UHUK-2020-076

ÖKZETİK DOLGULU TÜPLERİN STATİK EZME YÜKÜ ALTINDA DEFORMASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Fatih USTA¹ İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği, İstanbul Halit S. TÜRKMEN² İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada re-entrant latis geometrili ökzetik (negatif Poisson oranlı) malzemelerin ince cidarlı metal tüpler içinde statik çarpma davranışı incelenmiştir. Kare kesitli ve ABSplus plastik malzemesinden üretilen ökzetik yapı, silindirik AL6063 alaşımlı metal tüplerin içinde dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Çalışma deneysel ve sayısal kısımları içermektedir. Deneysel çalışmalarda test numuneleri statik yük altında ezilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri LS-DYNA yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Her bir test numunesinin sayısal modelleri kurulmuş ve doğrulama analizleri gerçekleştirilmiştir. Deney ve analiz sonuçlarından elde edilen deformasyon şekilleri ile pik kuvveti değerleri karşılaştırılmıştır.

GİRİŞ

İnce cidarlı yapılar birim ağırlıkta yüksek enerji soğurma kapasitesi, düşük pik kuvveti ve hafiflik gibi özelliklerinden dolayı havacılık, otomotiv vb. ulaşım araçlarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Literatürde ince cidarlı yapılar üzerine kesit geometrisi, malzeme türü, konfigürasyonu vb. özellikleri değiştirilerek birçok araştırma yapıldığı görülmektedir.

Bu çalışmada hedeflenen iki önemli tasarım parametresi statik ezilme yükü altında yüksek enerji absorbe edilebilmesi ve düşük pik kuvvetine sahip olmasıdır. 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 düşürülmesini sağlamaktır. 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 olabilir. Atalet yükleri yolcu veya sürücünün savrulmasına ve bu nedenle kazanın etkilerinin artmasına neden olur. Sonuç olarak pik kuvveti değerinin düşük olması çarpışma kutularının en önemli tasarım kriterlerinden birisidir.

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

¹ Araştırma görevlisi, Uçak Müh. Böl., E-posta: ustaf@itu.edu.tr

² Prof. Dr., Uçak Müh. Böl., E-posta: halit@itu.edu.tr

elemanlarının ve yolcuların maruz kalacağı çarpma enerjisinin düşürülmesini sağlar. Ancak aynı anda pik kuvvetinin düşürülmesi ve enerji soğurma kapasitesinin artırılması birbirine zıt tasarım gereksinimleri ortaya çıkarmaktadır. En ideal ürün tasarımı her iki ihtiyaca da uygun şekilde olmalıdır. 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 ince cidarlı tüplerin belirtilen özelliklerini statik ezme yükü altında iyileştirmek için ökzetik geometrili dolgu yapıları kullanılmıştır. Ökzetik yapılar Poisson oranı negatif malzemeli yapılardır. Belirli bir yönde uygulanan kuvvet altında geleneksel malzeme davranışından farklı şekilde davranması ve bu özelliği ile yapıların mekanik performansını iyileştirmesi son zamanlarda mühendislik uygulamalarında daha çok ilgi görmesini sağlamıştır.

A. Alderson ve K. L. Alderson ökzetik ve ökzetik olmayan malzemeler üzerinde çarpma testleri yapmışlardır (Alderson ve Alderson, 2007). Söz konusu testlerde ökzetik olmayan malzemelerde çok daha fazla hasar oluştuğu gözlenmiştir. Ayrıca, hasardan etkilenen kısmın uzunluğu da ökzetik olmayan malzemede çok daha fazladır. Ökzetik malzemede hem deformasyon azdır hem de etkilenen kısım azdır.

