



XIX. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ

24-28 Ağustos 2015, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ PLAKALAR İLE DESTEKLENMİŞ BAL PETEĞİ SANDVIÇ YAPILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Kemal Arslan¹, Recep Güneş², M. Kemal Apalak³ ve J.N. Reddy⁴

¹Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, KAYSERİ

^{2,3}Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, KAYSERİ

⁴Texas A&M University, Department of Mechanical Engineering, College Station, USA

ABSTRACT

Sandwich structures are specific applications of the composite materials whose high performance properties are obtained by different material combinations. They have quite extensive usage areas (aeronautics and aerospace, automotive, defense, etc.) with their several high quality properties compared with the conventional materials. Sandwich structures can be consisted of different facesheets and core materials in order to have required properties for the application areas. The determination of the low-velocity impact response of the sandwich structures has an important role by reason of their working areas with impulsive loadings. The deformations and energy absorption capability of the honeycomb sandwich structures reinforced by the functionally graded plates under low-velocity impact loads were investigated using explicit finite element software, LS-DYNA[®]. The sandwich structure was consisted of Al/SiC FG facesheets and Al 3003-H19 aluminum honeycomb core. The impact response of the sandwich structure was investigated in terms of different material compositions of the FG plates, impact energies and cell wall thickness of the honeycomb core.

ÖZET

Sandviç yapılar, sahip oldukları yüksek performans özelliklerinin farklı malzeme kombinasyonları ile elde edildiği kompozit malzeme alanının özel bir uygulamasıdır. Konvansiyonel malzemelere göre sahip oldukları birçok üstün özellikleri ile oldukça geniş bir uygulama alanına (havacılık ve uzay, otomotiv, savunma, vs.) sahiptirler. Sandviç yapı elemanları, uygulama alanına yönelik istenilen özelliklere sahip olması açısından farklı yüzey plakaları ve çekirdek malzemelerinden oluşabilir. Sandviç yapılar, kullanım alanlarına bağlı olarak darbeli yüklemelere maruz kalabildikleri için düşük hızlı darbe cevabının belirlenmesi oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar ile desteklenmiş bal peteği sandviç yapıların düşük hızlı darbe yükleri altındaki deformasyonları ve enerji sönmeme kabiliyetleri LS-DYNA[®] sonlu elemanlar programı kullanılarak araştırılmıştır. Sandviç yapı, Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş kompozit yüzey plakaları ve Al 3003-H19 alaşımı bal peteğinden oluşmaktadır. Sandviç yapının darbe cevabı, fonksiyonel kademelendirilmiş destek plakalarının farklı malzeme kompozisyonu, vurucu kütlelerinin sabit olduğu farklı çarpma enerjileri ve bal peteği çekirdek malzemesinin farklı hücre duvar kalınlıkları için incelenmiştir.

GİRİŞ

Sandviç yapılar uygun malzeme kombinasyonu ile kötü çalışma şartlarına sahip çalışma ortamları için oldukça uygundur. Özellikle yapıya etkiyen darbeli yükler altında oluşan enerjinin sönmüldüğü yapılarda kullanılmaktadır. Bu yüzden, sandviç yapıların darbe cevabının araştırılması oldukça önemli bir konudur. Sandviç yapı tasarımı farklı yüzey plakaları ve çekirdek malzemeleri kullanılmaktadır. Çekirdek malzemesi olarak en yaygın kullanılan malzemelerden biri bal peteğidir. Sandviç yapılarda bal peteği kullanılarak hafif bir yapı elde edilmesinin yanı sıra özellikle basma ve darbeli yükler altında yüksek mekanik dayanıma sahip bir yapı elde edilmiş olur. Sandviç yapılarda yüzey plakaları olarak farklı yapılarda kompozit ve metal malzemeler kullanılabilir. Bu çalışmada, yüzeyler için fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar seçilmiştir. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, genellikle seramik-metal bileşenlerinden oluşan ve malzeme kompozisyonunun kalınlık boyunca belirli bir fonksiyona göre değiştiği çok katmanlı kompozit yapılardır. Sahip oldukları mekanik özellikleri ile darbeli ortamlarda ve balistik uygulamalarda kullanılabilirler. Seramik oranının fazla olduğu katman yüksek sertliği sayesinde çarpma enerjisini karşılamada ve çarpan cismin durdurulmasında önemli bir işleve sahipken metal oranının fazla olduğu katman yapısal bütünlüğü sağlamada ve kademelendirilmiş bölge ise çarpma enerjisinin radyal yönde yayılmasında ve sönmülmesinde önemli bir etkiye sahiptir.

