VI. ULUSAL HAVACILIK VE UZAY KONFERANSI
28-30 Eylül 2016, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli

UHUK-2016-129

FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ DAİRESEL PLAKALARIN KATMAN YAPISININ DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞINA ETKİSİ

Kemal Arslan[1]
Erciyes Üniversitesi, Kayseri

Recep Güneş[2]
Erciyes Üniversitesi, Kayseri

ÖZET

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, yapısında bulunan seramiğin sağladığı yüksek sertlik ve metalin sağladığı tokluk ve yapısal bütünlük ile darbe yüklerine karşı oldukça etkili bir çözüm olabilmektedir. Bu çalışmada, fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların katman yapısının düşük hızlı darbe davranışına etkisi, LS-DYNA® sonlu elemanlar programı kullanılarak farklı malzeme kompozisyonları (metal-zengin, lineer-karışım ve seramik-zengin) ve enerji seviyeleri (100 ve 300 J) için incelenmiştir. Plakaların kalınlığı ve toplam metal-seramik oranları sabit tutulup, yapı içerisinde bir ve iki defa kademelendirme yapılarak katman yapısı değiştirilmiştir. Plakaların kalınlık boyunca mekanik özelliklerinin bir kuvvet kanununa göre değiştiği kabul edilmiştir. Kademelendirilmiş bölgenin lokal malzeme özelliklerinin belirlenmesi için fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin mikro yapısını esas alan Mori-Tanaka şeması ve elasto-plastik malzeme davranışının tanımlanması için TTO (Tamura-Tomota-Ozawa) model kullanılmıştır. Plakaların darbe davranışı, temas kuvveti, deformasyon miktarı ve enerji sönümleme kapasitesi açısından karşılaştırılmıştır. Kademelendirme sayısının, temas kuvveti ve plastik deformasyon miktarı üzerinde etkili olduğu, plakaların enerji sönümleme kapasitesi üzerinde daha az etkili olduğu tespit edilmiştir. İncelenen bu parametreler, metal-zengin malzeme kompozisyonuna oranla lineer-karışım ve seramik-zengin malzeme kompozisyonları için daha etkili bir değişime sahip olmuştur.

GİRİŞ

Savunma amaçlı tasarlanan mühendislik yapılarının yanı sıra diğer mühendislik yapıları da üretim, bakım ve servis koşulları sırasında farklı darbe yüklerine maruz kalabilmektedir. Yapıların darbe cevabı, malzeme özellikleri ve çarpma şartları ile önemli derecede ilişkilidir. Kompozit yapıların darbe yükleri altında oluşan deformasyon ve hasar şekilleri oldukça karmaşık bir olaydır ve yapıya gelen çarpma enerjisi genellikle delaminasyon, matris çatlağı ve fiber kırılması gibi hasar şekillerine dönüşür. Darbe etkisiyle meydana gelen delaminasyon ve çatlaklar, çarpma şartlarına bağlı olarak gözle görülemeyen şekillerde oluşabilir [Abrate, 1998]. Bu durum, özellikle savunma, havacılık ve uzay sanayi gibi kritik uygulamalar açısından oldukça önemlidir. Çok katmanlı yapılarda, malzeme özelliklerinin katman sınırlarında ani olarak değişmesi sebebiyle, darbe yükleri altında yapının özelliklerini olumsuz yönde etkileyen delaminasyon hasarı meydana gelmektedir. Bu olumsuz etki, yapısındaki malzeme özellikleri değişiminin sürekli olduğu fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler kullanılarak azaltılabilir veya ortadan kaldırılabilir. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, yapısında bulunan seramiğin sağladığı yüksek sertlik ve metalin sağladığı tokluk ve yapısal bütünlük ile darbe yüklerine karşı oldukça etkili bir çözüm olabilmektedir. Bu yüzden, bu tür malzemelerin darbe cevabının bilinmesi önemli bir konudur. Yapılan bazı çalışmalarda, fonksiyonel kademelendirilmiş yapıların darbe yüklerine karşı deformasyon ve hasar açısından olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür [Apetre, 2006; Kubair, 2008; Etamadi, 2009]. Bu kapsamda, darbe yüklerine maruz fonksiyonel kademelendirilmiş yapıların darbe cevabının araştırılması ve bu tür yapıların farklı darbe yükleri altındaki davranışlarına göre malzeme ve geometrik özelliklerinin iyileştirilmesi önemli bir araştırma konusudur.

[1] Arş. Gör., Fen Bilimleri Enstitüsü, e-posta: karslan@erciyes.edu.tr
[2] Doç. Dr., Makine Mühendisliği, e-posta: recepg@ erciyes.edu.tr

Bu çalışmada, fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların katman yapısının düşük hızlı darbe davranışına etkisi, farklı malzeme kompozisyonları ve enerji seviyeleri için incelenmiştir. Plakaların kalınlığı ve toplam metal-seramik oranları sabit tutulup, yapı içerisinde bir ve iki defa kademelendirme yapılarak katman yapısı değiştirilmiştir. Plakaların darbe davranışı, temas kuvveti, deformasyon miktarı ve enerji sönümleme kapasitesi açısından karşılaştırılmıştır.

YÖNTEM

Farklı katman yapısına sahip Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı darbe davranışları, LS-DYNA® sonlu elemanlar programı kullanılarak incelenmiştir. Plakaların kademelendirilmiş bölgedeki malzeme özelliklerinin belirlenmesi için Mori-Tanaka şeması [Mori, 1973] ve elasto-plastik malzeme davranışının tanımlanması için TTO (Tamura-Tomota-Ozawa) model [Tamura, 1973] kullanılmıştır. Al 6061 ve SiC metal-seramik bileşenlerinden oluşan plakaların kademelendirilmesinde, en alt katmanın %100 metal ve en üst katmanın %30Al-%70SiC oranları ile seramik-zengin olduğu kabul edilmiştir (Şekil 1). Plakaların seramik ve metal bileşenlerinin hacimsel oranları arasındaki ilişki:

$$V_s + V_m = 1 \tag{1}$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada, V_s seramik bileşenin hacimsel oranını, V_m metal bileşenin hacimsel oranını göstermektedir.