Ökzetik malzemeler, biyomedikal, otomotiv ve savunma sanayii uygulamalarında yüksek potansiyel barındırmaktadır. 1994 yılında Love Poisson oranı negatif olan malzemeleri tanımlamıştır (Yang vd., 2004). Konu ile ilgili olarak 1987 yılında Lakes poliüretan köpük tasarlarken negatif Poisson oranını keşfetmiştir. Bu malzeme kauçuk olmayan, ökzetik veya genleşen malzeme olarak isimlendirilmiştir. Poisson oranı negatif malzemelerin keşfi, geleneksel malzemelerin sahip olduğu özelliklerinin yetmediği zamanlarda, çok farklı malzemelerin çeşitli uygulama alanlarında kullanılmasına olanak sağlamıştır. Ökzetik malzemelerin etkiyen kuvvet altında davranışları şu şekilde özetlenebilir: Eksenel yönde basma kuvveti uygulandığında, eksenel yöne dik diğer iki yönde daralırlar ve eksenel yönde çekme kuvveti uygulandığında, eksenel yöne dik diğer iki yönde genişlerler (Yang vd., 2004). Negatif Poisson oranına sahip bir malzeme üretmek için Poisson oranının büyüklük ve işareti iki faktör tarafından belirlenir: Malzemenin içsel yapısının geometrisi ve deformasyon mekanizması. Evans ve Alderson (2000) iki boyutlu bal peteği yapısındaki malzemelere çekme kuvveti uygulayarak re-entrant latis yapılıların negatif Poisson oranını açıklamıştır.

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. Bu çalışmada ise en çok karşılaşılan geometri olan re-entrant latis yapılı dolgular tercih edilmiştir. Literatürde daha önce yer almayan dairesel kesitli ince cidarlı tüplerde kare prizma şeklinde ökzetik dolgu kullanımın statik ezme yükü altında davranışı incelenmiştir. Deneysel çalışmaların yanı sıra sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve sonlu elemanlar modelleri doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar çeşitli dayanım kriterleri açısından irdelenerek ökzetik dolgulu ezilme tüpleri karşılaştırılmıştır.

UYGULAMALAR

1. Ökzetik latis şeklinin belirlenmesi

Literatürde çok çeşitli ökzetik latis geometrisi mevcuttur. Bu çalışmada yapılan araştırmalar sonucunda tüp içinde iki yönde ökzetik davranış gösteren dolgu yapısı kullanılmasına karar verilmiştir. İki yönde ökzetik davranış gösteren dolgu tasarımı için en uygun geometri re-entrant latis yapısıdır ve bu nedenle re-entrant geometrili latis yapılar tercih edilmiştir. Diğer bir avantajı ise reentrant ökzetik yapısı Şekil 1'de de görüldüğü üzere hücre parametreleri değiştirilerek ezilme yükleri altında diğer geometrilere göre daha düşük negatif Poisson oranı değerine sahip olmasıdır. Bunun yanı sıra altıgen geometrisinden dolayı literatürde yaygın olarak kullanılan balpeteği dolgularla karşılaştırmak için de uygundur.



Şekil 1: Farklı ökzetik yapıların karşılaştırılması (Elipe and Lantadar, 2012).

Şekil 2'de re-entrant ökzetik hücre (latis) parametreleri olan I, L, h, H ve θ ölçüleri ve CATIA programında tasarımı yer almaktadır. θ açısı 140 derece, I, L, h, H boyutları ise sırasıyla 6,4 mm, 5,3 mm, 2,5 mm ve 12 mm olarak belirlenmiştir.İlk olarak belirlenen boyutlarla sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Daha sonra en iyileme çalışması için tüpün boyu ile aynı boyda ve birim hücre cidar kalınlığı 1 mm olacak şekilde birim hücre sayısı değiştirilerek parametrik inceleme yapılmıştır.



Şekil 2: Reentrant latis yapısı.

Bu parametrik inceleme de dört farklı dolgu yapısının CATIA'da tasarımı yapılıp LS-DYNA programı kullanılarak çarpma analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.a'da oluşturulan katı model kullanılarak Şekil 3.b ve c'de görülen dolgu modeli oluşturulmuştur.



Şekil 3: (a) 40x40x150 Boyutlarında katı model (b) Re-entrant latis önden görünümü (c) Ökzetik dolgu tasarımı.