Farklı kompozit yüzey plakaları ve bal peteği çekirdek malzemeleri ile oluşturulmuş sandviç yapıların ve fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin düşük hızlı darbe davranışlarının araştırıldığı çalışmalar mevcuttur. Karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar ile desteklenmiş alüminyum bal peteği sandviç yapılarda, çarpma enerjisinin düşük çarpma hızlarında bal peteği tarafından, yüksek çarpma hızlarında ise kompozit yüzey plakaları tarafından sönmüldüğü tespit edilmiştir [1]. Farklı katman sayısına sahip karbon elyaf kompozit yüzey plakaları ve farklı bal peteği malzemelerinden oluşturulmuş sandviç yapılar için farklı enerji seviyelerinde (5-20 J) sandviç yapıda oluşan hasar başlangıcı, hasar yayılımı ve hasar mekanizmaları incelenmiş ve kompozit plakalarda çok zor görülebilen darbe hasarı (*BVID-barely visible impact damage*) meydana gelmiştir [2]. Cam elyaf takviyeli kompozit yüzey plakaları ve iki farklı kalınlıktaki alüminyum bal peteği ile oluşturulmuş sandviç yapı için kompozit plakaların eğilme modülünün ve bal peteği kayma modülünün şekil değiştirme duyarlılığına etkisi incelenmiş ve bu parametrelerin incelenen şartlar altında hiçbir şekil değiştirme duyarlılığı sergilemediği tespit edilmiştir [3]. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç kirişlerin düşük hızlı darbe yükleri altında temas bölgesi civarındaki temas gerilmelerinin ve diğer gerilme bileşenlerinin artmasıyla kirişin temas rijitliğinin de arttığı, diğer taraftan çekirdek özelliklerinin derecelendirilmesiyle en yüksek darbe yüküne bağlı olarak en yüksek şekil değiştirme değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Fonksiyonel kademelendirilmiş çekirdeğin darbe yükünü etkili bir şekilde azalttığı ve bu özelliği sayesinde darbeli yüklemelere karşı kullanılabileceği görülmüştür [4]. Fonksiyonel kademelendirilmiş çekirdeğe sahip sandviç kirişlerin üç boyutlu düşük hızlı darbe davranışı, çekirdek yapısının simetrik, asimetrik ve homojen durumları için incelenmiş, en yüksek temas kuvvetinin asimetrik çekirdeğe sahip yapıda ve en düşük temas kuvvetinin ise homojen çekirdeğe sahip yapıda olduğu tespit edilmiştir. Asimetrik çekirdeğe sahip yapıda oluşan en yüksek normal ve kayma şekil değiştirme değerlerinin homojen çekirdeğe sahip yapıya kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür [5]. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı darbe yükleri altındaki darbe cevabı sayısal ve deneysel olarak araştırılmış, sayısal modelde kademelendirilmiş bölgedeki lokal malzeme özelliklerinin hesaplanmasında Mori-Tanaka şeması ve plakaların elasto-plastik davranışlarını modelleyebilen TTO model kullanılmıştır. Sayısal analiz sonuçları, plaka kompozisyonunun seramik zenginden metal zengine değişmesiyle deneysel sonuçlarla daha yakın sonuçlar vermiştir [6].

YÖNTEM VE UYGULAMA

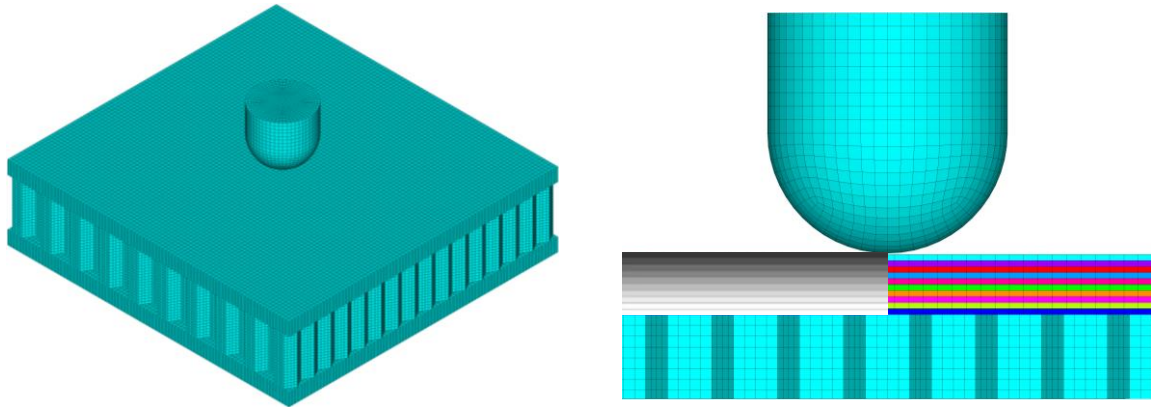
Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar ile desteklenmiş bal peteği sandviç yapıların düşük hızlı darbe cevabı LS-DYNA[®] sonlu elemanlar programı kullanılarak araştırılmıştır. Sandviç yapı oluşumunda, Al 6061 ve SiC bileşenlerinden oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş kompozit plakalar ve Al 3003-H19 alaşımı bal peteği kullanılmıştır. Sayısal modelleme için fonksiyonel kademelendirmiş malzemelerin mikro yapısını esas alan Mori-Tanaka homojenizasyon şeması [7-8] ve fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin elasto-plastik malzeme davranışını tanımlayabilen TTO (*Tamura-Tomota-Ozowa*) model [9] kullanılmıştır. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların elasto-plastik darbe cevabı ile ilgili yapılan çalışmada [6], Mori-Tanaka şeması ve TTO model sonlu elemanlar modeline başarılı bir şekilde adapte edilmiştir. Seramik ve metal bileşenlerden oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş destek plakalarının en alt yüzeyleri metal ve en üst yüzeylerinin de seramik-zengin olduğu kabul edilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka

