8. ULUSAL HAVACILIK VE UZAY KONFERANSI **UHUK-2020-077**
9-11 Eylül 2020, Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara

ÖKZETİK DOLGULU ÇARPIŞMA TÜPLERİNİN DİNAMİK ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDA DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Fatih USTA[1]
İstanbul Teknik Üniversitesi
Uçak Mühendisliği, İstanbul

Halit S. TÜRKMEN[2]
İstanbul Teknik Üniversitesi
Uçak Mühendisliği, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada re-entrant latis yapılı ökzetik (negatif Poisson oranlı) malzemelerin ince cidarlı metal tüpler içinde dinamik çarpma davranışına etkileri incelenmiştir. Ökzetik malzemeler çarpışma tüplerinde dolgu malzemesi olarak tasarlanmış ve söz konusu yapıların çarpma yükleri altındaki davranışları araştırılmıştır. Silindirik metal tüpler AL6063 alaşımlı profillerden elde edilmiştir. Re-entrant latis yapılı ökzetik dolgu yapısı 3B baskı cihazı cihazı ile üretilmiştir. Çarpışma tüpleri ökzetik dolgu malzemeli olarak imal edilmiş ve dinamik çarpma testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde ökzetik dolu, metal tüp ve ökzetik dolgulu metal tüp olmak üzere üç farklı durum için ayrı ayrı üçer adet tekrarlı test yapılmıştır. Sonlu eleman analizleri LS-DYNA yazılımı ile yapılmıştır. Sonlu eleman analiz sonuçları deney sonuçları ilerek karşılaştırılarak doğrulamaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar pik kuvveti, enerji absorbe etme kapasitesi, ortalama çarpma yükü ve çarpma yükü verimi paramaterelerine göre karşılaştırarak yapıların mekanik performansları ortaya konulmuştur. Ökzetik dolgunun dinamik yükler altında çarpışma tüplerinin dayanımını ve enerji absorbe etme kapasitesini artırdığı görülmüştür.

GİRİŞ

Her yıl gerçekleşen trafik kazalarında yüz binlerce insan hayatını kaybederken, milyonlarca insan da yaralanarak zarar görmektedir. Gerçekleşen kazalarda yolcu ve sürücülerin karşılaşacağı zararları azaltmak, araçların çarpışma dayanımına bağlıdır. Araçların kaza durumunda dayanımını artırmak için çeşitli emniyet elemanları kullanılmaktadır. Çarpışma kutuları, araçlarda kaza vb. çarpma olaylarına karşı sürücü ve yolcuların zarar görmesini önlemek amacıyla kullanılan emniyet elemanlarından biridir. Kazalar genellikle araçların ön kısımlarına zarar verdiği için, çarpışma kutuları da sıklıkla ön kısımlarda kullanılır. Ayrıca yandan çarpmalara karşı, araçların yan taraflarına da çarpışma kutuları yerleştirilebilir.

Çarpışma kutuları ince cidarlı yapılardır. Çarpışma kutusunun tamamen dolu olarak üretilmemesinin birkaç nedeni vardır. Bunlardan ilki aracın ağırlığını artıracak olmasıdır. İkincisi ise çarpma anında ortaya çıkan pik kuvveti değerinin mümkün olduğunca düşük tutulmaya çalışılmasıdır. Cidar kalınlığı ne kadar düşük olursa çarpmanın etkisiyle deformasyona maruz kalan yapının tepki kuvveti de o kadar düşürülmüş olur. Aksi durumda yüksek tepki kuvvetleri ortaya çıkar ve atalet kuvvetlerine neden olur. Atalet yükleri yolcunun savrulmasına ve göreceği zararın artmasına neden olur. Bu nedenle pik kuvveti değerinin düşük olması çarpışma kutularının en önemli tasarım kriterlerinden birisidir.

[1] Araştırma görevlisi, Uçak Müh. Böl., E-posta: ustaf@itu.edu.tr
[2] Prof. Dr., Uçak Müh. Böl., E-posta: halit@itu.edu.tr

Diğer önemli tasarım kriteri de çarpışma kutusunun enerji soğurma kapasitesinin yüksek olmasıdır. Çarpmanın ortaya çıkardığı kinetik enerjinin bir kısmı aracın ezilmesi sırasında yapısal elemanları tarafından soğurulur. Çarpışma kutusunun yüksek enerji soğurabilmesi, diğer yapısal elemanlarının ve yolcuların maruz kalacağı çarpma enerjisinin düşürülmesini sağlar. Ancak pik kuvvetinin düşürülmesinin ve enerji soğurma kapasitesinin artırılmasının aynı anda sağlanması mümkün değildir. İşte bu yüzden literatürde en ideal çarpışma kutularının tasarımını elde etmek için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda çarpışma kutularının geometrik özellikleri, malzeme özellikleri, çarpışma hızı, iç yapısının dolgu ile doldurulması vb. birçok parametre incelenmiştir.