Birim hücre sayısı değiştirilerek elde edilen dört farklı dolgu tasarımı Şekil 4'te görülmektedir. Bu geometrilerden ilkinde ökzetik hücrenin L boyutu 10 mm, ikincisinde L boyutu 7,5 mm ve üçüncüsünde L boyutu 5 mm olarak seçilmiştir. Sonuncu geometride ise θ açısı 105 derece olarak değiştirilerek dört farklı ökzetik dolgu tasarımı elde edilmiştir. Tablo 1'de analizlerden elde edilen pik kuvvetleri ve modellerin kütleleri karşılaştırılmaktadır.



Şekil 4: Ökzetik dolgu tasarımları.

Tablo 1: Ökzetik modelleri analiz sonuçları

	Kütle (g)	Pik kuvveti (kN)
Ökzetik dolgu Model 1	99,432	6,9
Ökzetik dolgu Model 2	95,851	6,5
Ökzetik dolgu Model 3	100,248	9,6
Ökzetik dolgu Model 4	84,225	4,6

Sonrasında ise dolgu boyunun ezilme etkisi altında mekanik performansa etkisi incelenmiştir. Dolgu uzunluğunun deformasyon davranışına etkisini incelemek için dolgu boyu 1) çarpışma kutusu ile aynı 2) çarpışma kutusundan kısa 3) çarpışma kutusundan uzun olacak şekilde üç geometri tasarlanmıştır. 100 mm, 150 mm ve 200 mm uzunluklarında üç dolgunun çarpma analizleri yapılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5: 100, 150 ve 200 mm Boylarında ökzetik dolgular

Dolguların çarpma analizleri sonucu oluşan pik kuvvetleri karşılaştırıldığında her üç modelde de 4,6 kN değeri elde edilmiştir. Böylece dolgu boyunun pik kuvveti üzerinde etkisinin olmadığı görülmüştür. Tüp boyundan daha uzun dolgu kullanmak ilave hacim gerektirdiği için ve buna rağmen performansa katkısı olmadığı için dezavantajlıdır. Tüpün boyundan daha kısa dolgu modeli ise boyutundan dolayı tüpün deformasyonuna ve dayanımına yeterince katkı sağlamayacağı için en uygun dolgu boyu tüp ile aynı boyda olan 150 mm olarak belirlenmiştir.

2. Ezilme tüplerinin imalatı

Çarpışma kutularının imalatı için dairesel kesitli AL6063 malzemeli 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.

Ökzetik dolgulu ve dolgusuz tüp testleri için imal ettirilen tüplerin dış çapı 70 mm, cidar kalınlığı 2 mm ve boyu 150 mm olarak belirlenmiştir. 154 mm boyunda kesilen parçalar, alüminyum blokların üzerinde CNC ile açılan kanallara yerleştirilerek yapıştırılmıştır. Tüpün 4 mm uzunluğu kanal içinde kalmaktadır. Epoksi ve sertleştirici karışımı ile kanallara yapıştırılan tüplerin, bu sayede ezilme deneyleri sırasında kayması engellenmiştir. Üretimi yapılan tüpler Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6: İmal edilen çarpışma kutuları

3. Ökzetik dolguların üretimi

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 yerleştirilen dolguların uzunlukları tüplerle aynı boydadır. Kare kesitli dolgunun dairesel kesitli tüp içine yerleşimi için dolgunun kenar uzunluğu 45 mm olarak belirlenmiştir. CATIA yazılımı kullanılarak tasarlanan reentrant hücre geometrisine sahip dolgular 3B yazıcıda ABSplus plastik malzemesi kullanılarak üretilmiştir. Dolgunun boyu ve kesit geometrisi tüpün boyu ve çapına göre belirlenmiştir.



Şekil 7: ABSplus plastik malzemeli ökzetik dolgu yapısı.