Sonlu Elemanlar Modeli

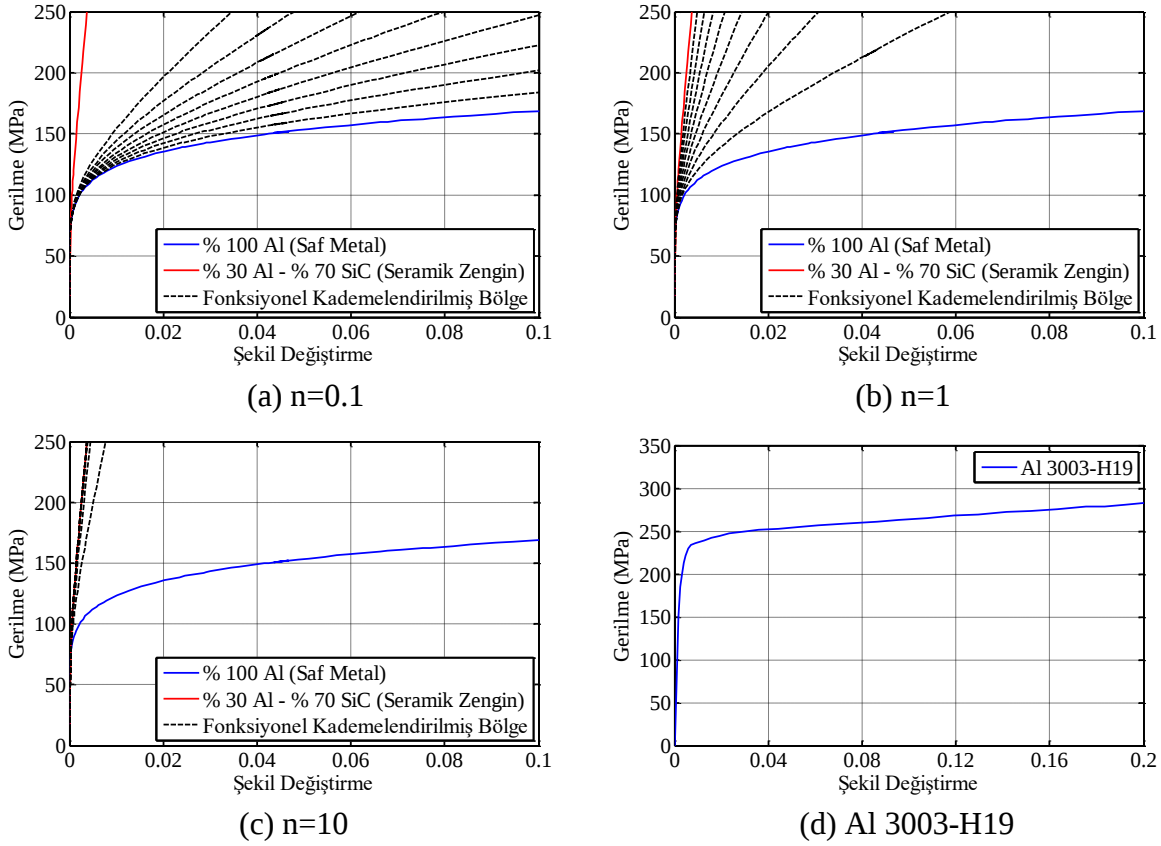
Sayısal modelleme LS-DYNA[®] sonlu elemanlar paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli, elasto-plastik sandviç yapı elemanları ve rijit vurucudan oluşmaktadır. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların sonlu elemanlar ağında 8 düğüm noktalı, 9 serbestlik dereceli katı eleman kullanılmış olup, plakalar 100x100 mm boyutlarına ve 5 mm kalınlığa sahiptir. Plakalar, kalınlık boyunca 10 katman ve % 100 metal katmandan % 70-30 seramik-metal katmana değişen şekilde modellenmiştir. Alüminyum bal peteğinin sonlu elemanlar ağında ise 4 düğüm noktalı, 12 serbestlik dereceli kabuk eleman ve Belytschko-Leviathan kabuk eleman formülasyonu kullanılmış olup, bal peteği 6.35 mm hücre çapı ve 18 mm yüksekliğe sahiptir. Çarpma analizleri, 20 mm çapında yarı küresel uçlu rijit vurucu ile gerçekleştirilmiştir. Sandviç yapının çarpma analizleri için geliştirilmiş sonlu elemanlar modeli Şekil 2' de gösterilmiştir.



Şekil 2. Sandviç yapı sonlu elemanlar modeli

Sandviç yapı elemanlarının elasto-plastik malzeme davranışını modelleyebilmek için MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY malzeme modeli kullanılmıştır. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların malzeme davranışı, LS-DYNA[®] kodu içine TTO model esas alınarak kullanıcı-tanımlı olarak tanımlanmış ve malzeme modeline adapte edilmiştir. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların farklı malzeme kompozisyonları ($n=0.1$ (*metal-zengin*), $n=1$ (*lineer-karışım*), $n=10$ (*seramik-zengin*)) için TTO model kullanılarak elde edilen

gerilme-şekil değiştirme eğrileri ve alüminyum bal peteğinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 3’ de ve fonksiyonel kademelendirilmiş plaka bileşenlerinin ve bal peteği malzemesinin mekanik özellikleri Çizelge 1’ de verilmiştir.



Şekil 3. Plakaların farklı malzeme kompozisyonları için gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a,b,c) ve bal peteği malzemesinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (d)

Çizelge 1. Plaka bileşenlerinin ve bal peteği malzemesinin mekanik özellikleri

Malzeme	Elastiklik Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)	Akma Gerilmesi (MPa)	Kopma Şekil Değiştirmesi
Al 6061	67	0.33	2702	95	0.74
SiC	302	0.17	3100	-	0.01
Al 3003-H19	70	0.33	2730	183	0.52

Çarpma analizlerinde temas modelinin tanımlanması önemli adımlardan biridir. Bu çalışmada, vurucu ve sandviç yapı arasında CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE temas algoritması tanımlanmıştır. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar ve alüminyum bal peteği ara yüzeyleri mükemmel yapışkan olarak kabul edilmiş ve yapışma yüzeylerine CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE temas algoritması tariflenmiştir. Son olarak, çarpma esnasında sandviç yapı elemanları arasında veya elemanların kendi içerisinde oluşabilecek olası etkileşimler için CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE temas algoritması tanımlanmıştır.

Sandviç yapıda, üst ve alt fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar seramik-zengin yüzeyler çarpma etkisini ilk karşılayacak şekilde konumlandırılmıştır. Alt plakanın hareketi tüm yönlerde sınırlandırılmış, üst plakanın ise yalnızca düşey yöndeki hareketi serbest bırakılmıştır. Vurucunun tüm eksenlerdeki dönme serbestliği ve çarpma eksenine dik olan eksenlerdeki hareketleri sınırlandırılmış ve çarpma yönündeki hareketi ise serbest bırakılmıştır.