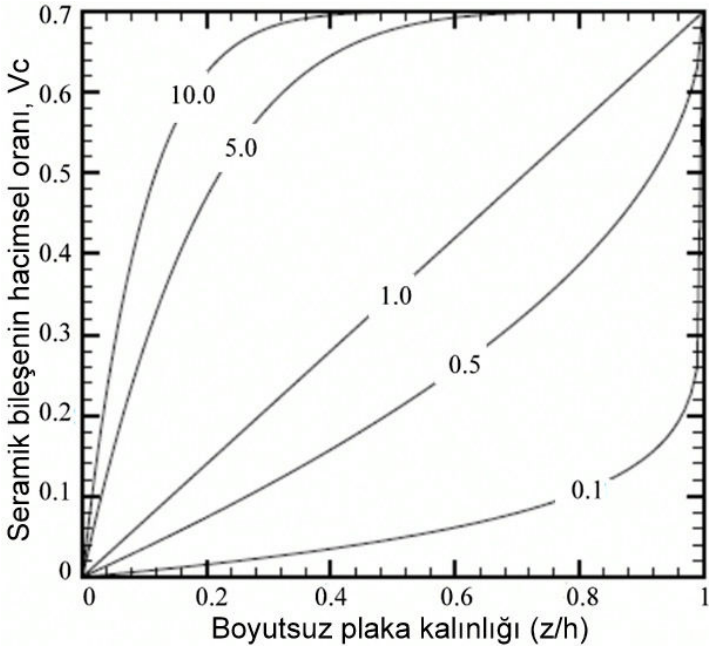


Şekil 1: Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka

Bileşimin oranı, plaka kalınlığı (h) boyunca konumun fonksiyonu olarak;

$$V_s(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^n \quad , \quad V_m(z) = 1 - V_s(z) \tag{2}$$

şeklinde ifade edilir. Burada, $V_s(z)$ ve $V_m(z)$ sırasıyla plakanın herhangi bir z mesafesindeki seramik ve metal bileşenlerin hacimsel oranı, h plaka kalınlığı, n bileşimin hacimsel değişimini lineer veya nonlineer olarak kontrol eden keyfi bir üstür. Bazı n değerleri için bileşimin hacimsel oranları Şekil 2' de gösterilmiştir. Bu çalışmada, metal-zengin (n = 0.1) , lineer-karışım (n = 1.0) ve seramik-zengin (n = 10.0) olmak üzere üç farklı malzeme kompozisyonu için inceleme yapılmıştır.



Şekil 2: Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların kalınlık boyunca farklı malzeme kompozisyonları için seramik bileşenin hacimsel oranı

Kademelendirilmiş bölgedeki lokal malzeme özelliklerinin hesaplanmasında, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin mikro yapısını esas alan Mori-Tanaka şeması kullanılmıştır. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin hacim modülü K ve kayma modülü G Mori-Tanaka şemasına göre şu şekilde hesaplanır:

$$\frac{K(z)-K_m}{K_s-K_m}=\frac{V_s}{\left[1+(1-V_s)\dfrac{3(K_s-K_m)}{3K_m+4G_m}\right]} \tag{3}$$

$$\frac{G(z)-G_m}{G_s-G_m}=\frac{V_s}{\left[1+(1-V_s)\dfrac{G_s-G_m}{G_m+f_1}\right]} \tag{4}$$

$$f_1=\frac{G_m(9K_m+8G_m)}{6(K_m+2G_m)} \tag{5}$$

Burada; K_m ve G_m metal malzemeler için sırasıyla hacim modülü ve kayma modülünü, benzer şekilde K_s ve G_s seramik malzemeler için hacim modülü ve kayma modülünü simgelemektedir. Kademelendirilmiş bölgenin elastiklik modülü E ve Poisson oranı v sırasıyla,

$$E(z)=\frac{9KG}{3K+G} \tag{6}$$

$$v(z)=\frac{3K-2G}{2(3K+G)} \tag{7}$$

eşitlikleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin elasto-plastik malzeme davranışları, Tamura vd. [Tamura, 1973] tarafından ortaya atılan TTO model kullanılarak tanımlanabilir. TTO model, iki bileşenli kompozitlerde, bileşenlerin ortalama tek eksenli gerilme (σ) ve şekil değiştirme (ε) değerleri kullanılarak elde edilen gerilme ve şekil değiştirme değerleri ile ilişkilidir.

$$\sigma=V_s\sigma_s+V_m\sigma_m \tag{8}$$

$$\varepsilon=V_s\varepsilon_s+V_m\varepsilon_m \tag{9}$$

TTO modelde, gerilme-şekil değiştirme transfer oranı (q) olarak isimlendirilen ve her bir katmanın gerilme-şekil değiştirme eğrisinin hesaplanmasında kullanılan bir parametre daha mevcut olup 0 ile ∞ arasında değişir. q parametresi şu şekilde hesaplanır:

$$q=\frac{\sigma_s-\sigma_m}{|\varepsilon_s-\varepsilon_m|} \tag{10}$$

q' nun sıfırdan farklı sonlu bir değeri, bileşenlerin etkilerini yaklaşık olarak yansıtabilir. q parametresi sayısal ve/veya deneysel yöntemlerle elde edilebilmektedir ve bu çalışmada deneysel yöntemle hesaplanan 4.8 GPa değeri kullanılmıştır [Gunes, 2014]. Metal-seramik esaslı kompozitlerin plastik deformasyon uygulamalarında, TTO model metal bileşen akmaya başlayınca kompozitin aktığını varsayar. Kompozitin akma gerilmesi, σ_y şu şekilde hesaplanır:

