_3	-2.12
HASAR PARAMETRESİ 4	D_4	0.002
HASAR PARAMETRESİ 5	D_5	0.61

Tablo 5. *AA7075-T651* malzemesine ait *Johnson-Cook* hasar parametreleri. (Flores-Johnson vd., 2014).

Özellikler	Sembol	Vurucu
HASAR PARAMETRESİ 1	D_1	0.096
HASAR PARAMETRESİ 2	D_2	0.049
HASAR PARAMETRESİ 3	D_3	-3.465
HASAR PARAMETRESİ 4	D_4	0.016
HASAR PARAMETRESİ 5	D_5	1.099

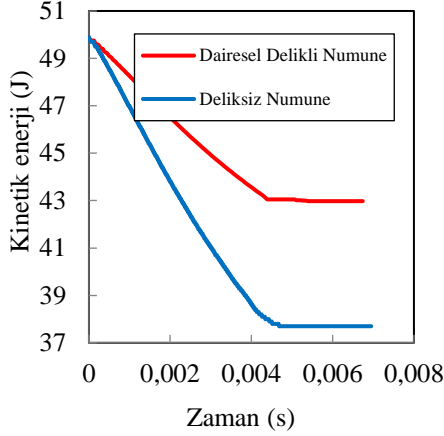
Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında darbe test yöntemlerinden biri olan *Charpy* darbe deneyi *St37* çelik numuneler üzerinde uygulanmış olup, numunelerin darbe dirençleri hem sayısal hem de deneysel olarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Sayısal çalışmada ek olarak deliksiz ve ortasında dairesel delik bulunan modeller için *AA7075-T651* alüminyum numunelerin darbe dayanımları belirlenerek *St37* çelik numuneler ile kıyaslanmıştır. Numuneler uygun ölçülerde hazırlandıktan sonra, 49.05 J kapasiteli universal *Charpy* darbe test cihazına bağlanarak testler gerçekleştirilmiştir. Deneyler hem ortasında dairesel delik bulunan numuneler için hem de deliksiz numuneler için üçer kez tekrarlanmıştır. Darbe deneyi sonrası numune görüntüleri Şekil 6'da sunulmuştur. Deneyde kullanılan vurucu modeli *Solid Works* programında üç boyutlu olarak modellenmiş olup *LS-DYNA* programına aktarılmıştır. Sınır şartları olarak; mesnetler ankastre mesnet olarak kabul edilmiş ve vurucunun yalnızca vuruş yönünde hareket etmesi sağlanmıştır. Vurucunun numuneye ilk temas hızı, bırakıldığı yüksekliğe bağlı olarak 3.836 m/s olarak hesaplanmış ve programa tanımlanmıştır. Vurucunun temas anındaki ve çarpma sonrasındaki kinetik enerjileri farkı, numunelere ait darbe dayanımlarını göstermektedir. Sayısal analiz sonucunda, ortasında dairesel delik bulunan numuneler ve deliksiz numuneler için darbe dayanımları Şekil 7'de verilmiştir.



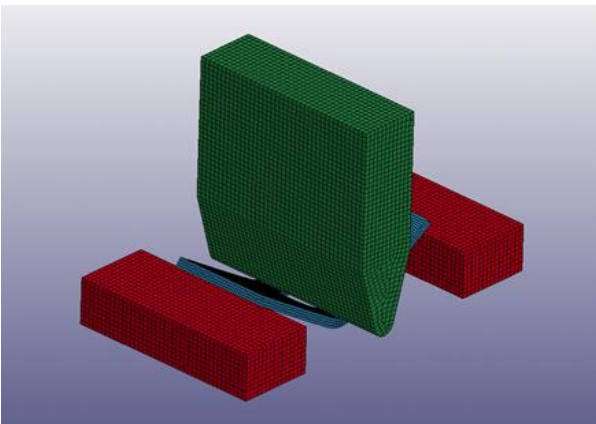
1 nolu numune: DN1 Boyutlar 50x20x2 mm $d = 9$ mm Darbe sönümlenme enerjisi: 6.87 J	2 nolu numune: DN2 Boyutlar 50x20x2 mm $d = 9$ mm Darbe sönümlenme enerjisi: 7.36 J	3 nolu numune: DN3 Boyutlar 50x20x2 mm $d = 9$ mm Darbe sönümlenme enerjisi: 6.87 J
---	---	---

Şekil 6. Darbe testi sonrasında ortasında dairesel delik bulunan numuneler.

