

E-CAMI/EPOKSİ TABAKALI KOMPOZİTLERDE DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

İbrahim YAPICI ve Ahmet YAPICI*

Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Mustafa Kemal Üniversitesi, 31200, İskenderun, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada düşük hızlı darbeye maruz E-camı/epoksi kompozit levhaların dinamik cevabı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Darbe uygulanacak kompozit levha $140 \times 140 \times 3$ mm ebatlarında, 16 tabakalı ve $[0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_s$ oryantasyon dizilişine sahip olacak şekilde modellenmiştir. Vurucu kütlesi 17 kg'dır. Darbe ucu 24 mm çapında ve yarı küresel uçlu bir geometriye sahiptir. Darbe testleri 2 m/s, 2.5 m/s, 3 m/s, 3.5 m/s, 4 m/s'lik çarpma hızlarında yapılmıştır. Kullanılan kompozit levha dört tarafı ankastre olarak ve üzerine uygulanan darbe levhanın merkezine gelecek şekilde uygulanmıştır. Yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda; hız-zaman, ivme-zaman, kuvvet-zaman, yer değiştirme-zaman ve kinetik enerji-zaman değişimleri grafikler halinde verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düşük hızlı darbe, tabakalı kompozit, sonlu elemanlar yöntemi

AN INVESTIGATION OF LOW VELOCITY IMPACT BEHAVIOR OF E-GLASS/EPOXY LAMINATED COMPOSITES USING FINITE ELEMENT METHOD

ABSTRACT

In this study, the dynamic response of composite laminated plates, subjected to low-velocity impact, was investigated by using finite elements method. The composite model was 16 plies with a stacking sequence of $[0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_s$ and 140 mm x 140 mm x 3 mm in dimension. The total mass with the impactor was 17 kg. The specimen was clamped at all edges and impacted by an impactor with a 16 mm diameter hemispherical head. The analyses were performed at 2 m/s, 2.5 m/s, 3 m/s, 3.5 m/s and 4 m/s velocities. The results of velocity-time, acceleration-time, force-time, displacement-time and kinetic energy-time were given in graphics.

Keywords: Low velocity impact, laminated composite, finite element method

* Tel+90 (326) 6135600 (4438); fax: +90 (326) 6135613 e-mail: yapiciahmet@gmail.com

1. GİRİŞ

Tabakalı kompozitler birçok mühendislik alanında kullanılır ve yabancı cisimler tarafından darbeye maruz kalabilirler. Darbeden kaynaklanan hasar, üretim, bakım ve servis işlemleri sırasında ortaya çıkabilir. Kullanım sırasındaki darbeye örnek olarak uçağın kalkış ve iniş sırasında lastiklerin yüksek hız kazanmasından sonra pistten fırlayan taş ve küçük parçacıkların yaptığı darbe verilebilir. Üretim ve bakım sırasında kullanılan takımlar yapı üzerine düşürülebilir. Bu durumda darbe hızları küçük fakat etkisi büyüktür. Tabakalı kompozit yapılar benzer metalik yapılara nazaran darbe hasarına daha duyarlıdır. Kompozit yapılarda darbe gözle muayenede belirlenemeyen iç hasarlar oluşturur. Bu iç hasar mukavemette azalmaya sebep olur ve yük altında büyür. Bu nedenle kompozit yapılar üzerine yabancı cisim darbelerinin etkileri anlaşılmalıdır ve tasarım aşamasında uygun önlemler dikkate alınmalıdır. Darbelerin kompozit yapıların performansına etkileri kompozit malzemelerin kullanımında kısıtlayıcı bir etkidir. Bu nedenlerle kompozit malzemelerin düşük hızlardaki darbe problemi önemli pratik ve teorik uygulamaları temsil eder [1].

Tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe cevabı analitik olarak Ramkuar ve Chen [2], Abatan ve arkadaşları [3] tarafından araştırılmıştır. Gong ve Lam [4] tarafından düşük hızlı darbeye karşı plaka cevabının önceden tahmin edilmesi için yaklaşık bir çözüm sunulmuştur. Bu çözüm, temas kuvveti ve enine kayma şekil değiştirmesinin etkisi gibi plakanın ve takviye elemanlarının beraberce hareketlerini içerir. Hibrit tabakalı kompozit plakaların düşük hızlı darbeye bağlı cevabı kayma deformasyon teorisi kullanılarak Lee ve arkadaşları [5] tarafından araştırılmıştır. Kim ve Kang [6] darbe kuvvetini önceden belirlemek için enine darbeye maruz kompozit plakaların dinamik şekil değiştirmesinden yeni bir analitik metod geliştirmişlerdir.