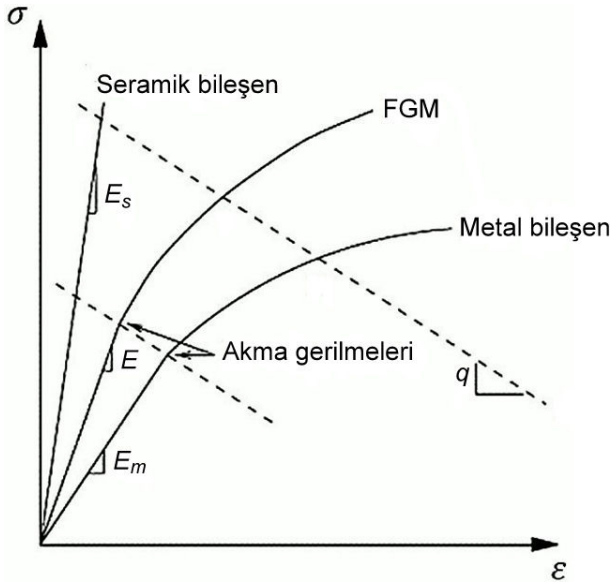
$$\sigma_y=\sigma_o\left[V_m+\frac{q+E_m}{q+E_s}\frac{E_s}{E_m}(1-V_m)\right] \tag{11}$$

σ_o, metalin akma gerilmesini göstermektedir. Kompozit için gerilme-şekil değiştirme ($\sigma-\varepsilon$) eğrisini veren parametrik denklemler şu şekilde tarif edilebilir:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}=\frac{V_sE}{q+E_s}\frac{\sigma_m}{\sigma_y}+\frac{(q+V_mE_s)}{q+E_s}\frac{E}{E_m}\frac{\sigma_o}{\sigma_y}\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_o}\right)^{n_o} \tag{12}$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_y}=\frac{V_mq+E_s}{q+E_s}\frac{\sigma_m}{\sigma_y}+\frac{V_sq}{q+E_s}\frac{E_s}{E_m}\frac{\sigma_o}{\sigma_y}\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_o}\right)^{n_o} \tag{13}$$

n_o, metalin pekleşme katsayısını göstermektedir ve bu çalışmada 7.35 değeri kullanılmıştır [Gunes, 2014]. Şekil 3' de TTO model ile tariflenen bir kompozit malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrisi şematik olarak gösterilmiştir.

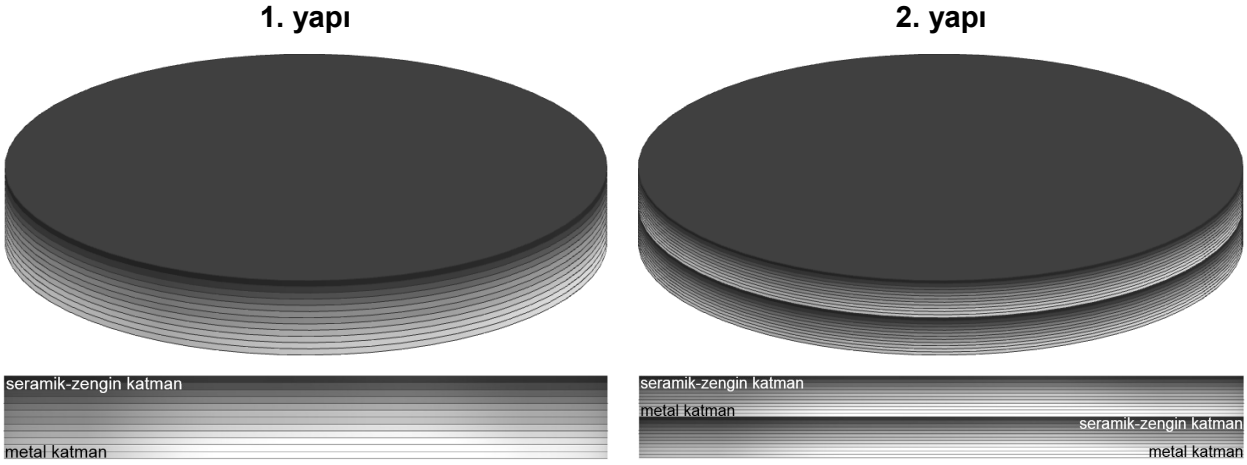


Şekil 3: TTO model ile elde edilen şematik gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin darbe yükleri altındaki elasto-plastik deformasyon uygulamaları için TTO modelin kullanılabilirliği ile ilgili Gunes vd. [Gunes, 2014] tarafından deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirilmiş ve TTO model seramik-zengin kompozisyona oranla metal-zengin ve lineer-karışım kompozisyonları için daha başarılı sonuçlar vermiştir. Malzeme kompozisyonunun metal-zenginden seramik-zengine değişmesiyle deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki sapma miktarı artmıştır. Bu çalışmada ise, aynı plaka bileşenleri ve malzeme özellikleri kullanılarak, katman yapısının fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların darbe davranışına etkisi sayısal olarak araştırılmıştır.

Problemin Tarifi

Farklı katman yapısının, fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı darbe davranışına etkisi, iki farklı katman yapısı için incelenmiştir. Plakalar, 90 mm çap ve 12 mm kalınlık dikkate alınarak modellenmiştir. Birinci yapı, plakanın 12 katman ile bir defa kademelendirilmesi ve ikinci yapı, plakanın 12 katman ile iki defa kademelendirilmesi ile oluşturulan yapılardır (Şekil 4).