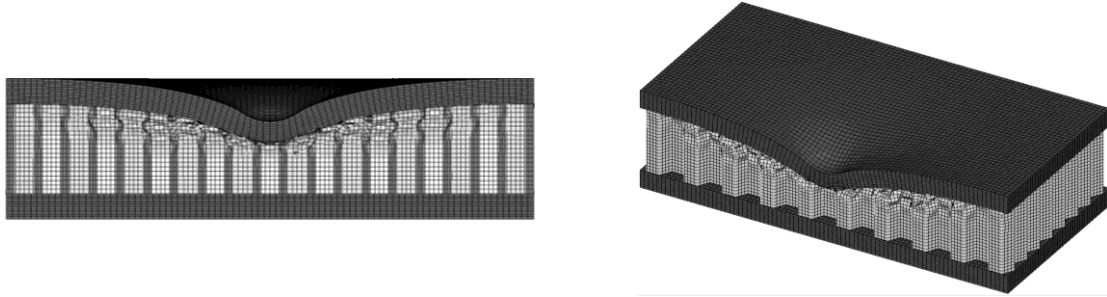
SAYISAL SONUÇLAR

Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar ve Al 3003-H19 bal peteği ile oluşturulan sandviç yapının darbe cevabı için fonksiyonel kademelendirilmiş destek plakaların malzeme kompozisyonunun (n) etkisi, çarpma hızının/enerjisinin (v , E) etkisi ve bal peteği hücre duvar kalınlığının (t) etkisi incelenmiştir.

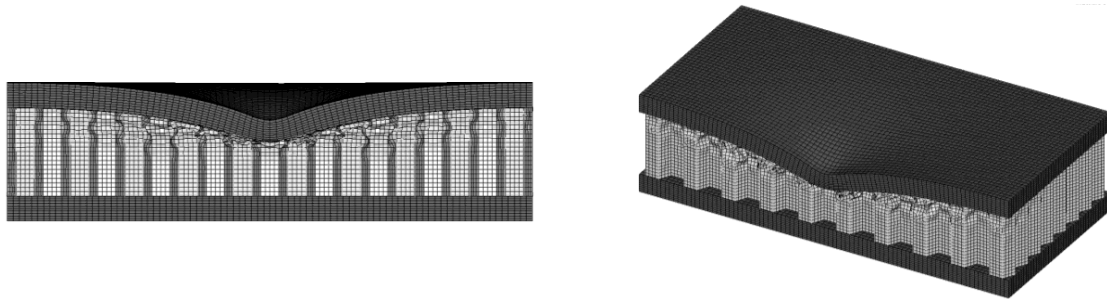
Malzeme Kompozisyonunun Etkisi

Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların malzeme kompozisyonunun sandviç yapının darbe cevabına etkisi, plakaların $n=0.1$ (metal-zengin), $n=1$ (lineer-karışım) ve $n=10$ (seramik-zengin) durumları için araştırılmıştır. Malzeme kompozisyonunun etkisi için çarpma hızı 8 m/s (161.44 J) ve bal peteği hücre duvar kalınlığı 70 mikron seçilmiştir. Çarpma etkisi sonucu sandviç yapıda oluşan deformasyonlar Şekil 4’ de gösterilmiştir. Plakaların malzeme kompozisyonunun metal-zengin durumdan seramik-zengin duruma değişmesiyle sandviç yapıda oluşan merkezi çökmeler azalmış ve sırasıyla 8.62 mm, 7.72 mm, 6.38 mm çökme değerleri oluşmuştur.

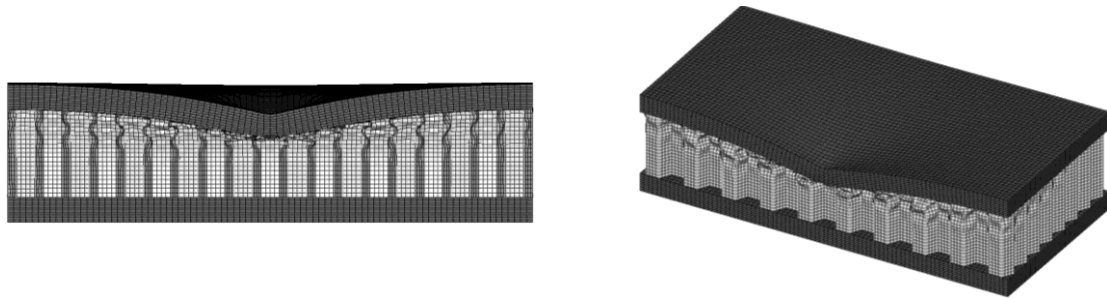
$v=8$ m/s ($E=161.44$ J), $t=70$ mikron



$n=0.1$ (metal-zengin)



$n=1$ (lineer-karışım)

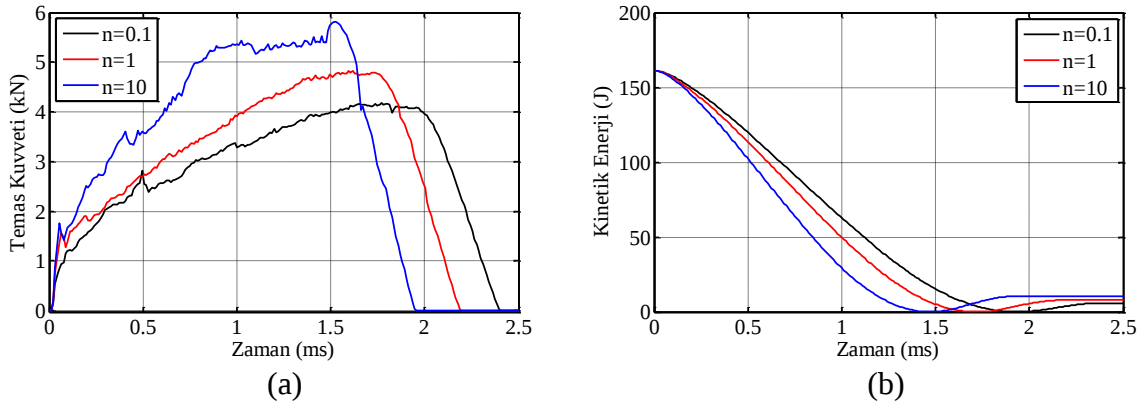


$n=10$ (seramik-zengin)