Ezilme kutularının geometrilerinin incelendiği çalışmalara bakıldığında, genellikle, uzunluk, en, kalınlık, global narinlik, tetikleme etkileri, geometrik kusurlar ve kesit geometrileri (dairesel, kare, dikdörtgen, altıgen, üçgen, piramit, konik, vs.) değiştirilerek parametrik çalışmalar yapılmıştır (Andrei, 2013; Yamashita vd., 2003; Zarei vd., 2008). Usta ve Türkmen kare kesitten dairesel kesite doğru kenar sayısını artırarak çeşitli çokgen geometrilerin çarpma davranışını incelemiş ve dairesel kesite doğru gidildikçe çarpma dayanımının nasıl değiştiğini açıklamıştır (Usta ve Türkmen, 2017). Doldurulmuş ve boş haldeki çoklu tüpler (Hanssen vd. 2000; Chen, 2001), çok hücreli (bölmeli) tüpler (Chen ve Nardhi, 2000; Kim, 2002), farklı kesitlerde petek dokulu tüpler (Al Antali, 2017), farklı uzunluklardaki tüpler (Jensen vd., 2004), farklı cidar kalınlıklarında ve kesit geometrilerindeki tüplerin (Mamalis vd., 1989; Hanssen vd., 2000) incelendiği görülmektedir. Dairesel kesitli tüplerin genişletilmesi (Ahmad vd., 2010) ve takviyeli olarak kullanımı (Hou vd., 2011) ile daha fazla enerji soğurulması sağlandığı gösterilmiştir.

İdeal tasarımların elde edilmesi birçok yöntem denenmektedir. Bunlardan birisi de ürünlerin içine daha düşük yoğunluklu dolgu malzemelerinin yerleştirilmesidir. Dolgular genellikle köpük (Googarchin vd., 2019) veya açık hücreli bal peteği (Usta ve Türkmen, 2019) yapılar olarak tercih edilmektedir. Dolgular Poisson oranı değerine göre ökzetik ve ökzetik olmayan dolgular olarak sınıflandırılmaktadır. Bu çalışmada literatürde daha önce yer almayan dairesel kesitli ince cidarlı tüplerde kare prizma şeklinde ökzetik dolgu kullanımın dinamik çarpma yükü altında davranışı incelenmiştir. Kütle düşürme testlerinin yanı sıra dinamik çarpma analizleri gerçekleştirilmiş ve sonlu elemanlar modelleri doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar çeşitli çarpma dayanımı kriterleri açısından irdelenerek boş tüp, sadece ökzetik dolgu ve ökzetik dolgulu tüp modelleri karşılaştırılmıştır.

UYGULAMALAR

1. Numunelerin üretimi

Çarpışma kutularının imalatı için dairesel kesitli AL6063 metal borular temin edilmiştir. Çarpışma kutularının imalatı için borular belirlenen tüp boylarına uygun olarak kesilmiştir. Kesim işlemi sırasında tüp boylarının yanı sıra tüpün yerleştirileceği kanalların derinliği de dikkate alınmıştır.

Latis yapılarına göre ökzetik malzemeler re-entrant (Usta vd., 2019 ve 2020), ok uçlu (Mohsenizadeh vd., 2018), kiral (Scarpa vd., 2007), rombik (Grima vd., 2008) vb. şekilde sınıflandırılabilir. Re-entran latis yapılı ökzetik dolgulu ve dolgusuz tüp testleri için imal ettirilen tüplerin çapı 70 mm, kalınlığı 2 mm ve boyu 150 mm olarak belirlenmiştir. 154 mm boyunda kesilen parçalar, metal tablaların üzerinde CNC ile açılan kanallara yerleştirilerek yapıştırılmıştır. Tüpün 4 mm uzunluğu kanal içinde kalmaktadır. Epoksi ile yapıştırılan tüplerin, bu sayede çarpma deneyleri sırasında çarpma/ezilme yükleri altında kayması engellenerek tabla üzerinde sabitlenmiştir.

ABSplus plastik ökzetik dolgular ise 3D printer kullanılarak üretilmiştir. Boyutların belirlenmesi için CATIA programı kullanılarak dört farklı dolgu yapısının tasarımı yapılıp LS-DYNA programı kullanılarak çarpma analizleri gerçekleştirilmiştir. Dairesel tüp içine yerleştirilecek dolgunun uzunluğu tüple aynıdır. Kare kesitli dolgunun kesitine ait kenar uzunluğu tüpün içine yerleşecek şekilde 45 mm olarak hesaplanmıştır.

2. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi

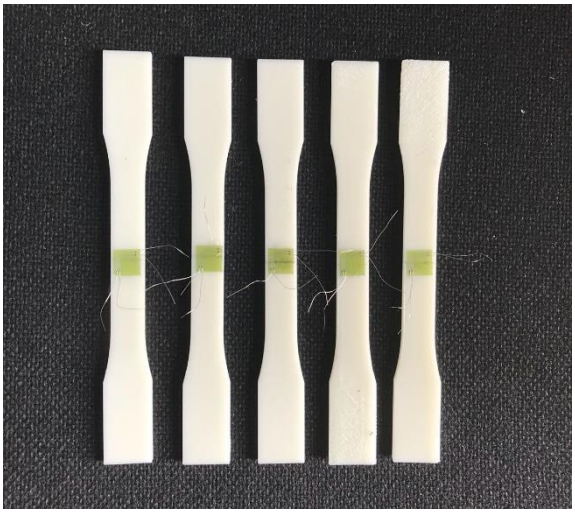
2.1. AL6063 malzeme özelliklerinin belirlenmesi

Çarpışma kutularında AL6063 serisi alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılacak analiz çalışmalarında malzeme özelliklerinin belirlenmesi gereklidir. Bu amaçla malzeme testleri gerçekleştirilmiştir. Bunun için ASTM E8/E8M test standardına göre altı adet test numunesi CNC kullanılarak kesilmiştir (Şekil 1). Test numunelerinin her birinin üzerine Poisson oranının belirlenmesi için iki eksenli gerinim ölçer (strain gauge) yapıştırılmıştır. Daha sonra MTS test makinesi kullanılarak çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Deneyde eksenel doğrultuda uzama değerleri hem bir ekstensometre hem de yapıştırılan gerinim ölçer kullanılarak ölçülmüştür.

Şekil 1: AL6063 çekme testi numunelerinin deney öncesi ve sonrası görünümleri.

2.2. ABSplus plastik malzeme özelliklerinin belirlenmesi

Çarpışma kutularında dolgu olarak kullanılan ökzetik yapılar ABSplus plastik malzemeden üretilmiştir. ABSplus malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla test numuneleri üretilmiştir. Test numuneleri ASTM D638-08'den alınan boyutlar dikkate alınarak ve CATIA programı kullanılarak 3D (üç boyutlu) olarak modellenmiştir. ABSplus malzemesinin mekanik özelliklerini tayin etme amaçlı beş adet çekme numunesi ASTM standardına göre 3D yazıcı kullanılarak üretilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2: 3D yazıcı kullanılarak imal edilen numuneler.

3. Çarpışma kutularının dinamik testleri ve sonlu elemanlar analizleri

3 adet sadece ezilme kutusu, 3 adet sadece dolgu ve 3 adet ökzetik dolgulu ezilme tüpü test edilmiştir. Dinamik testler TÜBİTAK MAM laboratuvarında yer alan Şekil 3'de görülen INSTRON 8150 Drop Test Cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Söz konusu cihaz 1130,8 kg kütle ve 7 m/s çarpma hızı kapasitesine sahiptir. Testlerde kütle 32 cm yükseklikten serbest bırakılmıştır. Böylece tüplerin dinamik testleri 2,5 m/s çarpma hızında gerçekleştirilmiştir. Bu da 3,5 kJ çarpma enerjisi değerine karşı gelmektedir.

Şekil 3: INSTRON 8150 Drop Test Cihazı

Çarpışma kutuları için isimlendirilmelerinde kullanılan kısaltmalar Tablo 1'de açıklanmıştır. Ayrıca numune numarası N1, N2, ... şeklinde kısaltmanın sonunda belirtilmiştir.

Tablo 1: Çarpışma kutuları için kullanılan kısaltmalar

Kısaltma	Açıklama
T_D	Boş tüp dinamik test numunesi
DT_D	Ökzetik dolgulu tüp dinamik test numunesi
ÖD_D	Ökzetik dolgu dinamik test numunesi

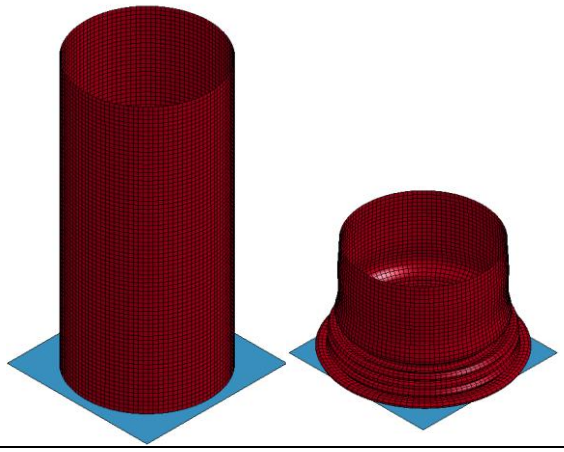
Dinamik testlerde kullanılan çarpan cismin kütlesi değiştirilmediği için her deneyde 1130,8 kg ağırlığında kütle numuneler üzerine serbest bırakılmıştır. Sadece dolgu malzemesinin deneylerinde bu ağırlık yakın mesafeden dahi bırakılsa dolgu için yüksek çarpma enerjisi anlamına gelecektir. Söz konusu testlerde iki adet geometrisi farklı dolgunun karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. ÖD_D_N1'in kalınlığı 0,5 mm artırılarak, ÖD_D_N2 elde edilmiş ve her iki numune aynı koşullarda çarpma testine tabi tutulmuştur. İki numunede testler sonrasında tamamen parçalanmıştır.