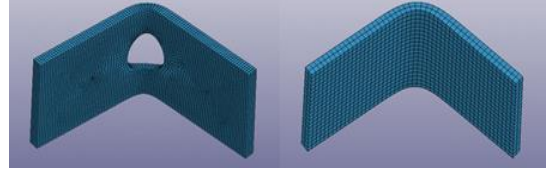


Şekil 7. Dairesel delikli ve deliksiz numuneler için vurucunun kinetik enerjisi – zaman grafiği.

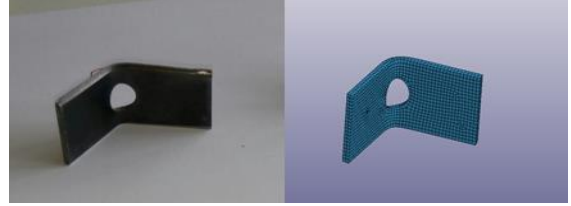
Şekil 7'deki grafik incelendiğinde, ortasında dairesel delik bulunan numuneye, vurucunun temas anındaki ($t=0$ s) kinetik enerjisi 49.89 J, çarpma sonrasında ($t=0.0044$ s) 43.05 J olarak ölçülmüştür. Burada; t zaman parametresidir. Kinetik enerjiler arasındaki fark 6.84 J olarak hesaplanmış olup aynı zamanda dairesel delikli numunelerin darbe dayanımı olarak belirlenmiştir. Deliksiz numuneler için darbe dayanımı hesaplandığında bu değer 12.19 J olarak bulunmuştur. Vurucunun numuneye çarpma anı sonrası sonlu elemanlar modeli Şekil 8'de gösterilmiştir. Darbe deneyi sonrası numunelere ait sonlu elemanlar modeli Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 8. Vurucunun numuneye çarpma anı sonrası sonlu elemanlar modeli.



Şekil 9. Darbe deneyi sonrası numunelere ait sonlu elemanlar modeli.



Şekil 10. Darbe deneyi sonrası St37 numunesine ait deneysel ve sayısal hasar resimleri.

Tablo 4. Deliksiz numunelere ait deneysel ve sayısal darbe dayanımları.

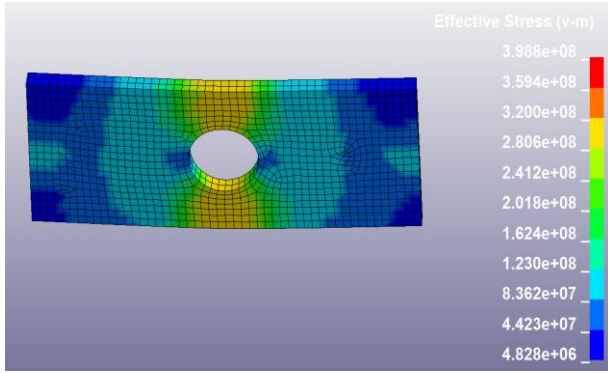
Ölçüm (J)	Deneysel	Sayısal
1 NOLU NUMUNE (N1)	12.26	12.19
2 NOLU NUMUNE (N2)	12.95	12.19
3 NOLU NUMUNE (N3)	13.14	12.19
ORTALAMA	12.78	12.19

Tablo 5. Ortasında dairesel delik bulunan numunelere ait deneysel ve sayısal darbe dayanımları.