4. Çarpışma kutularının statik testleri

Çarpışma kutularının testleri 3 adet boş tüp, 3 adet ökzetik dolgulu tüp ve 3 adet sadece dolgu malzemesinin statik ezilme testleri şeklinde gerçekleştirilmiştir. Statik testler İTÜ İnşaat Fakültesi laboratuvarında yer alan 600 kN basma kuvveti kapasiteli Şekil 8'de görülen MTS universal test makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüplerin üst yüzeyleri test esnasında altta kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Bunun nedeni uygulanan yükün doğru şekilde merkezlenmesi için alt kısımda dairesel çizgilerle önceden işaretlenmiş bir plağın olması ve tüpün üst yüzeyiyle temasının sağlanabilmesidir.



Şekil 8: MTS Basma test makinesi

Daha sonra sadece dolgular ve ökzetik dolgulu tüplerin aynı deney koşullarında statik ezme testleri yapılmıştır. Tasarımı belirlenen ve üretilen reentrant latis yapılı ökzetik dolgular, alüminyum tüpler içine Şekil 9'da görüldüğü gibi yerleştirilmiştir (DT_S_N1, DT_S_N2 ve DT_S_N3). Daha sonra 2 mm/dak. ezme hızı ile statik ezme deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 9: DT_S_N1, DT_S_N2 ve DT_S_N3 statik ezme numuneleri.

5. Sonlu eleman analizleri

Çarpışma kutularının statik ezilme test sonuçları ile karşılaştırılması için sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modelleri LS-DYNA LsPrepost yazılımında kurulmuş ve analizleri ANSYS LS-DYNA ile gerçekleştirilmiştir. Alüminyum tüpler kabuk eleman, ABSplus plastik malzemeli ökzetik dolgu ise katı eleman ile modellenmiştir. Kabuk eleman kullanmak analiz

süresini kısalttığı için tercih edilmiştir. Ökzetik dolgu yapısı iki yönlü ökzetik davranış gösterdiği için bu geometriyi iki boyutlu olarak modellemek mümkün değildir. Bu nedenle ökzetik dolgu için katı model tercih edilmiştir. Alüminyum tüpün sonlu eleman modeli 8250 kabuk eleman, ökzetik dolgu ise 118554 katı eleman içermektedir. Çarpan cisim rijit olarak modellenmiştir. Testlerle aynı hızda 2 mm/dak. ezilme hızında ezilme analizleri gerçekleştirilmiştir.

Sınır koşulu olarak tüpün alt kısmı deneylerde olduğu gibi sabit bir düzleme bağlanmıştır. Numunelerin zeminle temas eden elemanlarının dönme ve öteleme hareketleri sabitlenerek sınır koşulu tanımlanmıştır. AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE kontak türü hem tüp hem de dolgu modeli için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Bu kontak türünün amacı deforme olan parçanın kendi elemanlarının birbiriyle değmesi durumunda temas kurabilmesini sağlamaktır. Diğer kontak türü olan AUTOMATIC_SURFACE_SURFACE ise iki farklı parça arasında yani tüp ile dolgunun birbirine teması durumunda tanımlanması gereken kontak tipidir.

Analiz süresi ve zaman adımı CONTROL_TERMINATION ile belirlenmektedir. Analiz sonrası elde edilmek istenen tepki kuvveti, düğüm noktası kuvvetleri, soğurulan enerji vb. değerler ASCII veya HISTORY bölümlerinden tanımlanmaktadır. Malzeme modelleri

MAT_PIECEWISE_LINEAR_PIASTICITY (MAT 024) malzeme klasörü kullanılarak kurulmuştur.

6. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

6.1. Statik test ve analiz sonuçları

T_S_N1, T_S_N2 ve T_S_N3'ün test sonrası görselleri Şekil 10'da yer almaktadır. Model T_S_N2 ve T_S_N3'ün test sonrası görünümü ile analiz sonucu elde edilen deformasyon şekilleri benzerlik göstermektedir.





Şekil 10: T_S_N1, T_S_N2 ve T_S_N3'ün statik ezilme testleri ve analizi sonrası deformasyon şekli.