Boş tüplerin dinamik testleri 2,5 m/s çarpma hızında gerçekleştirilmiştir. 3,5 kJ çarpma enerjisi tüpler tarafından soğurulmuştur. Söz konusu çarpma yükleri altında T_D_N1, T_D_N2 ve T_D_N3'ün kalan son boyları 51,5 mm, 50 mm ve 51 mm olarak ölçülmüştür. Yani tüpler çarpma yönünde sırasıyla 98,5 mm, 100 mm ve 99 mm deformasyona maruz kalmıştır. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen deformasyon değeri ise 96 mm'dir (Şekil 4).

(a)

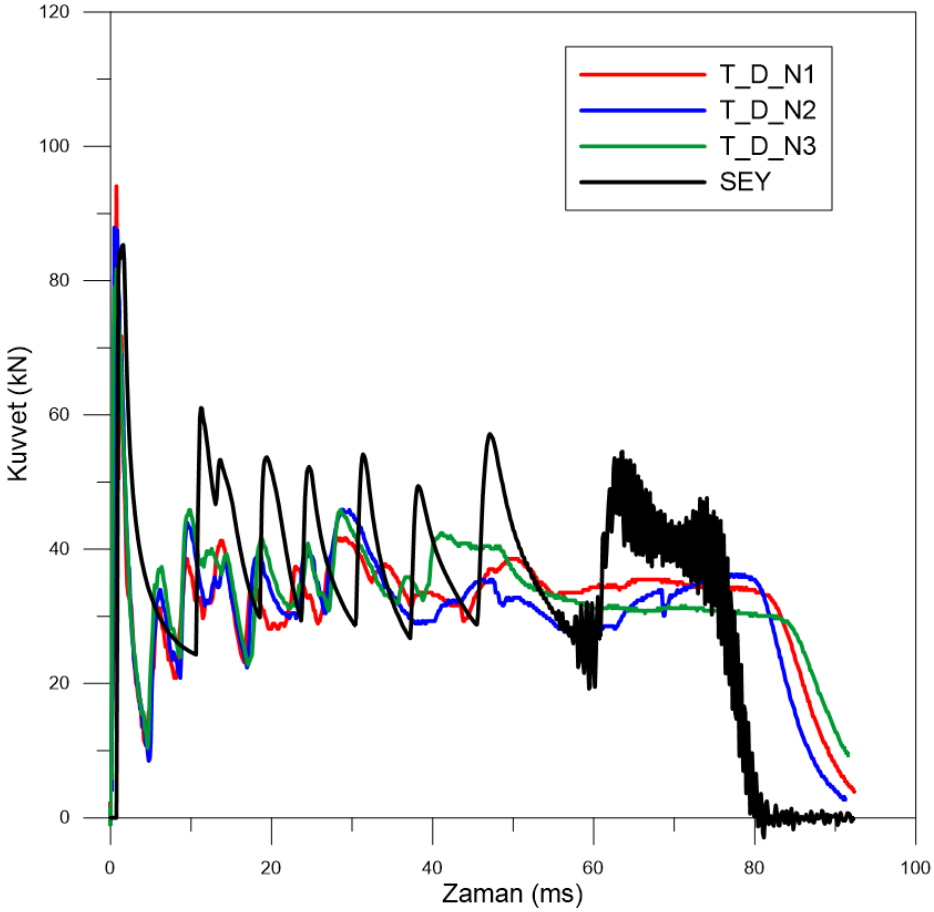
(b)

(c)



Şekil 4: a) T_D_N1, T_D_N2 ve T_D_N3 deney numunleri, (b) deney sonrası deformasyon şekilleri, (c) sonlu elemanlar modeli ve analiz sonrası deformasyon şekli.