Şekil 4. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların farklı malzeme kompozisyonları için sandviç yapıda oluşan deformasyonlar

Plakaların seramik oranındaki artışa bağlı olarak yapının çarpma direnci artarken, oluşan plastik deformasyon miktarı ve merkezi çökme değerleri azalmıştır ve bu durum bal peteğinde oluşan deformasyonları etkilemiştir. Plakaların metal-zengin olması durumunda diğer malzeme kompozisyonlarına göre daha sünek bir yapıya sahip olduğu için bal peteğindeki deformasyonlar temas bölgesi ve civarında yoğunlaşırken, lineer-karışım ve seramik-zengin olması durumunda çarpma etkisi alt tabakalara hızlı bir şekilde ilerleyemediği için radyal yönde yayılmıştır. Buna bağlı olarak, burkulma deformasyonu oluşan hücre sayısı seramik-zengin plakalara sahip sandviç yapıda daha fazladır. Bu durum, özellikle $n=0.1$ ve $n=10$ malzeme kompozisyonları karşılaştırıldığında açıkça görülmektedir (Şekil 4).

Çarpma analizleri sonucu, malzeme kompozisyonunun temas kuvveti ve kinetik enerjideki zamana bağlı değişimlere etkisi Şekil 5’ de gösterilmiştir. Plakaların metal-zengin kompozisyonundan seramik-zengin kompozisyona değişmesiyle temas kuvveti artarken temas süresi azalmıştır (Şekil 5.a). Plakaların metal-zengin, lineer-karışım ve seramik-zengin olması durumunda sandviç yapıda oluşan en yüksek temas kuvveti değerleri sırasıyla 4.18 kN, 4.83 kN ve 5.81 kN’ dur. Bütün malzeme kompozisyonları için sandviç yapı çarpma enerjisinin büyük bir kısmını sönmülemiştir (Şekil 5.b). Plakalardaki seramik oranı azaldıkça yapının sönmülediği enerji değeri artmıştır. Sönmülenen enerji oranları metal-zengin durumdan seramik-zengin duruma sırasıyla % 96.4, % 95.1 ve % 93.5’ tir. Plakalardaki seramik oranı arttıkça yapıya etkiyen çarpma enerjisi daha erken sönmülenmiştir.



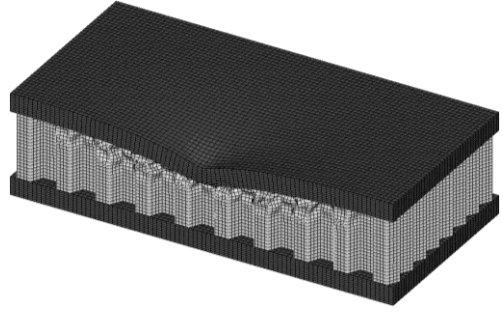
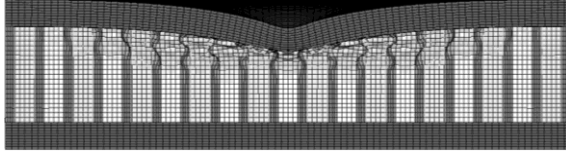
Şekil 5. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların malzeme kompozisyonundaki değişimin sandviç yapının darbe cevabına etkisi; (a) temas kuvveti, (b) kinetik enerji

Çarpma Hızının/Enerjisinin Etkisi

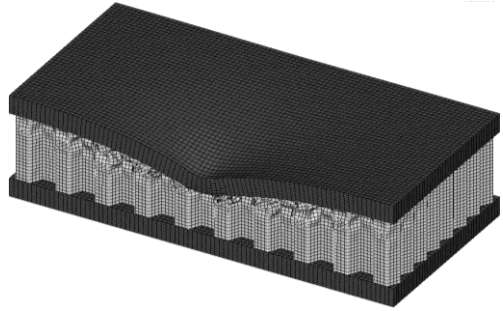
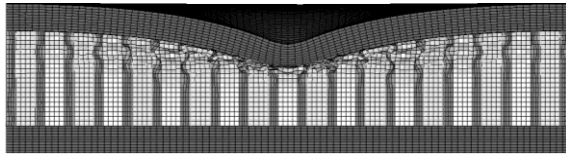
Çarpma analizleri 6 m/s, 8 m/s ve 10 m/s hız değerlerine karşılık gelen üç farklı enerji seviyesinde (90.81 J, 161.44 J ve 252.25 J) gerçekleştirilmiştir. Çarpma hızının/enerjisinin etkisi, plakaların lineer-karışım kompozisyonu ve 70 mikron hücre duvar kalınlığı için araştırılmıştır. Farklı enerji seviyeleri için sandviç yapıda oluşan deformasyonlar Şekil 6’ da gösterilmiştir. Çarpma enerjisinin artmasıyla sandviç yapıda oluşan merkezi çökme değerleri artmış ve artan enerji seviyesi için merkezi çökmeler sırasıyla 5.38 mm, 7.72 mm ve 10.04 mm olmuştur. Bal peteğinde oluşan burkulma deformasyonları artan çarpma enerjisiyle temas bölgesinden kenarlara doğru ilerlemiştir. En düşük enerji seviyesinde deformasyonlar temas bölgesi yakınlarında oluşurken en yüksek enerji seviyesinde daha geniş bir alanda etkili olmuştur.