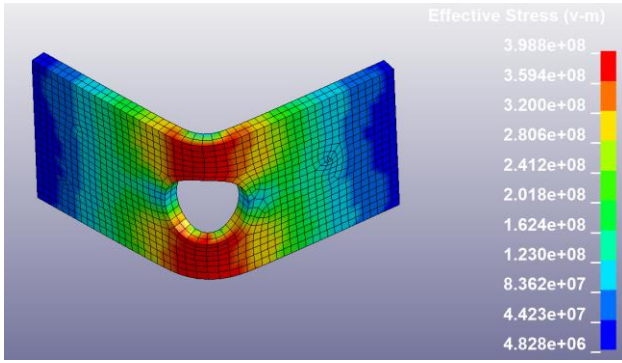
Ölçüm (J)	Deneysel	Sayısal
1 NOLU NUMUNE (DN1)	6.87	6.84
2 NOLU NUMUNE (DN2)	7.36	6.84
3 NOLU NUMUNE (DN3)	6.28	6.84
ORTALAMA	6.83	6.84

Deneysel sonrası numunelerin deneysel ve sayısal olarak hasar görüntüleri Şekil 10'da verilmiştir. Deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak üç numune üzerinden alınan deney sonuçlarının ortalamasına bakıldığında sonuçların oldukça

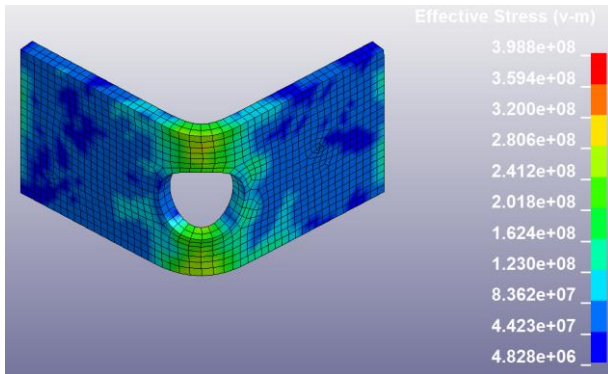
yakın olduğu tespit edilmiş ve Tablo 4 ve 5'te sunulmuştur.



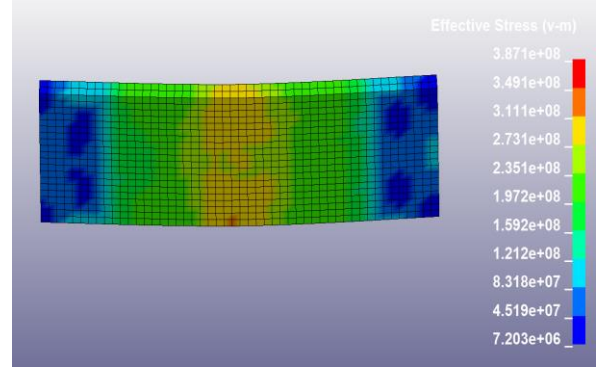
Şekil 11. Delikli numunelere ait von Mises gerilme dağılımı ($t=0.001893$ s).



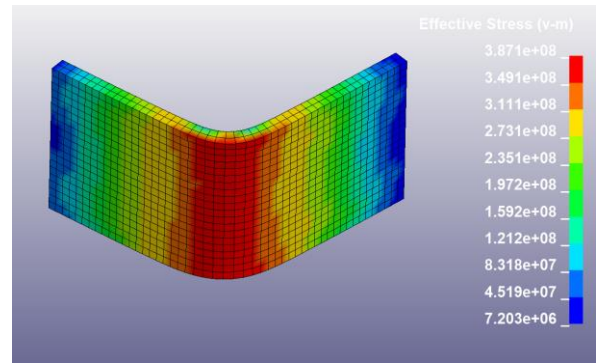
Şekil 12. Delikli numunelere ait von Mises gerilme dağılımı ($t=0.003787$ s).