Goo ve Kim [7] düşük hızlı darbe altında tabakalı kompozit plakaların dinamik temas analizini yapmışlardır. Düzeltilmiş Hertz temas kanunu gibi basit kanunlar, kompozit plakaların dinamik temas durumuna uyarlamak için kullanılmıştır.

Whittingham ve arkadaşları [8] ön gerilme altındaki karbon/epoksi tabakaların düşük hızlı darbe cevabını araştırmışlardır. Ön gerilme altındaki numunede oluşan darbe ucu dalma miktarı, darbe ucu delme miktarı, yutulan enerji ve en büyük darbe kuvveti deneysel olarak tespit edilmiştir.

Belingardi ve Vadori [9] karbon/epoksi kompozit malzemelerde plaka kalınlığının düşük hızlı darbe davranışına etkilerini araştırmışlardır. Üç farklı kalınlıktaki deney numunelerine yarı-statik ve dinamik darbe yüklemesi yapılmıştır. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri çıkarılarak numunelerin farklı darbe hızlarındaki enerji yutma kabiliyetlerini araştırmışlardır. Mitrevski ve arkadaşları [10] farklı darbe ucu geometrilerinin kompozit malzeme üzerindeki darbe etkilerini incelemişlerdir. Karbon/epoksi tabakalara yarı küresel, konik ve sivri darbe uçlarla darbeler yapmışlardır. Kuvvet-zaman değişimini ve numunelerin yuttuğu enerji miktarlarını deneysel olarak tespit ederek darbe ucu geometrilerinin etkilerini değerlendirmişlerdir.

Hosseinzadeh ve arkadaşları [11] fiberle güçlendirilmiş kompozit levhaların düşen ağırlık darbelerindeki hasar cevabını incelemişlerdir. Dört farklı fiberle güçlendirilmiş tabakalı kompozit plakalara düşük hızlı darbeler yapmışlardır. Numunelerdeki hasar bölgelerinin haritalarını çıkararak darbe enerjisi-hasar çapı değişimi elde etmişlerdir. Farklı numunelerdeki değişimleri rapor etmişlerdir. Sugun ve Rao [12] cam, karbon ve kevlar takviyeli kompozitlere tekrarlı düşürme testleri yaparak düşük hızlı darbe karakteristiklerini çalışmışlardır. Kompozit plakalar üzerine delinme oluncaya kadar tekrarlı darbeler yapmışlardır. En büyük kuvvet-darbe sayısı değişimi ve darbe enerjisi-darbe sayısı değişimlerini deneysel olarak tespit etmişlerdir. Son darbeden sonra numunelerdeki hasar bölgelerinin haritaları çıkarılarak incelenmiştir.

E-camı/epoksi tabakalı kompozit plakaların darbe altındaki davranışı Mili ve Necip [13] tarafından deneysel olarak çalışılmıştır. Ağırlık düşürme darbe cihazı kullanmışlardır. Darbe ucu hızlarının ve tabakalanma sırasının kompozit plağın davranışına etkilerini değerlendirmişlerdir. Aslan ve arkadaşları [14], Aslan ve Karakuzu [15] düşük hızlı darbeye maruz fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin dinamik davranışını değerlendirmişlerdir. Cam/epoksi kompozitin zamana bağlı analizi üzerine deneysel ve nümerik araştırma yapmışlardır. Nümerik olarak hesaplanan temas kuvveti-zaman değerleri, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerde darbe hızının, darbe kütesinin, kompozit plağın boyutlarının ve kalınlığının önemini belirlemişlerdir. Baucom ve Zikry [16] E camı kompozit sistemlerde düşük hızlı darbedeki hasar ilerlemelerini incelemişlerdir. Numunede delinme oluşuncaya kadar aynı enerji seviyesinden düşük hızlı darbeler yapılmış ve buna bağlı olarak en büyük temas kuvveti-darbe sayısı ve enerji dağılımı-darbe sayısı grafikleri elde ederek incelemişlerdir. Belingardi ve Vadori [17] cam/epoksi kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışlarını incelemişlerdir. Tek yönlü ve örgülü olarak üç farklı yönlenmeye sahip kompozit malzemeye serbest darbe düşürme cihazı ile testler yapmışlardır. Darbe enerjisi-hasar değeri, temas kuvveti-zaman değişimleri elde edilerek farklı özellikleri olan numunelerin darbe davranışı değerlendirilmiştir.

Uyaner ve arkadaşları [18] düşük hızlı darbeye maruz E-cami/epoksi tabakalı kompozitlerde plaka boyutlarının malzemede oluşan hasara etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır.