Çarpma enerjisinin artışı ile oluşan en yüksek temas kuvveti değerleri artarken temas süreleri yaklaşık aynı kalmıştır (Şekil 7.a). Artan çarpma enerjisi ile oluşan en yüksek temas kuvveti değerleri sırasıyla 3.91 kN, 4.83 kN ve 5.75 kN’ dur. Sandviç yapının enerji sönmüleme oranları artan çarpma enerjisi için sırasıyla % 94.9, % 95.1 ve % 95.7’ dir (Şekil 7.b). Enerji seviyesinin artmasına karşılık sandviç yapının sönmülediği enerji oranları yaklaşık aynı kalmıştır.

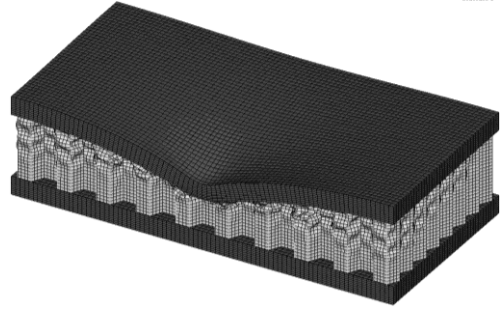
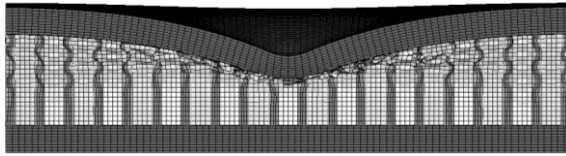
n=1, t=70 mikron



v=6 m/s (E=90.81 J)

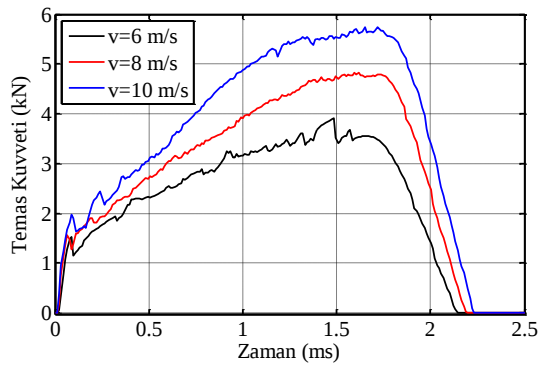


v=8 m/s (E=161.44 J)

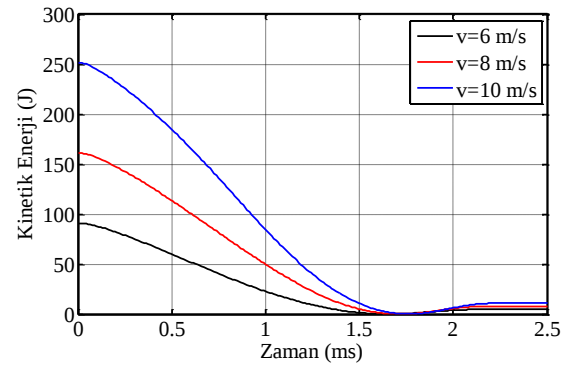


v=10 m/s (E=252.25 J)

Şekil 6. Farklı çarpma hızları/enerjileri için sandviç yapıda oluşan deformasyonlar



(a)



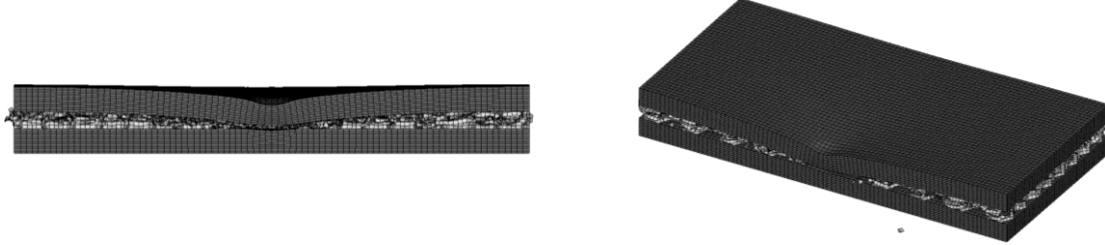
(b)

Şekil 7. Çarpma hızı/enerjisi değişiminin sandviç yapının darbe cevabına etkisi; (a) temas kuvveti, (b) kinetik enerji

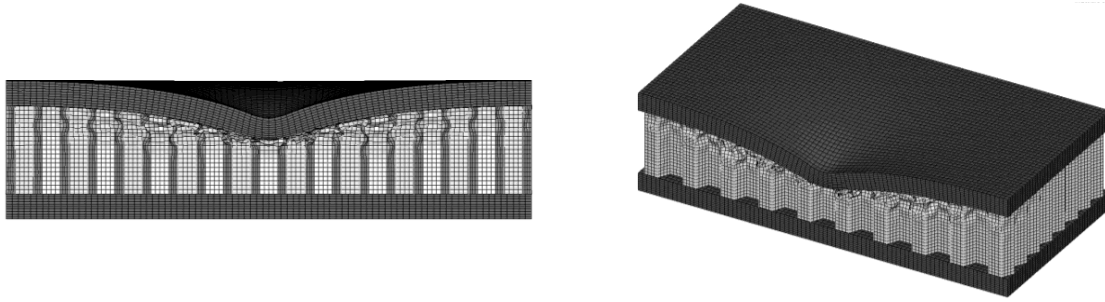
Bal Peteği Hücre Duvar Kalınlığının Etkisi

Bal peteği hücre duvar kalınlığının sandviç yapının darbe cevabına etkisi, 8 m/s (161.44 J) hız değerinde ve plakaların lineer-karışım kompozisyonu için araştırılmıştır. Bal peteği hücre duvar kalınlığının (t) 18 mikron, 70 mikron ve 100 mikron değerleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı hücre duvar kalınlıkları için sandviç yapıda oluşan deformasyonlar Şekil 8’ de gösterilmiştir.