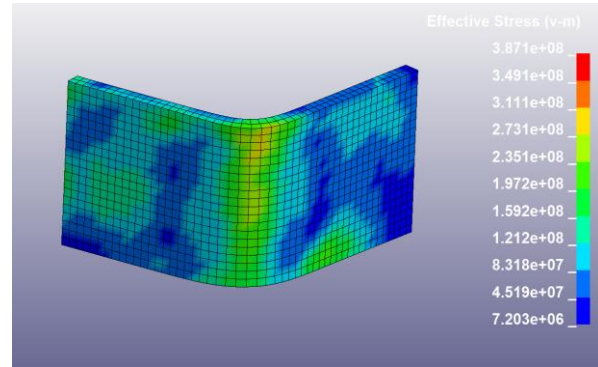
Şekil 13. Delikli numunelere ait von Mises gerilme dağılımı ($t=0.007765$ s).



Şekil 14. Deliksiz numunelere ait von Mises gerilme dağılımı ($t=0.001893$ s).



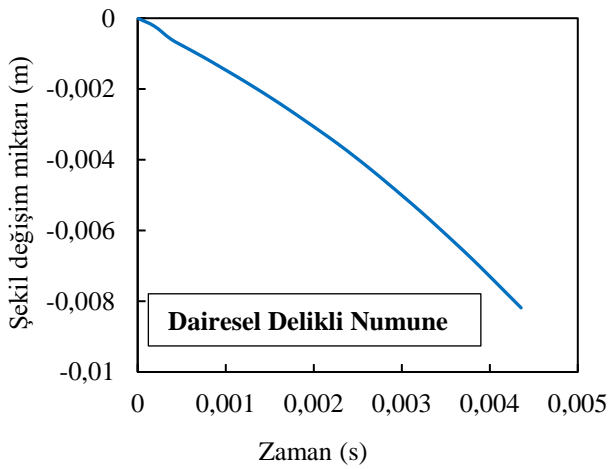
Şekil 15. Deliksiz numunelere ait von Mises gerilme dağılımı ($t=0.003787$ s).



Şekil 16. Deliksiz numunelere ait von Mises gerilme dağılımı ($t=0.007765$ s).

Dairesel delikli ve deliksiz numunelerde vurucu ucunun çarpması ile birlikte ortaya çıkan von Mises gerilme dağılımları sunulmuştur (Şekil 11-16). Grafikler incelendiğinde ortasında dairesel

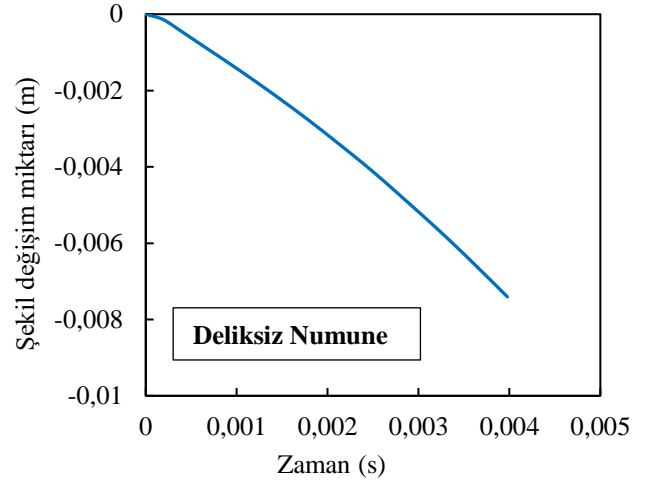
delik bulunan numunelerin delik çevresindeki gerilme dağılımı, temas anı başlangıç ($t=0$ s) kabul edilmek şartıyla $t= 0.003787$ s'de maksimum değere ulaşmıştır. (398.8 MPa) Deliksiz numuneler için bu değer 387.1 MPa olarak ölçülmüştür. Çarpma esnasında numunelerin vurucu doğrultusundaki zamana bağlı şekil değişim miktarları grafikler halinde Şekil 17'de ve Şekil 18'de verilmiştir. Deliksiz numunelerin vurucu doğrultusundaki maksimum şekil değişim miktarı 7.40 mm olarak ölçülürken, ortasında dairesel delik bulunan numunelerde bu değer 8.18 mm olarak belirlenmiştir.