Şekil 4: Farklı katman yapılarına sahip fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalar

İki yapı için de toplam plaka kalınlığı ve toplam metal-seramik oranları sabit kalırken, katman sayıları farklı olmaktadır. Yapılar sırasıyla, 12 ve 24 katmandan oluşmaktadır. Plakaların düşük hızlı darbe davranışları, 20 mm çapında ve 5.045 kg kütleli yarı küresel uçlu rijit vurucu darbesi

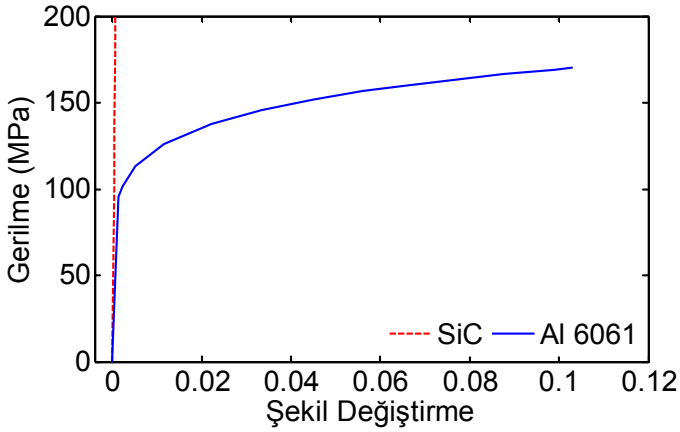
etkisi altında incelenmiştir. Katman yapısının etkisi, üç farklı malzeme kompozisyonu (metal-zengin, lineer-karışım ve seramik-zengin) ve iki farklı enerji seviyesi (100 ve 300 J) için incelenmiştir. Sayısal analiz sonuçlarının incelenmesinde, farklı parametrelerin çizelge ve grafiksel karşılaştırmaları için bir kodlama yapılmıştır. Örnek kodlama gösterimi şu şekildedir: **n1-E100-1**. Burada; ilk kısım malzeme kompozisyonunu (lineer-karışım), ikinci kısım enerji seviyesini (100 J) ve üçüncü kısım katman yapısını (1. yapı) göstermektedir.

Sonlu Elemanlar Modeli

Sayısal modelleme, LS-DYNA® sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Plakaların elasto-plastik malzeme davranışı, TTO model tabanlı kullanıcı-tanımlı olarak sonlu elemanlar koduna tanımlanmış ve MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY malzeme modeline adapte edilmiştir. Plaka bileşenlerinin malzeme özellikleri ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri sırasıyla Çizelge 1 ve Şekil 5' de verilmiştir [Gunes, 2014]. Vurucunun rijit malzeme davranışı MAT_RIGID malzeme modeli ile tanımlanmıştır.

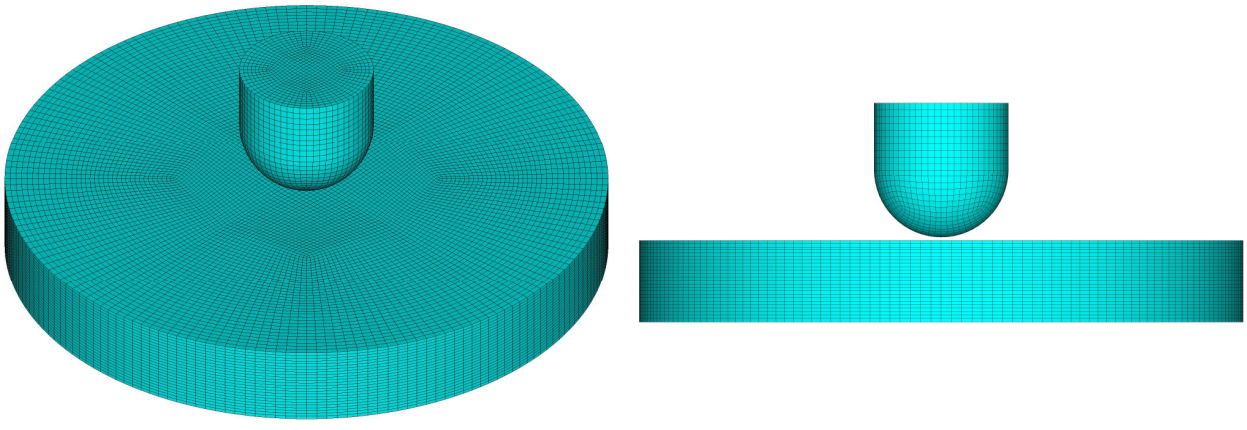
Çizelge 1: Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka bileşenlerinin malzeme özellikleri

Malzeme	Elastiklik Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m^3)	Akma Gerilmesi (MPa)	Kopma Şekil Değiştirmesi
Al 6061	67	0.33	2702	95	0.85
SiC	302	0.17	3100	-	0.01



Şekil 5: Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka bileşenlerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka ve rijit vurucunun sonlu elemanlar ağında 8 düğüm noktalı ve 9 serbestlik dereceli katı eleman kullanılmıştır. Plaka ve vurucunun sonlu elemanlar modeli Şekil 6' da gösterilmiştir. Plakanın alt ve üst kısmından 20 mm' lik bölgeler sabitlenmiş ve seramik-zengin yüzey çarpma yüzeyi olarak konumlandırılmıştır.