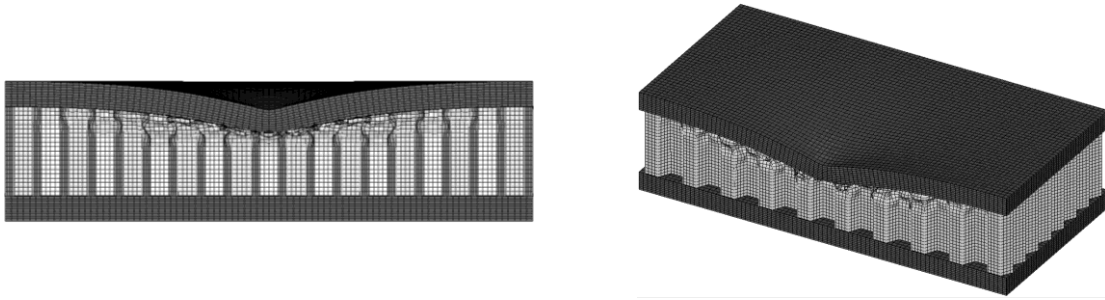
$v=8 \text{ m/s}$ ($E=161.44 \text{ J}$), $n=1$



$t=18 \text{ mikron}$



$t=70 \text{ mikron}$



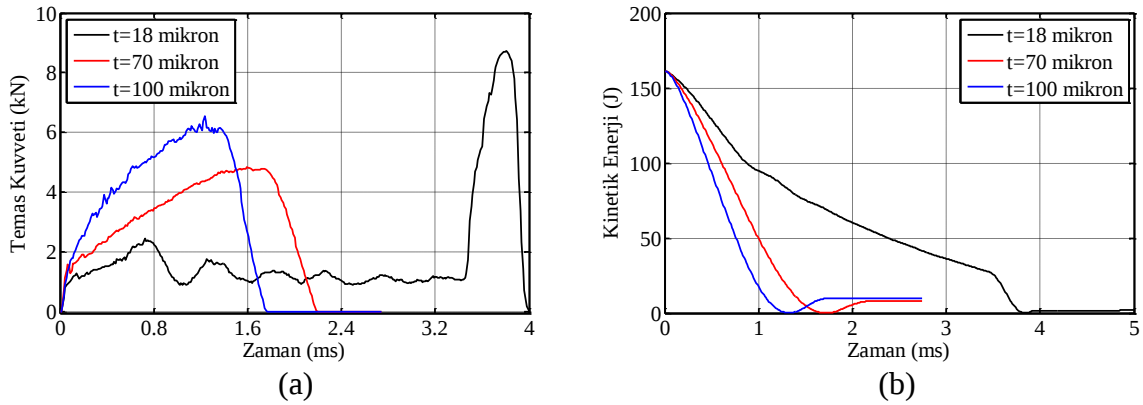
$t=100 \text{ mikron}$

Şekil 8. Bal peteğinin farklı hücre duvar kalınlıkları için sandviç yapıda oluşan deformasyonlar

Hücre duvar kalınlığı azaldıkça bal peteğinde oluşan plastik deformasyon ve çökme miktarındaki artışa bağlı olarak bal peteğinde oluşan burkulma deformasyonları artmaktadır. Hücre duvar kalınlığı azaldıkça temas bölgesinde yoğunlaşan deformasyon kenarlara doğru artmıştır. 100 mikron ve 70 mikron hücre duvar kalınlığına sahip yapılarda deformasyon üst plaka ve bal peteğinde oluşurken, 18 mikron hücre duvar kalınlığı için yapının stabilitesi bozulmuş ve bal peteği tamamen katlanarak vurucu alt plaka ile temas etmiştir. Hücre duvar kalınlığı azaldıkça bal peteğinin darbe dayanımı azalmıştır ve bunun sonucunda en küçük hücre duvar kalınlığında kalınlık boyunca oluşan burkulma deformasyonları sonucu bal peteği tamamen hasara uğramıştır. Hücre duvar kalınlığı azaldıkça sandviç yapıda oluşan merkezi çökme değerleri artmış ve sırasıyla 5.74 mm, 7.72 mm ve 18.2 mm çökme değerleri oluşmuştur.

Hücre duvar kalınlığının azalmasıyla yapıda oluşan en yüksek temas kuvveti de azalmıştır. (Şekil 9.a). Hücre duvar kalınlığının 18 mikron olması durumunda en yüksek temas kuvveti 8.74 kN değerine ulaşmıştır, ancak bu durum bal peteğinin tamamen ezilmesi ve vurucunun alt plaka ile temasa başlaması ile oluşmuştur. Vurucunun alt plaka ile teması 3.5 ms' den sonra başlamış ve bu andan itibaren temas kuvveti tekrar artmaya başlamıştır. 3.5 ms' ye kadar vurucu üst plaka ve özellikle bal peteğinde deformasyon oluşturmuş ve bu ana kadar bal peteğinde birbirini takip eden katlanmalar sonucu temas kuvveti dalgalı olarak değişmiştir. Sonuç olarak, temas kuvvetinin kıyaslanması açısından hücre duvar kalınlığının 18 mikron değeri için 3.5 ms' ye kadar olan kısmı dikkate alınmalıdır. Hücre duvar kalınlığının artmasıyla yapının rijitliği artmış ve en yüksek temas kuvveti değeri artarken temas süresi azalmıştır. Hücre duvar kalınlığının artmasıyla yapıda oluşan en yüksek temas kuvveti değerleri sırasıyla 2.44 kN (3.5 ms' lik kısımda), 4.83 kN ve 6.53 kN' dur.