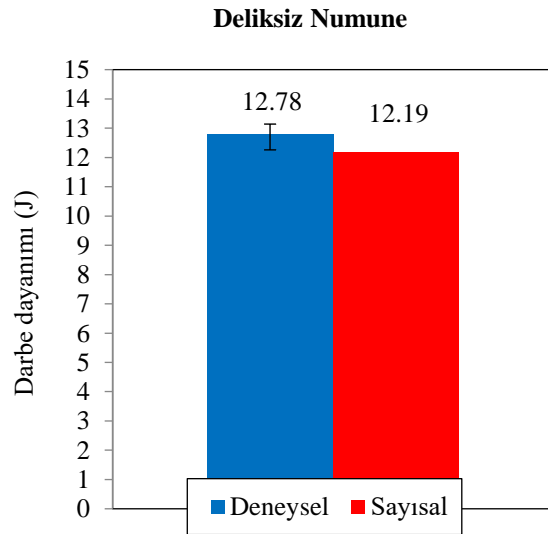
Şekil 17. Numunenin vurucu doğrultusundaki şekil değişim miktarı – zaman grafiği.

Deliksiz ve ortasında dairesel delik bulunan numunelere ait deneysel çalışma verileri ile sayısal analiz sonucunda elde edilen veriler arasında kıyaslama yapıldığında; aralarında çok küçük hata payları bulunduğu Şekil 19'da ve Şekil 20'de gözlemlenmiştir. Grafiklerde, numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen darbe dayanımı sonuçlarının aralığı ve ortalaması gösterilmiştir. Delik geometrilerinin darbe dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla farklı delik geometrilerine sahip numunelerin darbe dayanımları karşılaştırılmıştır (Şekil 21). İncelemede, en düşük darbe dayanımı dairesel delikli numunelerde (6.84 J) görülürken, üçgen delikli numunelerin darbe dirençleri en yüksek (9.71 J) olarak gözlemlenmiştir. AA7075-T651 alüminyum ve St37 çelik malzemeli numunelerin

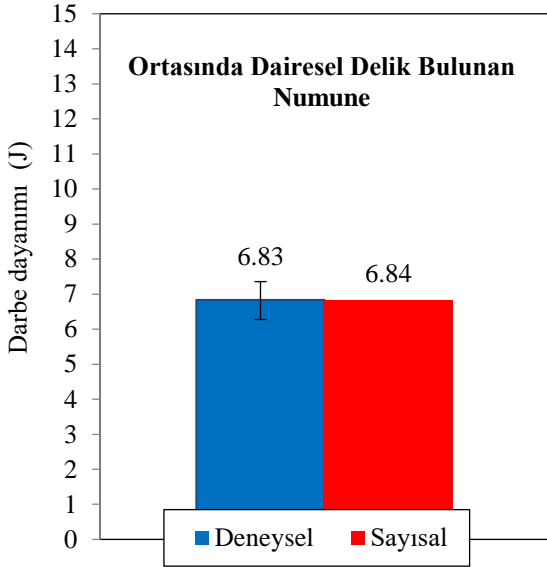
darbe dayanımları, dairesel delikli ve deliksiz modeller için değerlendirilmiştir (Şekil 22). Grafik incelendiğinde her iki model için de St37 çelik numunelerinin AA7075-T651 alüminyum numunelere göre üstünlüğü net olarak gözlemlenmiştir.



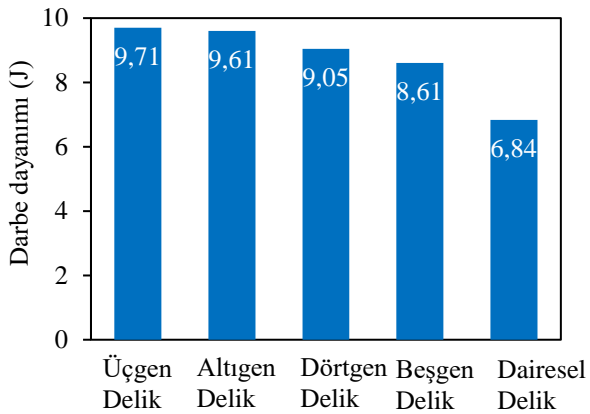
Şekil 18. Numunenin vurucu doğrultusundaki şekil değişim miktarı – zaman grafiği.



