



KADEMELENDİRİLMİŞ KÖPÜK MALZEMELERİN SANDVIÇ KİRİŞİN DARBE DAVRANIŞINA ETKİSİ

Uğur Özmen ve Buket Okutan Baba

Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 45140 Muradiye/Manisa

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the low-velocity impact response of sandwich beams with graded core. In this study, carbon/epoxy composite was chosen as skin material, and three Divinycell foams with different densities were chosen as core material. Six different core arrays of sandwich beams with three layered core material were investigated. Beam dimensions and core thicknesses were constant in all six different arrays. Impact response of sandwich beams with graded core was modelled using the finite element analysis. The influence of graded foam core on the impact behaviour of sandwich composites was evaluated by the analysis of the displacement, Von Mises stresses and contact forces for both end fixed sandwich beams under the same impact energy. Results show that on sandwiches with uniform core, although the increasing foam density reduces displacement and contact forces, it increases Von Mises stresses. Similar results were observed on sandwich composites with foam cores that have gradually increasing or decreasing density. On these sandwiches, the foam density of the top surface, where impact hits, determines the sandwich features. It is difficult to generalize for displacements or Von Mises stresses of sandwiches with irregular foam core array. The properties of the sandwich beams change depending on the arrays of grades.

Keywords: Sandwich composite, graded foam core, impact

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, kademelendirilmiş köpük malzemeye sahip sandviç kirişlerin, düşük hızlı darbe etkisi altındaki cevabını ortaya koymaktır. Araştırmada kullanılan sandviç kirişin kabuk malzemesi olarak karbon/epoksi kompozit ve çekirdek malzemesi olarak üç farklı yoğunluktaki Divinycell köpük seçilmiştir. Üç katmanlı çekirdeğe sahip sandviç kirişlerde, altı farklı çekirdek katmanı sıralanışı incelenmiştir. Kiriş boyutları ve çekirdek kalınlıkları tüm yapılandırmalar için sabit tutulmuştur. Kademeli sandviç kirişin darbe cevabı, sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanılarak modellenmiştir. Kademeli köpük çekirdeğin, sandviç kompozitin darbe davranışına etkisi, aynı darbe enerjisi altındaki iki uçtan ankastre sandviç kirişlerin yer değişimleri, Von Mises gerilmeleri ve temas kuvvetleri analizleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, tek tip köpüğün kullanıldığı sandviçlerde, artan köpük yoğunluğunun yer değişim ve temas kuvvetlerini azaltmasına rağmen, Von Mises

gerilmelerini artırdığını ortaya koymuştur. Benzer sonuç yoğunluğun adım adım arttığı ya da azaldığı kademeli köpük içeren sandviç kompozitlerde de bulunmuştur. Bunlarda, darbenin geldiği üst yüzeydeki köpük yoğunluğu sandviç özelliğini belirleyici olmaktadır. Üst yüzeydeki köpüğün artan yoğunluğuyla yer değişimi azaltmakta ve Von Mises gerilmeleri artmaktadır. Kademelendirmelerdeki yoğunluk artış ya da azalışının düzenli olmadığı sandviçlerde ise yer değişimi ve Von Mises gerilmelerine dair genelleme yapmak zor olup, özellikler kademelerin sıralanışına bağlı olarak değişmektedir.