Hücre duvar kalınlığı azaldıkça sandviç yapının enerji sönmleme oranı artmış ve sırasıyla % 93.9, % 95.1 ve % 98.9 değerlerini almıştır (Şekil 9.b). Ancak yapı enerji sönmleme kabiliyeti kazanırken darbe dayanımı azalmaktadır. Bu durum, 18 mikron hücre duvar kalınlığı için incelendiğinde açıkça görülmektedir. Sandviç yapı, çarpma enerjisinin yaklaşık olarak tamamını sönmlemlerken oluşan deformasyon miktarı diğer durumlara göre oldukça fazladır.



Şekil 9. Bal peteği hücre duvar kalınlığındaki değişimin sandviç yapının darbe cevabına etkisi; (a) temas kuvveti, (b) kinetik enerji

Sandviç yapı elemanlarının enerji sönmleme oranları her bir parametre için Çizelge 2' de detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 2. Farklı malzeme kompozisyonu, çarpma hızı/enerjisi ve bal peteği hücre duvar kalınlığı için sandviç yapı elemanlarının sönmlediği enerji oranları

	Malzeme Kompozisyonu ($v=8$ m/s, $t=70$ mikron)			Çarpma Hızı/Enerjisi ($n=1$, $t=70$ mikron)			Bal Peteği Hücre Duvar Kalınlığı ($n=1$, $v=8$ m/s)		
	0.1	1	10	6 m/s	8 m/s	10 m/s	18 mikron	70 mikron	100 mikron
Yüzey Plakaları	% 73.7	% 70.1	% 65.1	% 71.2	% 70.1	% 64.3	% 29.4	% 70.1	% 70.9
Bal Peteği	% 22.7	% 25.0	% 28.4	% 23.7	% 25.0	% 31.4	% 69.5	% 25.0	% 23.0
Vurucu Geri Sekme	% 3.6	% 4.9	% 6.5	% 5.1	% 4.9	% 4.3	% 1.1	% 4.9	% 6.1

SONUÇLAR

Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar ile desteklenmiş bal peteği sandviç yapıların düşük hızlı darbe yükleri altındaki davranışları; plakaların malzeme kompozisyonu, çarpma hızı/enerjisi ve bal peteği hücre duvar kalınlığı parametreleri için araştırılmıştır. Plakaların malzeme kompozisyonu metal-zengin durumdan seramik-zengin duruma değiştikçe yapının rijitliği artarken, yapıda oluşan merkezi çökme azalmaktadır. Yapının rijitliğinin artmasıyla beraber oluşan en yüksek temas kuvveti artarken temas süresi azalmaktadır. Seramik oranı arttıkça çarpma etkisi alt tabakalara hızlı bir şekilde ilerleyemediği için seramik-zengin plakalara sahip yapıda burkulma deformasyonuna uğrayan hücre sayısı artmaktadır. Çarpma hızının/enerjisinin artmasıyla yapıda oluşan deformasyon ve merkezi çökme değerleri artmaktadır. Artan çarpma enerjisi ile en yüksek temas kuvveti artmakta ve temas süresi yaklaşık aynı kalmaktadır. Bal peteği hücre duvar kalınlığının azalmasıyla bal peteğinde oluşan plastik deformasyon miktarı ve merkezi çökme değerleri artmaktadır. Buna bağlı olarak, hücre duvar kalınlığının azalmasıyla yapının darbe dayanımı da azalmıştır ve özellikle hücre duvar kalınlığının en küçük değeri için yapının stabilitesi bozulmuş ve bal peteği tamamen katlanarak deforme olmuştur. Hücre duvar kalınlığının artması yapının rijitliğini artıran bir etkiye sahiptir ve yapıda oluşan en yüksek temas kuvveti artarken temas süresi azalmaktadır. Sandviç yapı, incelenen her parametre için yapıya etkiyen çarpma enerjisinin büyük bir kısmını sönümlemiştir.

TEŞEKKÜR

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) 112M917 nolu araştırma projesi desteğinden dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] I. Ivanez, S. Sanchez-Saez, Numerical modelling of the low-velocity impact response of composite sandwich beams with honeycomb core, *Composite Structures*. 106 (2013) 716-723.
- [2] M. Meo, R. Vignjevic, G. Marengo, The response of honeycomb sandwich panels under low-velocity impact loading, *International Journal of Mechanical Sciences*. 47 (2005) 1301-1325.
- [3] M. A. Hazizan, W. J. Cantwell, The low velocity impact response of an aluminum honeycomb sandwich structure, *Composites:Part B*. 34 (2003) 679-687.
- [4] N. A. Apetre, B.V. Sankar, D.R. Ambur, Low-velocity impact response of sandwich beams with functionally graded core, *International Journal of Solids and Structures*. 43 (2006) 2479-2496.
- [5] E. Etemadi, A. A. Khatibi, M. Takaffoli, 3D finite element simulation of sandwich panels with a functionally graded core subjected to low velocity impact, *Composite Structures*. 89 (2009) 28-34.
- [6] R. Gunes, M. Aydin, M.K. Apalak, J.N. Reddy, Experimental and numerical investigations of low velocity impact on functionally graded circular plates, *Composites:Part B*. 54 (2014) 21-32.
- [7] T. Mori, K. Tanaka, Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions, *Acta Metallurgica*. 21 (1973) 571-574.
- [8] Y. Benveniste, A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite materials, *Mechanics of Materials*. 6 (1987) 147-157.
- [9] I. Tamura, Y. Tomota, H. Ozawa, Strength and ductility of Fe-Ni-C alloys composed of austenite and martensite with various strength, *Proceedings of the Third Conference on Strength of Metals and Alloys*. 1 (1973) 611-615.
- [10] Livermore Software Technology Corporation (LSTC), LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 971, 2009.