Şekil 19. Deliksiz numunelerin deneysel ve sayısal olarak darbe dayanımlarının karşılaştırılması.



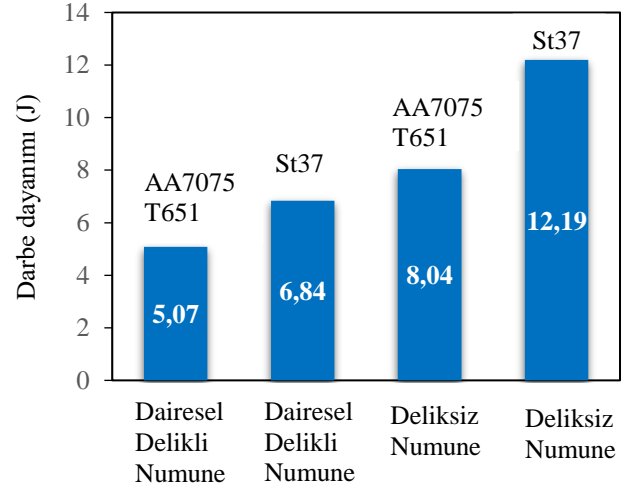
Şekil 20. Ortasında dairesel delik bulunan numunelerin deneysel ve sayısal olarak darbe dayanımlarının karşılaştırılması.



Şekil 21. Delik geometrilerine göre darbe dayanımlarının karşılaştırılması.

Numunelerin darbeye karşı dirençleri göz önüne alındığında; deliksiz numunelerin, ortasında dairesel delik bulunan numunelere karşı üstünlüğü net bir şekilde gözlemlenmektedir. Numune bünyesinde açılan 9 mm çapındaki dairesel deliğin darbe direncini %46.53 düşürdüğü tespit edilmiştir. Bu durum; kullanılan malzemelerin zamanla çalışma şartları da göz önüne alınarak çatlak, çentik ya da delik gibi sürekliliği bozan etkenlerin malzemelere ait darbe dirençleri üzerinde büyük etkilerinin olduğunu ve önlemler alınmaması durumunda

ciddi sonuçlar doğuracağını göstermektedir. Çentik geometrisi de ayrıca darbe enerjisini etkileyen parametredir. Gaith ve Khan (2013) U-çentikli numunelerin kırılma enerjilerinin V-çentikli numunelerden % 15.5 daha fazla olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 22. St37 Çelik - AA7075-T651 Alüminyum numunelerine ait darbe dayanımlarının karşılaştırılması

Sonuçlar değerlendirildiğinde, deneysel çalışmalar ile sayısal analiz sonuçlarının çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ghaith (2009) izotropik malzeme için darbe testinde deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki farkın % 5'i geçmediğini göstermiştir. Bu çalışmada, maksimum fark % 4.62'dir. Bu sayede sonlu elemanlar metodunun önemi bir kez daha ortaya konulmuş olup, karmaşık ve farklı geometrilere sahip numuneler için deneylere gerek kalmadan istenilen analizlerin bu metot ile yapılabileceği gözlemlenmiştir. Çalışma kompozit malzemeler için geliştirilebilir. Ancak kompozit malzemeler için sonlu elemanlar metodu ile darbe analizi yapılırken, bu malzemeler için uygun hasar parametresi kullanılmasına ve malzeme tipi seçilmesine dikkat edilmelidir. Zira ortotropik malzemelerin hasarı, yapısındaki tabakaları oluşturan fiber ve matris nedeniyle çok daha karmaşıktır ve özel parametreler gerektirir.