Anahtar kelimeler: Sandviç kompozit, kademelendirilmiş köpük çekirdek, darbe

1 GİRİŞ

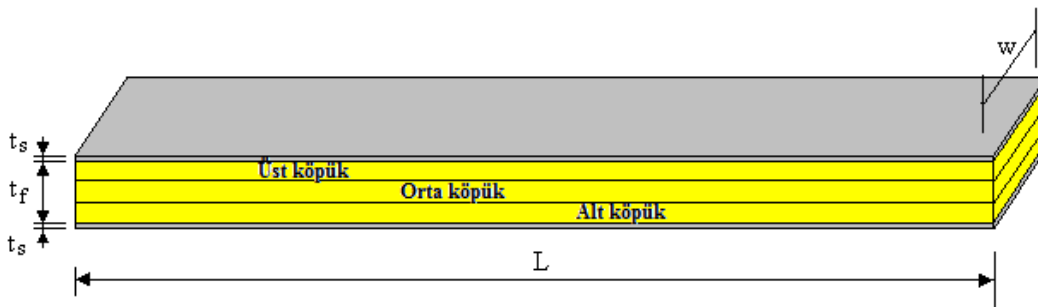
Sandviç kompozitler, yüksek eğilme rijitliği/ağırlık ve yüksek mukavemet/ağırlık oranlarına sahip olmaları sebebiyle, son yıllarda başlıca hava ve deniz endüstrisi olmak üzere birçok endüstriyel uygulamada yer almaktadır. Bu kompozitler, temelde iki ince ve rijit kabuk ile daha kalın ve hafif çekirdekten ibarettir. Kabuk ve çekirdeğe ait özellikler, sandviç yapının cevabını direk olarak etkilemektedir [1, 2]. Literatürde, farklı köpük malzemelere sahip sandviç kompozitlerin darbe yükleri altındaki cevaplarının incelendiği çok sayıda çalışma mevcuttur [3]. Çalışmalar göstermektedir ki, çekirdek malzemesi yapının dinamik cevabı üzerinde son derece etkindir [4-6]. Düşük hızlı darbe yükü altındaki sandviç kompozitlerin davranışlarında incelenen köpük malzemeleri çoğunlukla üniförmüdür. Üniförm bir köpüğün sunduğu özelliklerin geliştirilmesi için kademelendirilmiş köpük malzemelerinin yer aldığı sandviçlere ait çalışmalar ise sınırlı seviyededir. Son dönemlerde yapılan bu çalışmaların bazıları deneysel [7], bazıları ise nümerik modelleme [8,9] sonuçlarını içermektedir.

Bu çalışmada ise, farklı özelliklere sahip üç çeşit köpüğün, eşit kalınlıkta ve değişik sıralarda yer aldığı sandviç kirişlerin darbe altındaki davranışları incelenmiştir. Kabuk malzemesi olarak karbon/epoksi kompozitin kullanıldığı iki ucundan ankastre olarak tutturulmuş bu sandviç kirişlerin düşük hızlı darbe altındaki davranışlarını tespit için sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Sonuçta, köpük özellikleri ve sıralanışlarının darbe neticesinde ortaya çıkan yerdeğişimi ve Von Mises gerilmelerini nasıl etkilediğine bakılmıştır.

2 SONLU ELEMENLAR MODELİ

Problem tanımı:

Çalışmada modellenen sandviç kirişlerde, çekirdek malzemesi olarak farklı sıralanışlardaki eşit kalınlıkta 3 farklı Divinycell köpük ve kabuk malzemesi olarak $[\pm 45]$ dizilime sahip karbon fiber takviyeli kompozitler kullanılmıştır. Kabukların kalınlıkları $t_s=0.762$ mm ve çekirdek kalınlıkları $t_f=12.7$ mm dir. Kiriş uzunluğu $L=230$ mm ve kiriş genişliği ise $w=25.4$ mm alınmıştır. Modellenen sandviç kirişlere ait sematik gösterim Şekil 1 de verilmiştir.



Şekil 1. Kademelendirilmiş sandviç kompozit geometrisi

Tablo 1 de verilen toplamda 9 farklı model oluşturulmuştur. Sandviç kirişler iki ucundan ankastre olarak tutturulmuş ve bir vurucu aracılığıyla darbe yüküne maruz bırakılmıştır. Değişen çekirdek malzeme özelliklerinin ve 3 tabakalı çekirdek malzeme sıralanışının kirişin darbe cevabına etkisi incelenmiştir.

Tablo 1. İncelenen sandviç kompozitlerdeki köpük malzemelerin sıralanışı

Numara	Sandviç kompozitteki köpük malzemelerin sıralanışı
1	H100
2	H100-H160-H250
3	H100-H250-H160
4	H160
5	H160-H100-H250
6	H160-H250-H100
7	H250
8	H250-H100-H160
9	H250-H160-H100