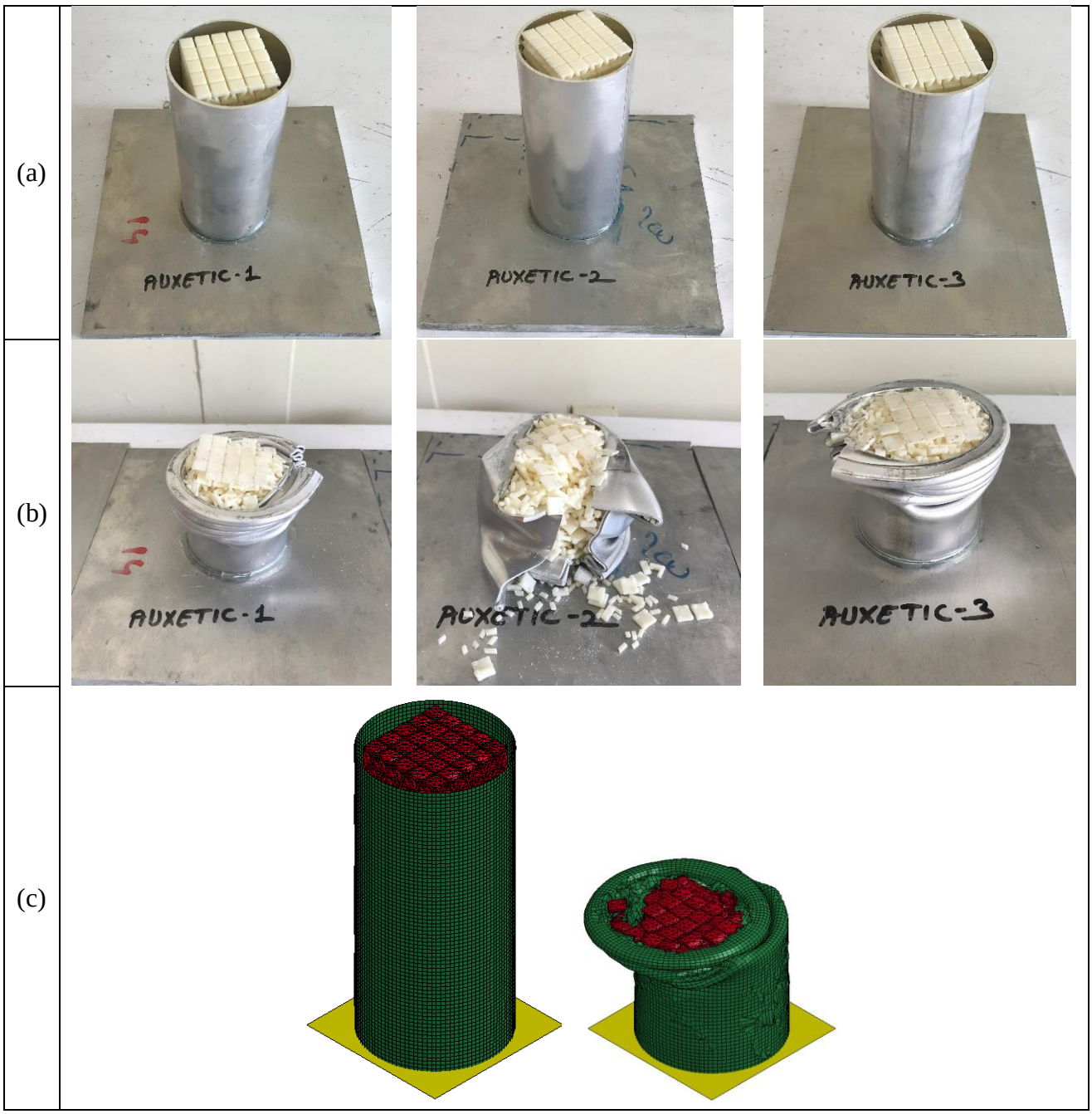
Şekil 5'te T_D_N1, T_D_N2 ve T_D_N3'ün deney sonuçları ve sayısal analizinden elde edilen kuvvet değerlerinin zamanla değişimi yer almaktadır. Başlangıç anında oluşan anlık pik kuvvetinin yanı sıra diğer kuvvet değerleri de karşılaştırıldığında deney sonuçları örtüşmektedir. Sonlu elemanlar analizinin sonucu incelendiğinde ise grafikte de görüldüğü üzere sonuçlar birbirine yakındır.



Şekil 5: T_D_N1, T_D_N2 ve T_D_N3 Test numunelerinin dinamik çarpma testlerinden ve sonlu elemanlar analizinden (SEA) elde edilen kuvvet-deformasyon eğrilerinin karşılaştırılması**.**