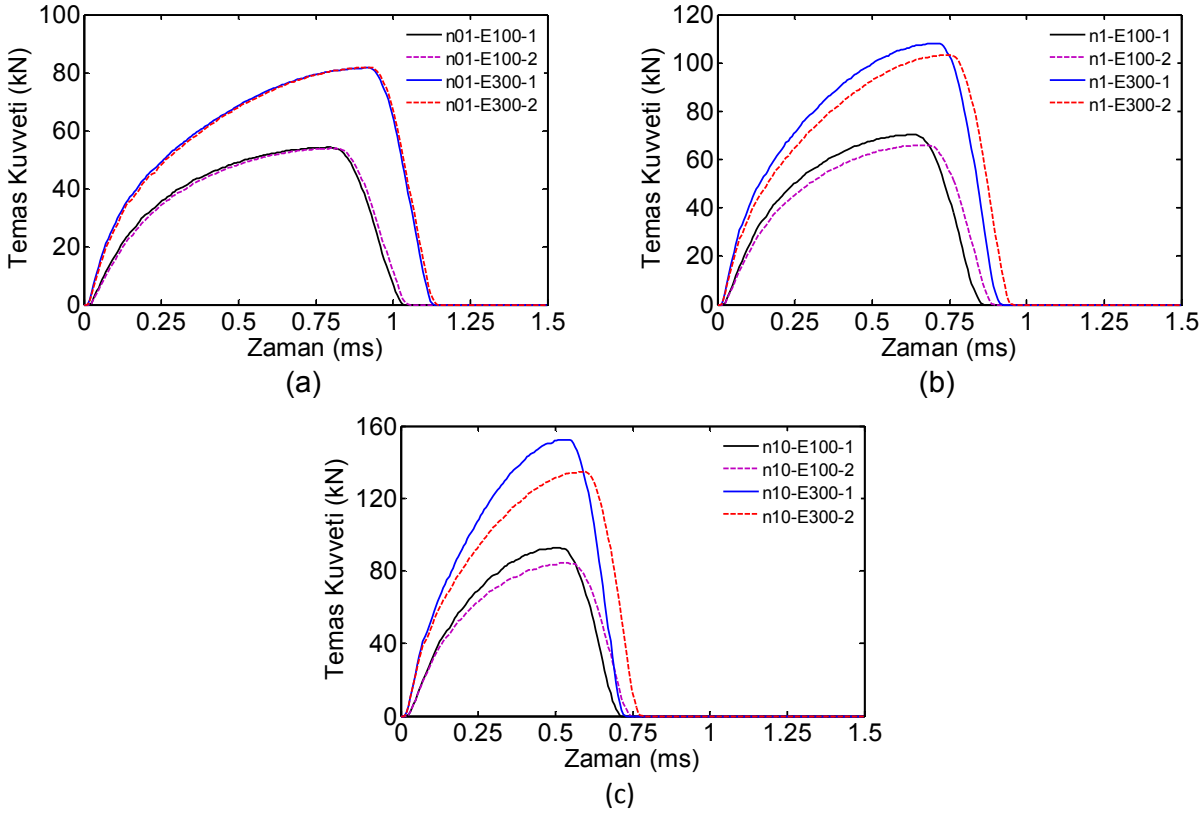


Şekil 6: Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka ve vurucunun sonlu elemanlar modeli

UYGULAMALAR

Farklı katman yapısına sahip Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı darbe davranışları, iki farklı katman yapısı için farklı malzeme kompozisyonları ve enerji seviyelerinde temas kuvveti değişimi, deformasyon miktarı ve enerji sönümleme kapasitesi açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Plakaların kalınlığı ve toplam metal-seramik oranları sabit tutulup, yapı içerisinde bir ve iki defa kademelendirme yapılarak katman yapısı değiştirilmiştir. Katman yapısının etkisi, üç farklı malzeme kompozisyonu (n = 0.1, n = 1.0 ve n = 10.0) ve iki farklı enerji seviyesi (100 ve 300 J) için incelenmiştir.

Farklı malzeme kompozisyonları için katman yapısının (kademelendirme sayısının) temas kuvveti değişimine etkisi Şekil 7' de gösterilmiştir. Malzeme kompozisyonunun metal-zenginden seramik-zengine değişmesi ile sertlik ve rijitlik arttığı için temas kuvveti artmış, temas süresi azalmıştır.



Şekil 7: Katman yapısının temas kuvveti değişimine etkisi; (a) metal-zengin, (b) lineer-karışım, (c) seramik-zengin

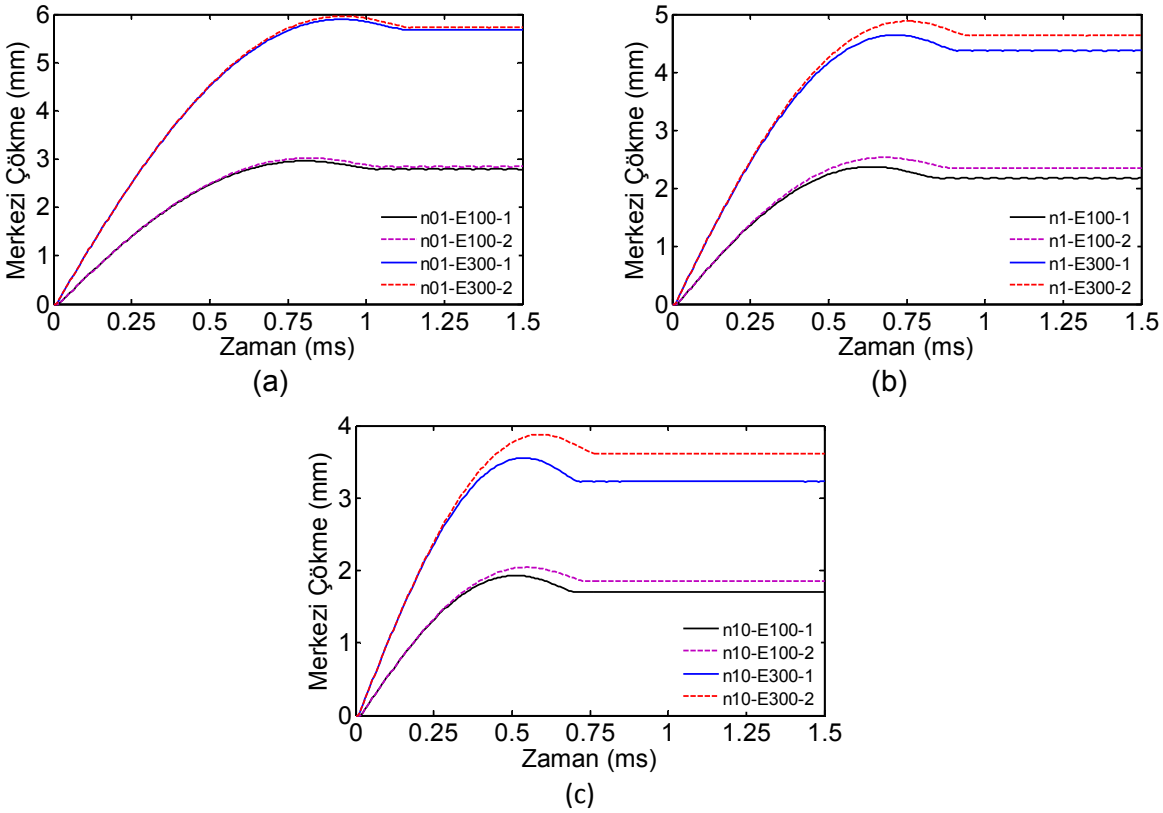
Plakalarda oluşan en yüksek temas kuvvetleri; malzeme kompozisyonu, enerji seviyesi ve katman yapısı için karşılaştırmalı olarak Çizelge 2' de verilmiştir.