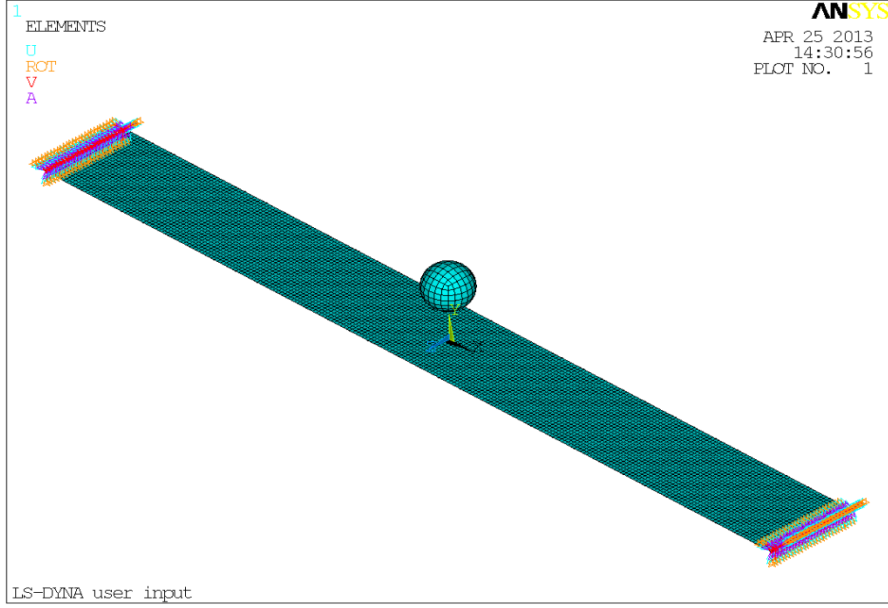
Nümerik Model:

Düşük hızlı darbeye maruz kademelendirilmiş sandviç kirişin davranışlarını ortaya koyabilmek için ANSYS paket programının LS DYNA modülü kullanılarak sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Kabuk malzemesi olarak kullanılan karbon/epoksi kompozit modelde ortotropik elastik malzeme olarak tanımlanmıştır. Elastik modüller enine ve boyuna doğrultularda eşit alınmıştır. Çekirdek malzemesi olarak 3 farklı Divinycell köpük, eşit kalınlıkta 50 tabakadan oluşacak şekilde modellenmiştir. Köpükler modelde izotropik elastik malzeme olarak tanımlanmıştır. Tablo 2’de, modellerde kullanılan sandviç kompozit bileşenlerinin özellikleri verilmiştir. Sandviç kompoziti modellemek için seçilen eleman tipi, 12 serbestlik derecesine sahip 4 düğümünden oluşan Shell 163’tür. Vurucu için çelik malzeme seçilmiş ve rijit olarak modellenmiştir. Yarıçapı 6.35 mm ve kütlesi 4.926 kg olan küresel vurucu, 4 J enerjiyi levhaya iletebilmesi için 1.1885 m/s ilk hızla 10 mm yükseklikten levhanın tam ortasına düşecek şekilde modellenmiştir. Vurucu için seçilen eleman tipi 8 düğümlü 3D Solid 164’tür.

Tablo 2. Sandviç kompozit bileşenlerinin mekanik özellikleri

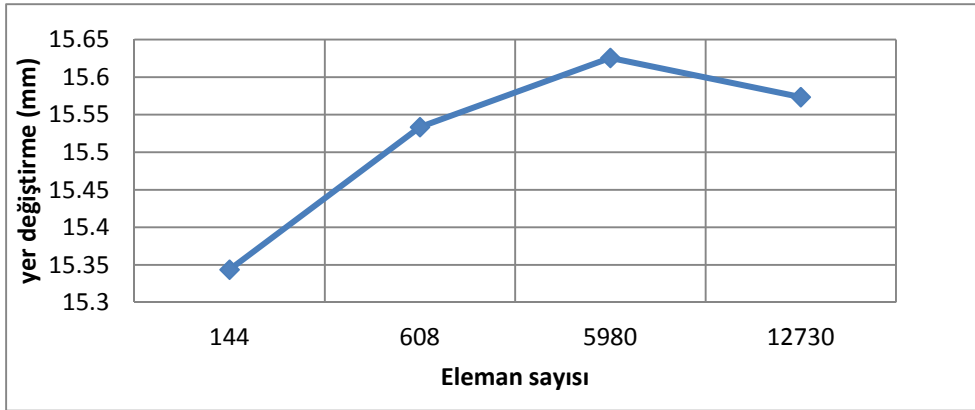
Mekanik (Birim)	Özellikler	Kabuk	Çekirdek-1 H100	Çekirdek-2 H160	Çekirdek-3 H250
Çekme modülü (MPa)		10658	130	205	320
Kayma modülü (MPa)		4000	35	60	97
Yoğunluk (kg/m ³)		1446	100	160	250
Poisson oranı		0.3	0.3	0.3	0.3

Sonlu elemanlar modeli oluşturulan iki uçtan ankastre tutturulmuş sandviç kirişe ait sınır şartları ve yükleme durumu Şekil 2’de verilmiştir.