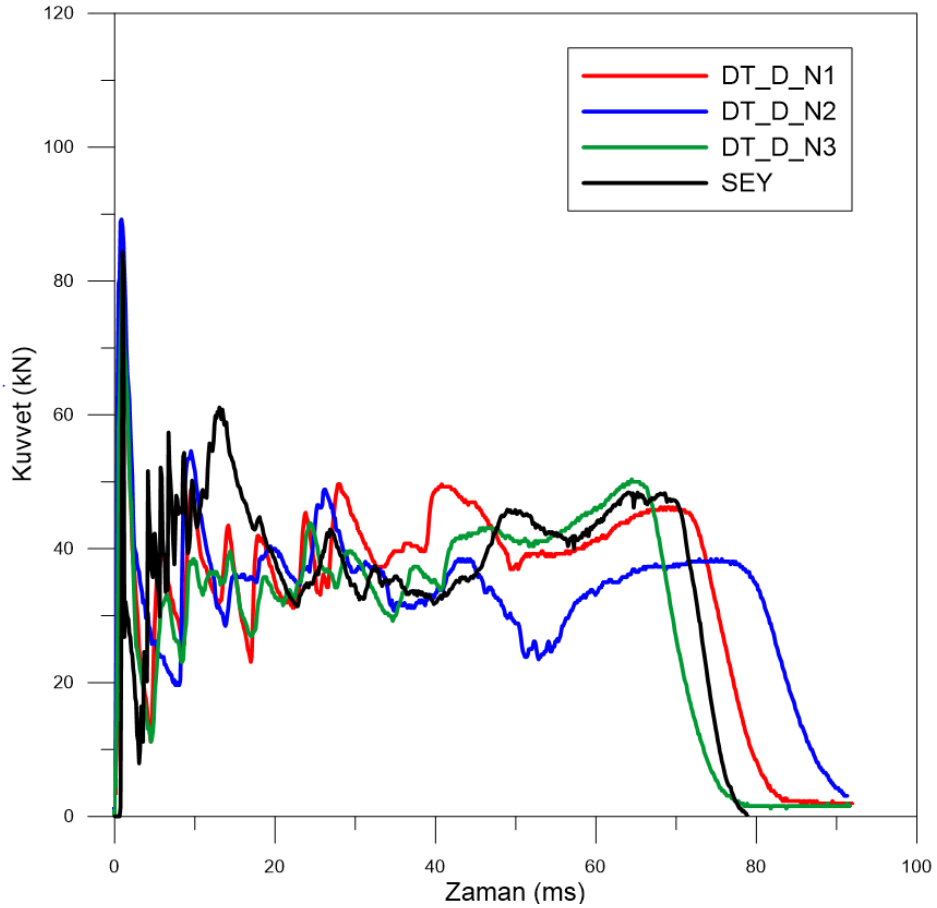
Sadece ökzetik dolgu olan ÖD_D_N1 ve ÖD_D_N2'nin sonuçları karşılaştırıldığında hücre kalınlığı fazla olan numunede pik kuvveti 5,5 kN, düşük olanda 4,5 kN olarak elde edilmiştir. Her iki numunede tamamen parçalandığı için düşük tepki kuvveti ortaya çıkaran numune yani ÖD_D_N1 daha avantajlıdır. Daha sonra avantajlı olan dolgu modelinin LS-DYNA programı kullanılarak dinamik çarpma analizi yapılıp sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde dolgu yapısının 4,43 kN tepki kuvvetine neden olduğu ve deneyde elde edilen 4,5 kN tepki kuvveti ile çok yakın değerler olduğu görülmüştür.

Ökzetik dolgulu tüplerin dinamik testleri de 2,5 m/s çarpma hızı ve 3,5 kJ çarpma kinetik enerjisi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.a ve b'de Model DT_D_N1, DT_D_N2 ve DT_D_N3 çarpma öncesi görünümü ve çarpma sonrası deforme olan görünümleri yer almaktadır. Şekil 6.c'de sonlu elemanlar modeli ve analiz sonucu yer almaktadır. Deneylerde elde edilen deformasyon uzunlukları sırasıyla 93 mm, 96 mm ve 88 mm olarak ölçülmüştür. Analiz sonucunda elde edilen deformasyon ise 86 mm'dir.



Şekil 6: (a) DT_D_N1, DT_D_N2 ve DT_D_N3 deney numuneleri, (b) Deney sonrası deformasyon şekilleri, (c) Sonlu elemanlar modeli ve analiz sonrası deformasyon şekli.

Şekil 7'de ise deney ve analizlerden elde edilen kuvvet değerlerinin zamanla değişimi yer almaktadır. Görüldüğü üzere deney ve analiz sonuçları birbiriyle uyumludur.



Şekil 7: DT_D_N1, DT_D_N2 ve DT_D_N3 Test numunelerinin dinamik çarpma testlerinden ve sonlu elemanlar analizinden (SEA) elde edilen kuvvet-deformasyon eğrilerinin karşılaştırılması.