T_S_N1, T_S_N2 ve T_S_N3'ün deneylerinden elde edilen kuvvet-deformasyon eğrileri ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen kuvvet-deformasyon eğrisi Şekil 11'de yer almaktadır. Deney ve analiz sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 11: T_S_N1, T_S_N2 ve T_S_N3 Test numunelerinin statik ezme testlerinden ve sonlu elemanlar analizinden (SEA) elde edilen kuvvet-deformasyon eğrilerinin karşılaştırılması

Yapılan analizler sonucu dolgu boyu değişiminin tepki kuvvetini değiştirmediği ve tüple aynı boyda seçilmesinin avantajlı olduğu önceki bölümde gösterilmişti. Analizlerin yanı sıra boyları 125 mm ve 150 mm olan iki farklı dolgu modeli üretilerek statik ezme testleri yapılmış ve sonuçları incelenmiştir (ÖD_S_N1ve ÖD_S_N2). Her iki numunenin de statik ezilmeye karşı maksimum tepki kuvveti 2,5 kN olarak ölçülmüştür. Şekil 12'de DT_S_N1, DT_S_N2 ve DT_S_N3'ün deney sonrası deformasyona maruz kalmış şekilleri ve aynı şartlarda yapılan sonlu elemanlar modelinin analiz sonu deforme olmuş şekli görülmektedir. Her bir numunenin deformasyonu tüpün rijit kütleyle temas eden yüzeyinden başlamıştır. Benzer deformasyon şeklininin analiz sonucunda da görülmektedir.





Şekil 12: DT_S_N1, DT_S_N2 ve DT_S_N3'ün statik ezme testleri ve analizi sonrası deformasyon şekli

Deney numuneleri DT_S_N1, DT_S_N2 ve DT_S_N3'e ait kuvvet-deformasyon eğrileri ile sonlu elemanlar analizinde elde edilen kuvvet-deformasyon eğrisi Şekil 13'da aynı grafikte yer almaktadır. Şekilden de görüldüğü üzere deneyler ve analiz sonucu elde edilen maksimum pik kuvveti ve devamında oluşan kuvvet değerleri birbirine yakın değerlerdir.



Şekil 13: DT_S_N1, DT_S_N2 ve DT_S_N3 Test numunelerinin statik ezme testlerinden ve sonlu elemanlar analizinden (SEA) elde edilen kuvvet-deformasyon eğrilerinin karşılaştırılması.

SONUÇ

Bu çalışmada re-entrant latis geometrili ökzetik yapıların AL6063 malzemeli ince cidarlı tüplerin içinde statik ezilme davranışı incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda ökzetik dolgulu ve dolgusuz tüplerin 2 mm/dak ezme hızında statik ezme testleri yapılmıştır. Sayısal çalışmalarda ise test numunelerinin sonlu elemanlar modelleri LS-DYNA yazılımında kurularak analizleri yapılmıştır. Sonlu eleman analiz sonuçları, deney sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri ve deformasyon şekilleri karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

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

Kaynaklar

Alderson, A. ve Alderson, K. L., 2007. Auxetic materials, Journal of Aerospace Engineering, 221, s.565-575.

- Evans, K. E. ve Alderson, A., 2000. *Auxetic materials: Functional materials and structures from lateral thinking*, Adv. Mater., 12, 9, s.617–628.
- Elipe, J. C. Á., & Lantada, A. D., 2012. *Comparative study of auxetic geometries by means of computer-aided design and engineering*. Smart Materials and Structures, 21(10), 105004.
- 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.

- 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. ve Türkmen H.S., 2019. *Experimental and numerical investigation of impact behavior of nested tubes with and without honeycomb filler*. Thin-Walled Structures.143, 106256.
- Usta, F., Ertaş, O.F., Ataalp, A., Türkmen, H.S., Kazancı, Z., Scarpa, F., 2019. *Impact behavior of triggered and nontriggered crash tubes with auxetic lattices*. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design. 2,2, s.119–127.
- 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.
- Yang, W., Li, Z. M., Shi, W., Xie, B. H. ve Yang, M. B., 2004. *On auxetic materials*, Journal of Materials Science, 39, 10, s.3269–3279.