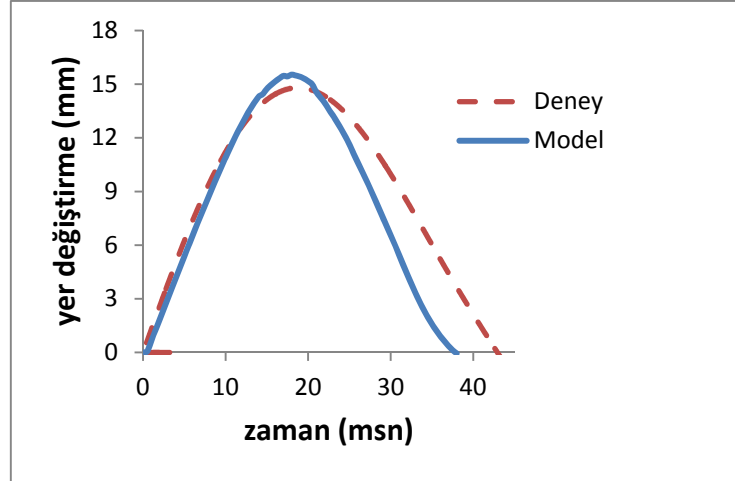
Şekil 2. Sandviç modelin sınır şartları ve yükleme durumu

Oluşturulan modelden yeterli doğrulukta sonuç elde edebilmek için gereken eleman sayısı mesh analiziyle bulunmuştur. Değişen eleman sayılarına bağlı maksimum yer değişimlerinde görülen farklılıklar Şekil 3’te gösterilmiştir. Sonuçta, uzunluk boyunca (230) ve genişlik boyunca (26) elemanın yer aldığı toplamda 5980 elemandan oluşan model tüm sonlu elemanlar analizinde kullanılmak üzere seçilmiştir.



Şekil 3. Mesh analizi

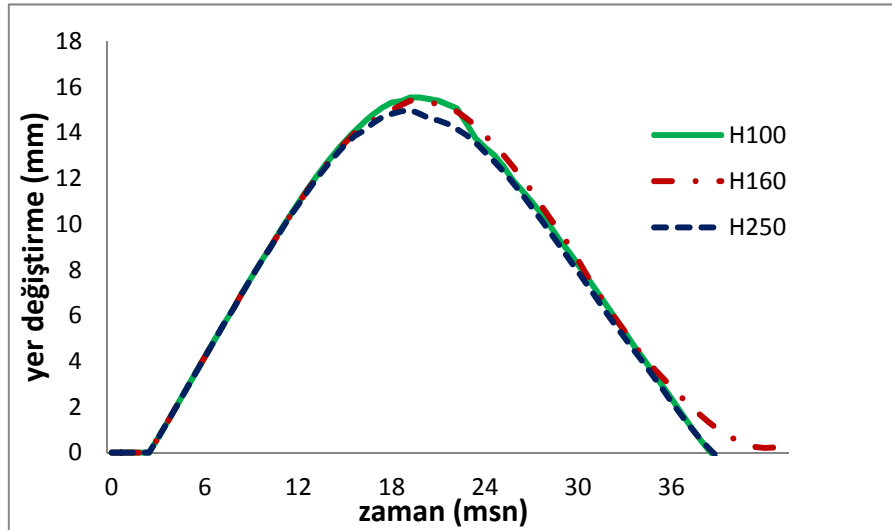
Ayrıca, sonlu elemanlarla yapılan hesaplamaların doğruluğundan emin olabilmek için literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapılmıştır. Poliüretan köpük ve karbon epoksi kabuğun kullanıldığı sandviç kirişin darbe davranışına ait deneysel sonuçları içeren Ref [10] ile modelden elde edilen sonuçların mukayesesi Şekil 4’te verilmiştir. Görüldüğü gibi, mesh analiziyle tespit edilmiş eleman sayısına sahip model sonuçlarıyla, deneysel sonuçlar benzerlik göstermektedir.