4. Sonuçların Değerlendirilmesi

Dinamik çarpma testlerinin sonuçlarını değerlendirmek için literatürde kullanılan bazı formüllerden yararlanılmıştır. Bu formüller çarpışma kutusunun ağırlığı, pik kuvveti, ezilme miktarı, soğurulan enerji gibi özelliklerini karşılaştırmak için uygundur. Örneğin çarpışma kutusunun soğurduğu enerjinin tüpün kütlesine oranı "Specific Energy Absorbtion (SEA)" değerini elde etmemizi sağlar.

$$SEA = \frac{soğurulan\ enerji}{kütle}$$

Pik kuvveti ise deformasyon süresince çarpışma kutusundan elde edilen maksimum kuvvet değeridir. Bu kuvvet değeri çarpışmanın ilk anlarında görülmektedir.

$$Pik\ Kuvveti = maksimum\ kuvvet$$

Bir diğer karşılaştırma parametresi ise "Mean Crash Force (MCF)" yani ortalama çarpışma kuvvetidir. Bu değer ise soğurulan enerjinin deformasyona oranı ile elde edilir.

$$MCF = \frac{soğurulan\ enerji}{deformasyon}$$

Son olarak verimlilikle ilgili parametre ise ortalama pik kuvveti (MCF) değerinin pik kuvvetine oranı ile elde edilir. Verimlilik değeri çarpışma kutusunun soğurduğu enerji, deformasyon miktarı ve pik kuvveti hakkında bilgi verir.

$$CFE = \frac{MCF}{Pik\ Kuvveti}$$

Üç adet ökzetik dolgulu alüminyum tüp, üç adet sadece alüminyum tüp ve iki adet sadece ökzetik dolgunun dinamik çarpma testlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak SEA, MCF ve CFE değerleri hesaplanmış ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Çarpışma kutuları test ve analiz sonuçları.

	Pik Kuvveti (kN)	Soğurulan enerji (kJ)	Deformasyon (mm)	Kütle (kg)	SEA (kJ/kg)	MCF (kN)	CFE
T_D_N1	94,00	3,50	98,50	0,18	19,65	35,53	0,38
T_D_N2	88,00	3,50	100,00	0,18	19,65	35,00	0,39
T_D_N3	86,00	3,50	99,00	0,18	19,65	35,35	0,41
T_D (SEY)	85,31	3,50	92,41	0,18	19,44	37,88	0,44
DT_D_N1	82,00	3,50	93,00	0,27	12,81	37,63	0,46
DT_D_N2	92,00	3,50	96,00	0,27	12,81	36,46	0,40
DT_D_N3	85,00	3,50	88,00	0,27	12,81	39,77	0,47
DT_D (SEY)	88,57	3,50	87,30	0,27	12,96	40,09	0,45
ÖD_D_N1	4,50	0,10	147,00	0,10	1,05	0,68	0,15
ÖD_D_N2	5,50	0,10	147,00	0,10	1,05	0,68	0,12
ÖD_D (SEY)	4,43	0,07	147,00	0,10	0,70	0,48	0,11

SEA açısından en verimli çarpışma kutuları yalnızca alüminyum tüpten oluşan T_D_N1, T_D_N2 ve T_D_N3 test numunelerinin daha verimli olduğu görülmektedir. Çarpma enerjisi olan 3,5 kJ enerjinin tamamı hem dolgulu hem dolgusuz alüminyum tüpler tarafından soğurulmaktadır. Ancak dolgulu tüp kullanmak ilave ağırlık getirdiği için doğal olarak SEA değeri azalmaktadır. Her iki modelin deformasyon miktarı ise fark etmektedir. SEA da ise deformasyon miktarının bir önemi yoktur. Verimlilik açısından MCF ve CFE parametrelerine de bakılmalıdır. Diğer yandan sadece dolgu için yapılan testlerde çarpma enerjisi ABSplus malzemenin soğurabileceği enerjinin çok üzerindedir. Sadece dolgularla yapılan testlerde ancak 0,1 kJ enerji soğurulmuştur.

MCF kriteri açısında en verimli modeller DT_D_N1, DT_D_N2 ve DT_D_N3 yani ökzetik dolgulu tüplerdir. Bu tüpler aynı çarpma enerjisinde daha az deforme olduğu için, enerji soğurma kapasitesi diğerlerinden daha fazladır. Yani diğerlerinden daha yüksek çarpma yüklerine dayanabilmektedir.

CFE kriteri çarpışma kutuları açısından en önemli dayanım kriteridir. Çünkü soğurulan enerji, deformasyon miktarı ve pik kuvveti gibi üç önemli özellik bakımından çarpışma kutularını karşılaştırma imkânı sağlar. Sonuçlar karşılaştırıldığında ise DT_D_N1, DT_D_N2 ve DT_D_N3 modellerinin en verimli modeller olduğu görülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada re-entrant latis geometrili ökzetik yapıların, çarpışma tüplerinin dayanımına ve enerji absorbe etme kapasitesine etkileri incelenmiştir. Araştırma kapsamında sadece ökzetik yapının, sadece alüminyum tüpün ve ökzetik dolgulu tüpün üçer adet tekrarlı testleri olmak üzere dokuz adet çarpma testi yapılmıştır. Sonlu elemanlar modelleri LS-DYNA yazılımında kurulmuş ve analiz sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar incelendiğinde ökzetik dolgu yapılarının çarpışma kutularının verimliliğini artırdığı görülmektedir.