Kaynaklar

- Ali, M.B., Abdullah, S., Nuawi, M.Z. ve Ariffin, A.K., (2011). Test simulation using finite element method, IOP Conference Series, *Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 17,1.
- Altenhof, W., Raczy, A., Laframboise, M., Loscher, J. ve Alpas, A., (2004). Numerical simulation of AM50A magnesium alloy under large deformation, *International Journal of Impact Engineering*, 30(2), 117-142.
- Ansari, M. M. Ve Chakrabarti, A., (2016). Impact behavior of FRP composite plate under low to hyper velocity impact, *Composites Part B*, 95, 462-474.
- Banerjee, A., Dhar, S., Acharyya, S., Datta, D., ve Nayak, N. (2015). Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel. *Materials Science and Engineering: A*, 640, 200-209.
- Buzyurkin, A. E., Gladky, I. L., ve Kraus, E. I., (2015). Determination and verification of Johnson–Cook model parameters at high-speed deformation of titanium alloys, *Aerospace science and technology*, 45, 121-127.
- Ceylan, İ., (2008). Metallerin plastik şekillendirilmesinde kullanılan malzeme modellerinin sonlu elemanlar ile analizi, *Yüksek lisans tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ghaith, F. A. (2010). Nonlinear finite element modeling of charpy impact test, *Advanced materials research*, Trans Tech Publications, 83, 182-189.
- Ghaith, Fadi. ve A. Khan., (2013). Three dimensional nonlinear finite element modeling of charpy impact test, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, IAEME Publication, 4(4), 377-386.
- Jeong, D. Y., Yu, H., Gordon, J. E. ve Tang, Y. H., (2008). Finite element analysis of un notched charpy impact tests, *Proceedings of the Materials Science and Technology 2008 Conference and Exhibition*.
- Kılıçaslan, C. ve 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*, 53, 632, 40-48.
- Kim, J. B., Shin, H., ve Yoo, Y. H., (2015). A calibration of the Wierzbicki-Xue damage model using charpy test results, *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences Publishing, 26.
- Kumar, M., Devaraj, M. R. ve LakshmiNarayana, H., (2012). Finite element modelling for numerical simulation of charpy impact test on materials, *International Conference on Challenges and Opportunities in Mechanical Engineering*, Industrial Engineering and Management Studies.
- Liu, C., Zhang, Y. X., ve Li, J., (2017). Impact responses of sandwich panels with fibre metal laminate skins and aluminum foam core. *Composite Structures*, 182, 183-190.
- Madhusudhan, D., Chand, S., Ganesh, S., ve Saibhargavi, U., (2018). Modeling and simulation of charpy impact test of maraging steel 300 using Abaqus, IOP Conference Series, *Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 330,1.
- Majzoobi, G. H., Morshedi, H. ve Farhadi, K., (2018). The effect of aluminum and titanium sequence on ballistic limit of bi-metal 2/1 FMLs, *Thin-Walled Structures*, 122, 1-7.
- Ozturk, G., (2010). Numerical and experimental investigation of perforation of ST-37 steel plates by oblique impact, *Master Thesis*, Mechanical Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara.
- Puech, L. Ramakrishnan, K. R., Le Moigne, N., Corn, S., Slangen, P. R., Le Duc, A., Boudhani, H. ve Bergeret, A., (2018). Investigating the impact behaviour of short hemp fibres reinforced polypropylene bio composites through high speed imaging and finite element modelling. *Composites Part A, Applied Science and Manufacturing*, 109, 428-439.
- Santiago, R. C., Cantwell, W. J., Jones, N., ve Alves, M., (2018). The modelling of impact loading on thermoplastic fibre-metal laminates, *Composite Structures*, 189, 228-238.