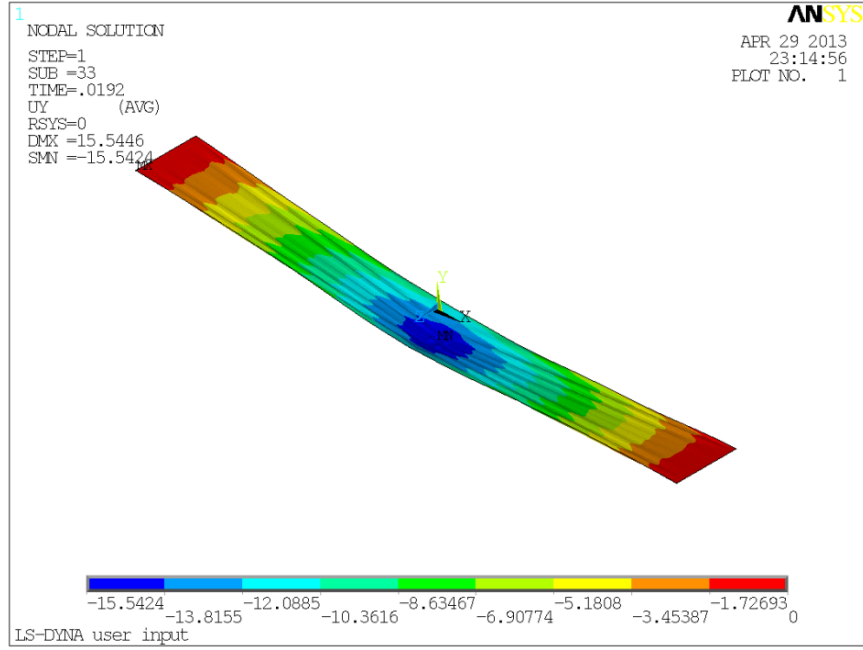
Şekil 4. Modelin doğrulanması

3 SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Sandviç kompozitlerde kademelendirilmiş köpük malzemelerin bulunmasının, bu kompozitlerin darbe davranışını nasıl etkileyeceğinin incelendiği çalışmada öncelikle tek tip köpüğün yer aldığı sandviç kompozitler modellenmiştir. Şekil 5'te, sadece H100, H160 ve H250 köpük malzemelerinin yer aldığı sandviç kompozitlerin orta noktalarındaki zamana bağlı yerdeğişim grafikleri, Şekil 6'da ise, H100 çekirdekli sandviç kompozitte ortaya çıkan maksimum yer değiştirmelere ait kontur çizimler verilmiştir. Şekil 5'teki grafikten görüldüğü gibi, her bir köpük için zaman bağlı yerdeğişimi parabolik bir eğriyi vermektedir. Yerdeğişimi, zaman içerisinde darbe hızıyla bağlantılı olarak artmakta, maksimum değerine ulaştıktan sonra ise benzer şekilde azalmaktadır. İncelenen köpükler arasında H100 de görülen yerdeğişimi en büyük (15.542 mm) olup, H250 ye kıyasla %3.6 fazladır. Yerdeğişiminde görülen bu düşüş, H250 köpüğüne ait yoğunluk ve elastik modülün, H100 köpüğününkinden yaklaşık 2.5 kat fazla olmasının sandviç kompozite sağladığı rijitlikle alakalıdır.

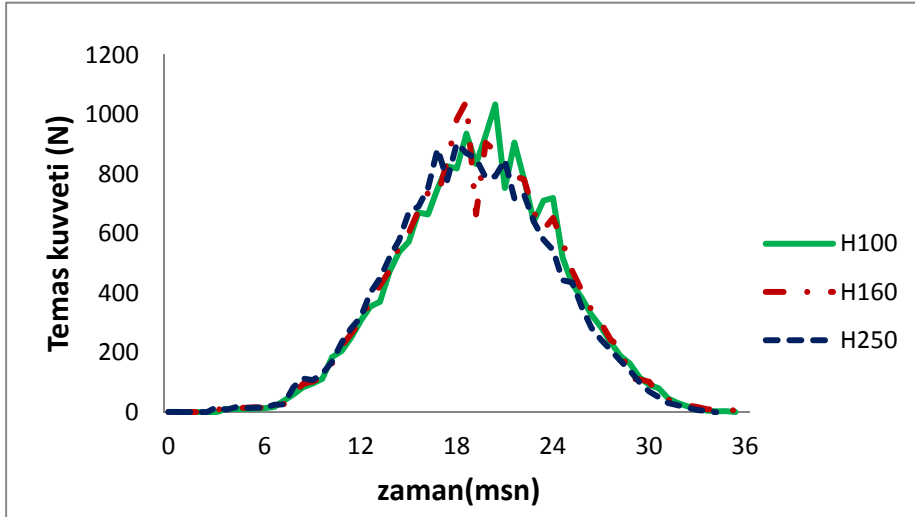


Şekil 5. Tek tip köpüğe sahip sandviç kompozitlerin merkezinde görülen zamana bağlı yerdeğişimi