Çizelge 2: Plakalarda oluşan en yüksek temas kuvvetleri

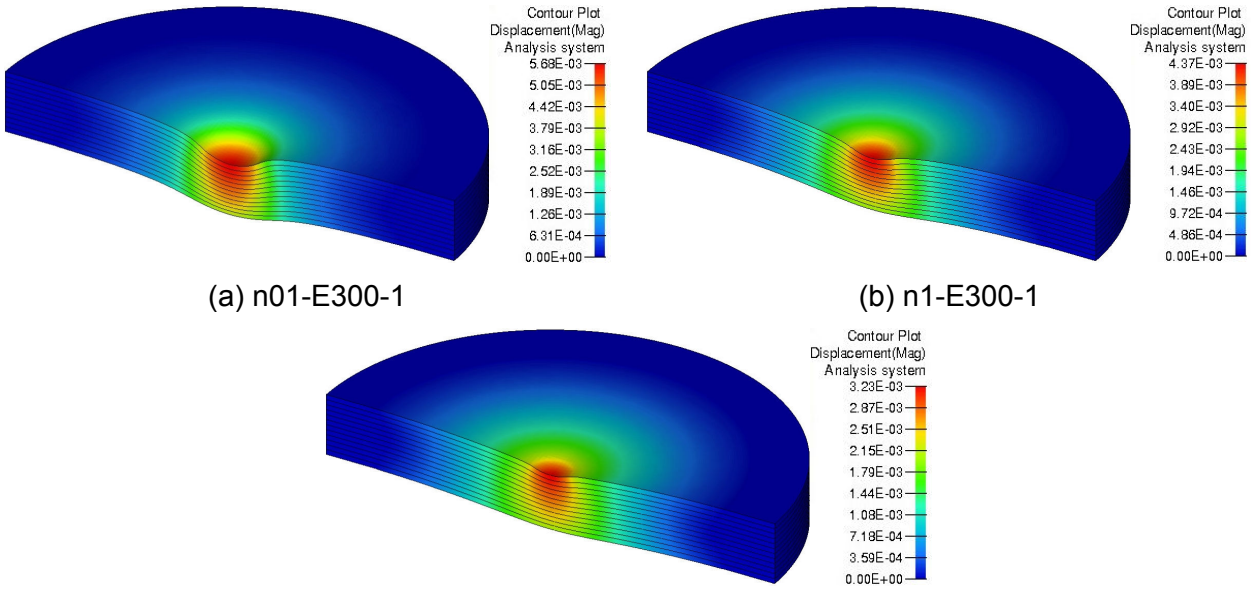
Plaka tanımı	En yüksek temas kuvveti	Plaka tanımı	En yüksek temas kuvveti	Plaka tanımı	En yüksek temas kuvveti
n01-E100-1	54.2 kN	n1-E100-1	70.3 kN	n10-E100-1	93.0 kN
n01-E100-2	53.9 kN	n1-E100-2	66.0 kN	n10-E100-2	84.5 kN
n01-E300-1	81.7 kN	n1-E300-1	108.1 kN	n10-E300-1	152.6 kN
n01-E300-2	81.7 kN	n1-E300-2	103.3 kN	n10-E300-2	135.0 kN

Kademelendirme sayısının artması, metal-zengin kompozisyon için temas kuvvetinde etkili bir değişime sebep olmazken, lineer-karışım ve seramik-zengin kompozisyonlar için temas kuvveti azalmıştır. Kademelendirme sayısının artması ile temas kuvvetinde oluşan azalma, lineer-karışım ve seramik-zengin kompozisyonlar için 100 J enerji seviyesinde sırasıyla %6.1 ve %9.1; 300 J enerji seviyesinde sırasıyla %4.4 ve %11.5 olarak tespit edilmiştir.

Farklı malzeme kompozisyonları için katman yapısının merkezi çökme değişimi ve kalıcı çökme miktarına etkisi Şekil 8' de gösterilmiştir. Malzeme kompozisyonunun metal-zenginden seramik-zengine değişmesiyle plakaların nüfuziyet direncinin artması sonucu kalıcı çökme miktarı azalmıştır. Malzeme kompozisyonunun kalıcı çökme miktarına etkisi, 300 J enerji seviyesi ve 1. katman yapısı için Şekil 9' da gösterilmiştir.