Teşekkür: Bu çalışma TÜBİTAK 115M465 numaralı 1001 projesi kapmasında desteklenmektedir.

Kaynaklar

Ahmad, Z., Thambiratnam, D. ve Tan, A., 2010. *Dynamic energy absorption characteristics of foam-filled conical tubes under oblique impact loading*, International Journal of Impact Engineering, 37(5), s.475-488.

Al Antali, A., Umer, R., Zhou, J., ve Cantwell, W. J., 2017. *The energy-absorbing properties of composite tube-reinforced aluminum honeycomb,* Composite Structures, 176, s.630-639.

Chen, W., 2001. *Experimental and numerical study on bending collapse of aluminum foam-filled hat profiles*, International Journal of Solids and Structures, 38(44), s.7919-7944.

Chen, W. ve Nardhi, D., 2000. *Experimental study of crush behaviour of sheet aluminium foam-filled sections*, International Journal of Crashworthiness, 5(4), s.447-468.

Googarchin, H.S., Pasandidehpoor, M., Mahmoodi, A. ve Shojaeefard, M.H., 2019. *Energy absorption analysis for tapered multi cell tubes improved by foams: theoretical development and numerical simulation*. Composite Structtures, 207, s.213–222.

Grima, J.N., Farrugia, P.S., Gatt, R. ve Attard, D. 2008. *On the auxetic properties of rotating rhombi and parallelograms: A preliminary investigation*. Physica status solidi (b). 245, 3, s.521–529.

Hanssen, A., Hopperstad, O. ve Langseth, M., 2000. *Bending of square aluminium extrusions with aluminium foam filler*, Acta Mechanica, 142(1-4), s.13-31.

Hanssen, A.G., Langseth, M. ve Hopperstad, O.S. 2000. *Static and dynamic crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler*, International Journal of Impact Engineering, 24(4), s.347-383.

Hou, S., Han, X., Sun, G., Long, S., Li, W., Yang, X. ve Li, Q., 2011. *Multiobjective optimization for tapered circular tubes*, Thin-Walled Structures, 49(7), s.855-863.

Jensen, Ø., Langseth, M. ve Hopperstad, O., 2004. *Experimental investigations on the behaviour of short to long square aluminium tubes subjected to axial loading*, International Journal of Impact Engineering, 30(8), s.973-1003.

Mamalis, A., Manolakos, D. ve Viegelahn. G., 1989. *The axial crushing of thin PVC tubes and frusta of square cross-section*, International Journal of Impact Engineering, 8(3), s.241-264.

Mohsenizadeh, M., Gasbarri, F., Munther, M., Beheshti, A. ve Davami, K., 2018. *Additively manufactured lightweight Metamaterials for energy absorption*. Materials & Design, 139, s.521–530.

Scarpa, F., Blain, S., Lew, T., Perrott, D., Ruzzene, M., ve Yates, J. R., 2007. *Elastic buckling of hexagonal chiral cell honeycombs*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.

Usta, F., Eren, Z., Turkmen, H. S., Kazancı, Z. ve Mecitoglu, Z., 2015. *Numerical investigation of stepped concentric crash tubes subjected to axial impact: The effects of number of tubes*, 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), IEEE, s.39-43.

Usta, F. ve Türkmen, H. S., 2017. *Crash behavior of nested tube structures with various cross sections*, 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), IEEE, s.23-27.

Usta, F., Eren, Z., Kurtaran, H., Türkmen, H. S., Kazancı, Z., ve Mecitoglu, Z., 2018. *Crashworthiness Optimization of Nested and Concentric Circular Tubes Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm*, Latin American Journal of Solids and Structures, 15(5), s.1-16.

Usta, F., Ertaş, O.F., Ataalp, A., Türkmen, H.S., Kazancı, Z., Scarpa, F., 2019. *Impact behavior of triggered and non-triggered crash tubes with auxetic lattices*. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design. 2,2, s.119–127.

Usta, Fatih, and Halit S. Türkmen., 2019. *Experimental and numerical investigation of impact behavior of nested tubes with and without honeycomb filler*, Thin-Walled Structures 143: 106256.

Usta, F., Scarpa, F. ve Türkmen H.S., 2020. *Edgewise compression of novel hexagonal hierarchical and asymmetric unit cells honeycomb metamaterials*. Materials Today Communications, 101102.

Yamashita, M., Gotoh M. ve Sawairi Y., 2003. *Axial crush of hollow cylindrical structures with various polygonal cross-sections: Numerical simulation and experiment*, Journal of Materials Processing Technology, 140(1), s.59-64.

Zarei, H., Kröger, M. ve Albertsen, H., 2008. *An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes*, Composite structures, 85(3), s.245-257.