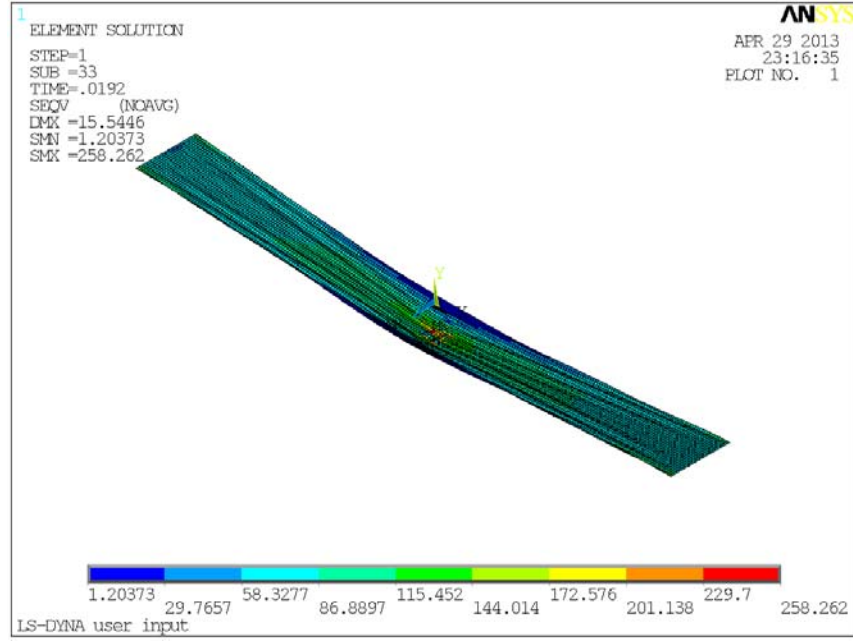
Şekil 6. H100 çekirdekli sandviç kompozit için maksimum yer değiştirmeler

Rijitliğin etkisi, Şekil 7 de verilmiş olan H100, H160 ve H250 köpük malzemelerinin yer aldığı sandviç kompozitlerdeki kuvvet-zaman grafiklerinde de görülmektedir. Bu köpükler arasında en yüksek yoğunluk ve rijitliğe sahip H250 köpük malzemeli sandviçteki temas kuvveti değeri, yerdeğişiminde olduğu gibi en küçüktür (903 N). İncelenen diğer tüm kompozitler için bulunan maksimum temas kuvvetleri 903 ile 1044 N arasında değişmektedir.



Şekil 7. Tek tip köpüğe sahip sandviç kompozitlerde zamana bağlı kuvvet değişimi

Şekil 8'de, H100 çekirdekli sandviç kompozitte ortaya çıkan Von Mises gerilmelerine ait kontur çizimler verilmiştir. Şekil incelendiğinde görülebileceği gibi, darbe etkisiyle ortaya çıkan en büyük gerilmeler, sandviç merkezinde yani vurucunun darbe yükünü uyguladığı bölgede ortaya çıkmaktadır.



Şekil 8. H100 çekirdekli sandviç kompozit için Von Mises gerilmeleri

Tablo 3'te her farklı köpük sıralanışı için bulunmuş sandviç kompozit merkezine ait maksimum yer değişim ve Von Mises gerilme değerleri verilmiştir. Ayrıca Şekil 9 ve 10'da, bu sandviç kompozitler için bulunan maksimum yer değişim ve Von Mises gerilmelerinin, H100 köpüğün kullanıldığı sandviç kompozitler için bulunmuş değerlerle normalize edildiği grafikler sunulmuştur.