Şekil 8: Katman yapısının merkezi çökme değişimi ve kalıcı çökme miktarına etkisi; (a) metal-zengin, (b) lineer-karışım, (c) seramik-zengin



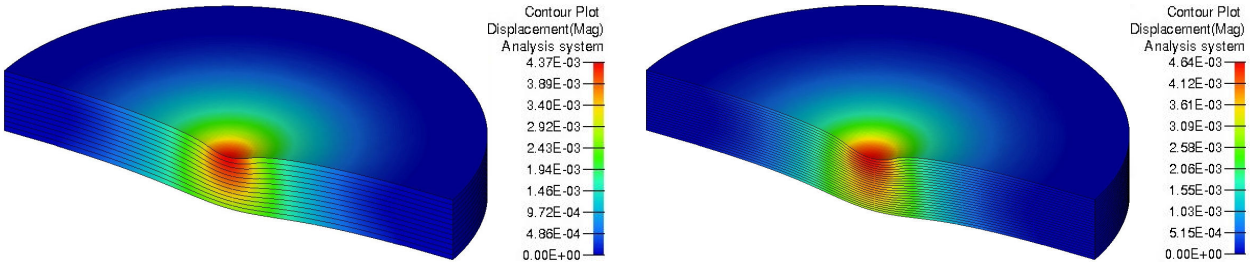
Şekil 9: Malzeme kompozisyonunun kalıcı çökme miktarına etkisi (300 J ve 1. katman yapısı)

Plakalarda oluşan kalıcı çökme miktarları; malzeme kompozisyonu, enerji seviyesi ve katman yapısı için karşılaştırmalı olarak Çizelge 3' de verilmiştir.

Çizelge 3: Plakalarda oluşan kalıcı çökme miktarları

Plaka tanımı	Kalıcı çökme	Plaka tanımı	Kalıcı çökme	Plaka tanımı	Kalıcı çökme
n01-E100-1	2.79 mm	n1-E100-1	2.17 mm	n10-E100-1	1.70 mm
n01-E100-2	2.85 mm	n1-E100-2	2.35 mm	n10-E100-2	1.85 mm
n01-E300-1	5.68 mm	n1-E300-1	4.37 mm	n10-E300-1	3.23 mm
n01-E300-2	5.72 mm	n1-E300-2	4.64 mm	n10-E300-2	3.61 mm

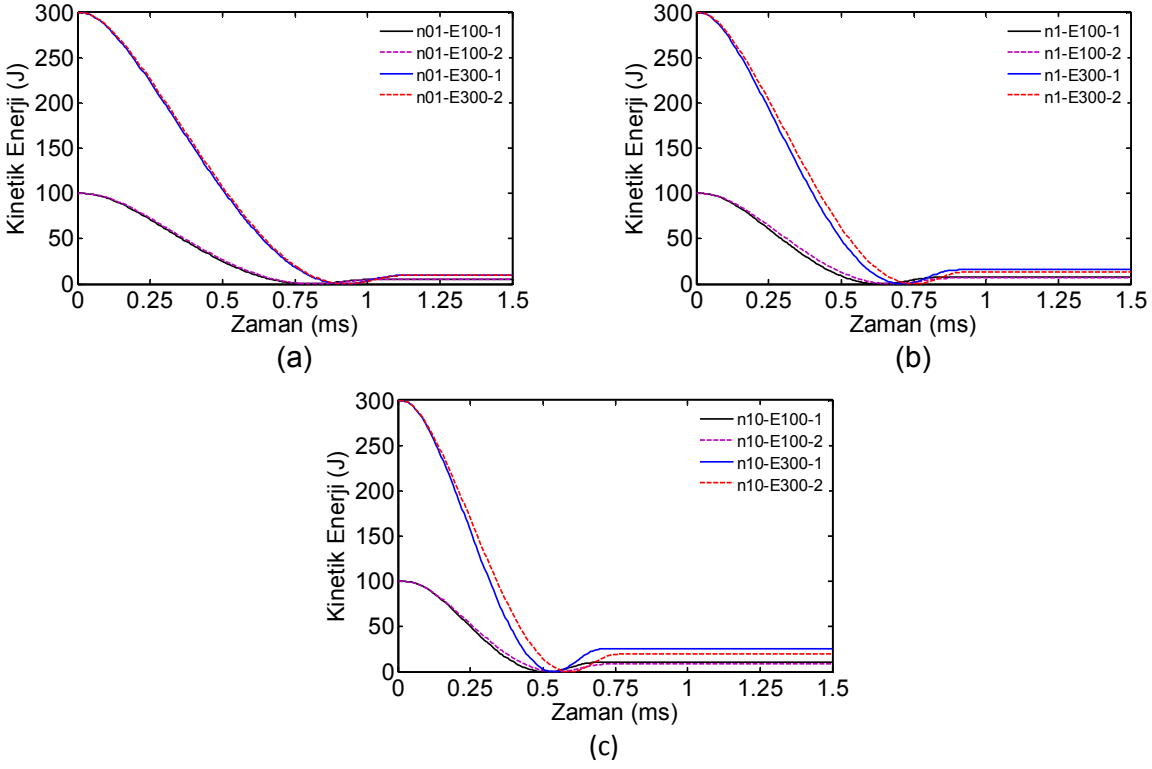
Kademelendirme sayısının artması, plakaların nüfuziyet direncini azaltmış ve bütün malzeme kompozisyonları için kalıcı çökme miktarında artmaya sebep olmuştur. Kademelendirme sayısının kalıcı çökme miktarına etkisi, lineer-karışım kompozisyonu ve 300 J enerji seviyesi için Şekil 10' da gösterilmiştir. Kademelendirme sayısının artması ile kalıcı çökme miktarında oluşan artma oranı, malzeme kompozisyonunun metal-zenginden seramik zengine değişimi ile artmıştır. 100 J enerji seviyesi için malzeme kompozisyonunun metal-zenginden seramik-zengine değişimi ile oluşan artma oranları sırasıyla %2.2, %8.3 ve %8.8; 300 J enerji seviyesi için malzeme kompozisyonunun metal-zenginden seramik-zengine değişimi ile oluşan artma oranları sırasıyla %0.7, %6.2 ve %11.8 olarak elde edilmiştir.