- Serizawa, H., WU, Z. ve Murakawa, H., (2001). Computational analysis of charpy impact tests using interface elements (Mechanics, Strength and Structure Design), *Transactions of JWRI*, 30(2), 97-102.
- Trajkovski, J., Kunc, R., Pepel, V., ve Prebil, I., (2015). Flow and fracture behavior of high-strength armor steel PROTAC 500, *Materials & Design*, 66, 37-45.
- Wang, K., (2016). Calibration of the Johnson-Cook failure parameters as the chip separation criterion in the modelling of the orthogonal metal cutting process, *Ph. D. Thesis*, McMaster University, Kanada.
- Wang, H., Ramakrishnan, K. R., ve Shankar, K., (2016). Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores, *Materials and Design*, 99, 68-82.
- Zmindak, M., Pelagić, Z., Pastorek, P., Močilan, M. ve Vybošťok, M., (2016). Finite element modelling of high velocity impact on plate structures. *Procedia Engineering*, 136, 162-168.
- Flores-Johnson, E. A., Shen, L., Guiamatsia, I., ve Nguyen, G. D., (2014). Numerical investigation of the impact behaviour of bioinspired nacre-like aluminium composite plates. *Composites Science and Technology*, 96, 13-22.

Experimental and numerical analysis of Charpy impact test

Extended abstract

In this study, impact absorb energy of St37 Steel and AA7075-T651 aluminum determined by applying Charpy impact test, the specimen models that having different hole geometry (triangle, quadrilateral, pentagon, hexagon and circular) at the center, and without a hole were used experimentally and numerically. The energy damping mechanism was investigated by both experimental and numerical methods. As a results of study, when impact absorb energy of specimens were compared, good agreement was observed between numerical and experimental methods.

In experimental procedure, specimens were prepared in sizes 50x20x2 mm also were drilled with a diameter of 9 mm to examine the effect of circular hole. Tests were implemented three times for each of specimens in universal impact test device that capacity was 49.05 J and weigh 6.78 kg.

In numerical procedure ANSYS and LS-DYNA programs were used respectively as preprocessor and solver. In impact problems, especially temperature effect, strain rate effect and strain hardening are quite important. To define these effects into program, Johnson-Cook plastic material model and Johnson-Cook damage criteria which were presented between Tables 2 and 5. Mat 15 (Johnson- Cook) material model was preferred for St37 steel and AA7075-T651 aluminum specimens. Similarly Mat 20 (Rigid) material models selected for striker and supports. Furthermore, striker contact surface was modelled as three dimension in SolidWorks software than imported to ANSYS packet program and striker is modelled as a rigid body. Displacement of the striker is constrained to move in vertical direction. The initial velocity of striker is calculated 3.836 m/s similar as instrument charpy impact machine.

In addition to these parameters carefully studied in the study, the mechanical properties of the material, boundary and loading conditions are also other factors that need to be defined correctly. Suitable impact surface model, finite element mesh density and contact parameter should be determined. Then, numerical solutions must be done for the real problem.

There are 57626 nodes and 47528 elements in the finite element mesh structures for perforated models. Similarly, 39.334 nodes and 33.000 elements for models that having without a hole The modeling process take place after defined that contact parameter between striker, specimen and support models and supports are constrained to all directions as both displacement and rotate.

Impact absorb energy results compared as experimental and numerical besides kinetic energy-time graph were evaluated between specimen models that having circular hole at the center and without a hole. According to results, very little margin of error was observed between experimental and numerical results.

Considering the resistance of specimens against to impact, specimen that without hole more superior than specimen models that having different hole geometry at the center. Similarly, when compared between specimen models that having different hole geometry at the center, triangular perforated specimens are better than other samples. According to results, when center of specimen was drilled with circular hole 9 mm in diameter, impact resistance decreased 46.53 %. Factors such as crack, notch and hole are very important for impact absorb energy. Therefore, unless precautions are taken, it is clear that would have serious consequences.

The results showed that complex and different specimens can be analyzed with finite element method without the need of experiments. Study should be improved for composite materials with appropriate damage criteria. In the future work, it can be focused on this problem.

Keywords: St37, AA7075-T651 aluminum, LS-DYNA, Charpy Impact Test, Johnson-Cook, ANSYS