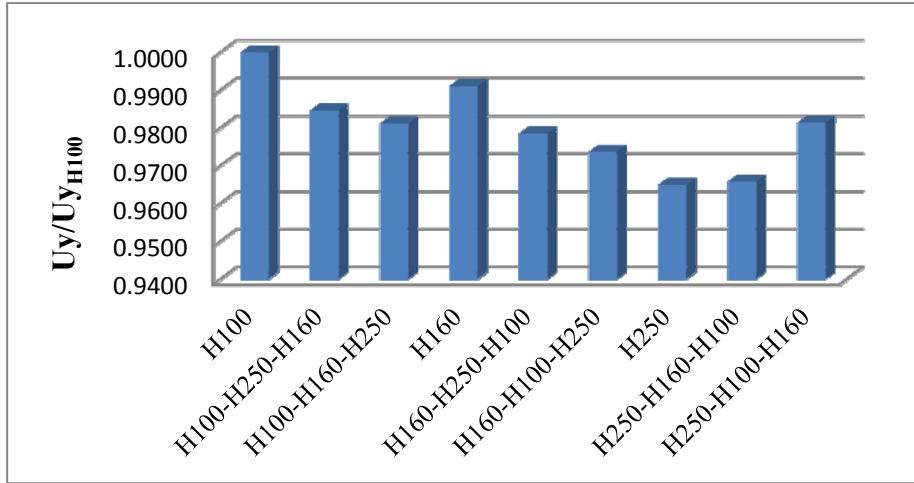
Tablo 3. İncelenen sandviç kompozitlere ait yer değiştirme ve

Von Mises gerilme değerleri

No	Kademeli köpük içeren sandviç kompozitler	Maksimum yerdeğiştirme (mm)	Maksimum VonMises gerilmesi (MPa)
1	H100	15,5424	258,262
2	H160	15,4043	261,082
3	H250	14,9977	277,695
4	H100-H160-H250	15,2497	242,233
5	H100-H250-H160	15,3042	282,035
6	H160-H100-H250	15,1335	289,315
7	H160-H250-H100	15,209	236,97
8	H250-H100-H160	15,2534	322,759
9	H250-H160-H100	15,0108	285,473

Şekil 9 ve 10 incelendiğinde, tek tip köpük içeren sandviç kompozitlerde köpük malzemesi yoğunluğundaki artışın yer değişimlerinde azalmaya, Von Mises gerilmelerinde ise artmaya

neden olduğu görülmektedir. Yoğunluğun adım adım arttığı ya da azaldığı kademeli köpük içeren sandviç kompozitlerde ise darbenin geldiği yüzeye yakın yerde bulunan köpük malzeme özellikleri, yerdeğişimi ve gerilmeler üzerinde daha etkin olmaktadır. Darbenin geldiği üst yüzeyden itibaren, yoğun olandan daha az yoğun olana doğru köpük malzemeleri sıralandığında (H250-H160-H100) ortaya çıkan yerdeğişimi, diğer sıralanışlara kıyasla daha küçüktür. Bu kompozitler için bulunan yerdeğişim değeri, kademelendirilmiş köpük içeren sandviçler arasında en düşük olmaktadır. Köpük malzemelere ait yoğunlukların darbenin geldiği üst yüzeyden itibaren arttığı (H100-H160-H250) sandviçlerde ise, H100 köpüğünün düşük yoğunluğuna bağlı olarak daha yüksek yerdeğişimi görülmektedir. Ayrıca bu sandviçlerde görülen Von Mises gerilmesi, (H250-H160-H100) sandviçine göre %15 daha küçüktür.



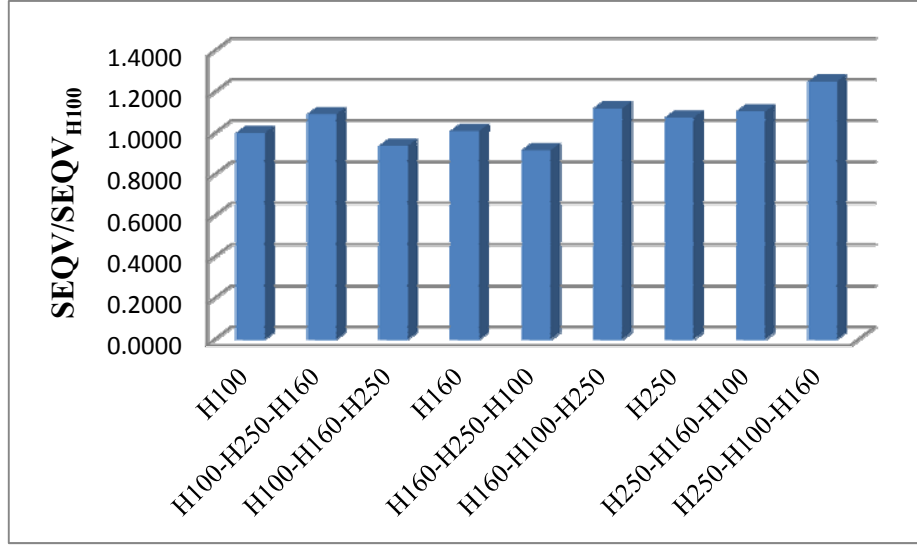
Şekil 9. Kademeli köpük içeren sandviç kompozitlerdeki yerdeğişimlerinin, H100 köpük içeren sandviçlerdeki yerdeğişimlerine göre normalizasyonu