(a) n1-E300-1 (b) n1-E300-2

Şekil 10: Kademelendirme sayısının kalıcı çökme miktarına etkisi (n=1.0 ve 300 J)

Farklı malzeme kompozisyonları için katman yapısının enerji sönümleme kapasitesine etkisi Şekil 11' de gösterilmiştir. Malzeme kompozisyonunun seramik-zenginden metal-zengin kompozisyona değişmesiyle plastik deformasyon kabiliyetinin artması sonucu plakaların enerji sönümleme oranları artmıştır.



Şekil 11: Katman yapısının enerji sönümleme kapasitesine etkisi; (a) metal-zengin, (b) lineer-karışım, (c) seramik-zengin

Plakaların enerji sönümleme oranları; malzeme kompozisyonu, enerji seviyesi ve katman yapısı için karşılaştırmalı olarak Çizelge 4' de verilmiştir.

Çizelge 4: Plakaların enerji sönümleme oranları

Plaka tanımı	Enerji sönümleme oranı	Plaka tanımı	Enerji sönümleme oranı	Plaka tanımı	Enerji sönümleme oranı
n01-E100-1	%95.0	n1-E100-1	%92.4	n10-E100-1	%89.2
n01-E100-2	%95.1	n1-E100-2	%93.4	n10-E100-2	%91.3
n01-E300-1	%96.8	n1-E300-1	%94.8	n10-E300-1	%91.4
n01-E300-2	%96.9	n1-E300-2	%95.5	n10-E300-2	%93.5

Kademelendirme sayısının artması, plakalarda oluşan plastik deformasyon miktarını artırdığı için enerji sönümleme oranını da artırmıştır. Enerji sönümleme oranındaki bu artış metal-zengin kompozisyon için her iki enerji seviyesinde de etkili bir değişime sebep olmamıştır. Diğer malzeme kompozisyonları için de enerji sönümleme oranları arasında oluşan en büyük fark her iki enerji seviyesi açısından %2.5' den daha küçüktür. Kademelendirme sayısının artışı, plakaların enerji sönümle oranı üzerinde etkili bir değişime sebep olmamıştır. Enerji seviyesi arttıkça plakaların enerji sönümleme oranları artmıştır, ancak enerji seviyesinin artması ile katman yapıları arasında oluşan enerji sönümleme farkları azalmıştır.

SONUÇ

Farklı katman yapısına sahip Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı darbe davranışları, iki farklı katman yapısı için üç farklı malzeme kompozisyonu (n = 0.1, n = 1.0 ve n = 10.0) ve iki farklı enerji seviyesinde (100 ve 300 J) temas kuvveti değişimi, deformasyon miktarı ve enerji sönümleme kapasitesi açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Plakaların kalınlığı ve toplam metal-seramik oranları sabit tutulup, yapı içerisinde bir ve iki defa kademelendirme yapılarak katman yapısı değiştirilmiştir.

Malzeme kompozisyonunun metal-zenginden seramik-zengine değişmesi ile sertlik ve rijitlik arttığı için temas kuvveti artmış, temas süresi azalmıştır. Kademelendirme sayısının artması, metal-zengin kompozisyon için temas kuvvetinde etkili bir değişime sebep olmazken, lineer-karışım ve seramik-zengin kompozisyonlar için temas kuvveti azalmıştır.

Malzeme kompozisyonunun metal-zenginden seramik-zengine değişmesiyle plakaların nüfuziyet direncinin artması sonucu kalıcı çökme miktarı azalmıştır. Kademelendirme sayısının artması, plakaların nüfuziyet direncini azaltmış ve bütün malzeme kompozisyonları için kalıcı çökme miktarında artmaya sebep olmuştur.

Malzeme kompozisyonunun seramik-zenginden metal-zengin kompozisyona değişmesiyle plastik deformasyon kabiliyetinin artması sonucu plakaların enerji sönümleme oranları artmıştır. Kademelendirme sayısının artması, plakalarda oluşan plastik deformasyon miktarını artırdığı için enerji sönümleme oranını da artırmıştır. Ancak, bütün malzeme kompozisyonları için enerji sönümleme oranları arasında oluşan en büyük fark her iki enerji seviyesi açısından %2.5' den daha küçüktür. Kademelendirme sayısındaki artışın, plakaların enerji sönümle oranı üzerinde etkili bir parametre olmadığı görülmüştür.

Kaynaklar

Abrate, S., 1998. Impact on composite structures. Cambridge University Press, New York.

Apetre, N.A., Sankar B.V., Ambur D.R., 2006. Low-velocity impact response of sandwich beams with functionally graded core. International Journal of Solids and Structures, 43: 2479-2476.

Etemadi, E., Khatibi, A.A., Takaffoli, M., 2009. 3D finite element simulation of sandwich panels with a functionally graded core subjected to low velocity impact. Composite Structures, 89: 28-34.

Kubair, D.V., Lakshmana, B.K., 2008. Cohesive modeling of low-velocity impact damage in layered functionally graded beams. Mechanics Research Communications, 35: 104-114.

Gunes, R., Aydin, M., Apalak, M.K., Reddy, J.N., 2014. Experimental and numerical investigations of low velocity impact on functionally graded circular plates. Composites: Part B, 59: 21-32.

Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2009. LS-DYNA® Keyword Users' s Manual, Version 971.

Mori, T., Tanaka, K., 1973. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclucions. Acta Metallurgica, 21: 571-574.

Tamura, I., Tomota, Y., Ozawa, M., 1973. Strength and ductility of Fe-Ni-C alloys composed of austenite and martensite with various strength. Proceedings of Third Conference on Strength of Metals and Alloys, Cambridge.