Kademelendirmelerdeki yoğunluk artış ya da azalışının düzenli olmadığı sandviçlerde ise yer değişimi ve Von Mises gerilmelerine dair genelleme yapmak zordur. Bunlarda ortaya çıkan değerler, farklı özelliklerdeki kademelerin sıralanışına bağlı olarak değişmektedir. Örneğin tek tip H160 çekirdeği yerine, H160 dan daha düşük ve yüksek yoğunluktaki H100 ve H250 köpüklerle kademlendirilen çekirdeğin kullanılması halinde, yerdeğişim miktarı azalırken, Von Mises gerilmeleri bu iki tabakanın sıralanışına bağlı olarak farklılık göstermektedir.

4 DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, kademeli köpük malzemeye sahip sandviç kirişlerin, düşük hızlı darbe etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. H100, H160, H250 Divinycell köpük malzemelerinin tek tek ve birlikte çekirdek olarak kullanıldığı sandviçlerde darbe sonrası ortaya çıkan yerdeğiştirme ve Von Mises gerilmelerine bakılarak kademelerin etkisi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Düşük hızlı darbe etkisi altındaki tek tip köpük içeren sandviç kompozitlerde, köpük malzemesi yoğunluğundaki artış yer değişiminde ve temas kuvvetinde azalmaya, Von Mises gerilmesinde artmaya neden olmaktadır.
- Köpük yoğunluklarının darbeyi alan yüzeyden itibaren adım adım arttığı ya da azaldığı sandviç kompozitlerin özellikleri, darbenin geldiği yüzeye yakın yerde bulunan köpük malzemesi tarafından kontrol edilmektedir.



Şekil 10. Kademeli köpük içeren sandviç kompozitlerdeki Von Mises gerilmelerinin, H100 köpük içeren sandviçlerdeki gerilmelere göre normalizasyonu

- Çekirdeğini oluşturan kademelerdeki köpük malzemeleri yoğunluğunun, düzenli artış ya da azalış göstermediği sandviçlerde ortaya çıkacak özellikler için genelleme yapmak zordur. Ancak şurası kesindir ki, tek tip köpük yerine, farklı sıralanışlarda kademeli köpük yapının kullanımı, darbe altında farklı özellikler sergileyen sandviç kompozitler elde etmek için uygundur.

KAYNAKLAR

- [1] Vinson JR (2001) Sandwich structures. App Mech Rev 54 (3):201–214
- [2] Zenkert D (1995) An Introduction to sandwich construction. Engineering Materials Advisory Services, London
- [3] Chai GB, Zhu S. A review of low-velocity impact on sandwich structures. Proc Inst Mech Eng, Part L: J Mater Des Appl 2011;225:207–30.
- [4] Atas C, Sevim C. On the impact response of sandwich composites with cores of balsa wood and PVC foam. Composites Struct 2010;93:40–8.
- [5] Zhou J, Hassan MZ, Guan Z, Cantwell W, The low velocity impact response of foam-based sandwich panels, Composites Science and Technology, 2012,72, 1781-1790.
- [6] M. Daniel, J. L. Abot, P. M. Schubel, J.-J. Luo, Response and Damage Tolerance of Composite Sandwich Structures under Low Velocity Impact, Experimental Mechanics, 2012,52, 37-47.
- [7] Hossain MK, Liu QL, O'Toole BJ. Functionally graded foam material system for energy absorption. SAMPE 39th ISTC – Cincinnati OH, October 29–November1; 2007.
- [8] Apetre NA, Sankar BV, Ambur DR. Low-velocity impact response of sandwich beams with functionally graded core. Int J Solids Struct 2006;43(9):2479–96.
- [9] Icardi U, Ferrero L. Optimisation of sandwich panels with functionally graded core and faces. Compos Sci Technol 2009;69:575–85.
- [10] Baba, B.O. Impact response of sandwich beams with various curvatures and debonds, Sandwich Structures and Materials, 15, 137-155, 2013.