Şenel ve arkadaşları [19] yapmış oldukları çalışmada, imalatı yapılmış olan düşük hızlı darbe test düzeneğine monte edilecek şekilde özgün bir frenleme ve kontrol sistemi tasarlamış ve imalatını gerçekleştirmişlerdir. Frenleme sisteminin numune hasar oluşumu üzerine farkını görmek için düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır. Deneylerde numune olarak 8 tabakalı simetrik [-30/30]_{4s} oryantasyon açısında cam/epoksi kompozit plak kullanmışlardır. Deneyler 14.7J, 22.07J, 29.43J, 44.14J darbe enerjilerinde yapılmıştır. Sonuç olarak düzenekte kullanılan frenleme ve kontrol sistemi, düşen kütlelerin sekmesi durumunda kütle tutmuş, numuneyi delme durumunda da devreye girmeyerek istenilen özellikleri göstermiştir. Frenleme sisteminin hasar oluşumuna etkisini inceleyerek, bu sistemin gerekliliği ve gerçek modellemeye yakınlığını tespit etmişlerdir.

Güvensoy [20] düşük hızlı darbeye maruz E-cami/epoksi filaman sarım kompozit boruların dinamik cevabını araştırmıştır. Uygulamış olduğu yöntem Sonlu Elemanlar Yöntemi olup bilgisayar analizi sonuçlarının yorumlanmasına dayandırılmıştır. Filaman sarım kompozit boru ve darbe olayını modellemiştir. Benzeşimde kullanmış olduğu vurucu 24 mm çapında, küresel uçlu bir geometriye sahiptir. Vurucu kütlesi 6.35 kg'dır. Araştırma 2.0, 2.5 ve 3.0 m/s'lik çarpma hızlarında yapılmıştır. Çalışmalarında [+55°, -55°]₃, [+55°, -55°]₄ ve [+55°, -55°]₅ olmak üzere 6, 8 ve 10 tabakalı E-cami/epoksi malzemeden 72 mm iç çapında, V-yatağında dönmeden durabilen kompozit borular kullanmış ve darbeyi her bir borunun enine yapmıştır. Elde ettiği bu veriler doğrultusunda, malzeme üzerine darbe esnasındaki kuvvet-zaman diyagramı, darbe enerjisi-yutulmuş enerji değişimi, hız-zaman değişimi grafiklerini elde etmiştir. İnceleme sonucunda elde ettiği sonuçları çarpma zaman aralığını yorumlayarak tamamlamıştır.

Kurşun ve Şenel [21] E-cami/epoksi tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe cevabını araştırmışlardır. Numuneler tek yönlü takviyelendirilmiş tabakalar [0, 90]_{2s} şeklinde üretilmiş ve test edilmiştir. Çalışmalarında 140×140 mm ebatlarında ve 2 mm kalınlığında numuneler kullanılmıştır. Darbe testlerini özel olarak geliştirilmiş olan, düşey ağırlık düşürme test cihazı ile yapmışlardır. Çalışmalarında 12 mm çapında yarı küresel uçlu bir geometriye sahip vurucu uç kullanmışlardır. Vurucu kütlesi 3.1 kg'dır. Bu test sonucunda elde ettikleri veriler doğrultusunda, malzeme üzerine darbe esnasındaki kuvvet-zaman, enerji-zaman ve kuvvet-yer değiştirme grafiklerini elde etmiş ve çalışmalarını sonlandırmışlardır.

Shokrieh ve Fakhar [22] makalesinde düşük hızlı darbeye maruz bırakılan kompozit sandviç panellerin dinamik cevabını nümerik, deneysel ve analitik olarak incelemiştir.

Bu çalışmada, Ansys paket programı kullanılarak [0°, -45°, +45°, 0°, 90°, +45°, -45°, 0°]_s oryantasyon diziliminde sahip tabakalı kompozit malzeme modellenmiştir. Kompozit malzemenin tabaka sayısı 16, et kalınlığı 3 mm olup dört tarafı ankastre bir şekilde bağlanmıştır. Yarı küresel silindirik uç ağırlıkla birlikte levhaya 2 m/s, 2.5 m/s, 3 m/s, 3.5 m/s, 4 m/s hızlarda çarpıtılarak sonuçlar elde edilmiştir.

2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi, farklı mühendislik dallarınca, özel analizler gerektiren mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan nümerik bir yöntemdir [23].

Sonlu elemanlar metodunda temel fikir, bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün o elemanın nodlarındaki değerler kullanılarak, interpolasyonlar ile bulunmasıdır. Matematiksel olarak elde edilen eleman denklemleri, çoğunlukla matris formunda ifade edilebilen, doğrusal bir cebirsel denklem takımındır.

$$[k] \{u\} = \{F\} \quad (1)$$

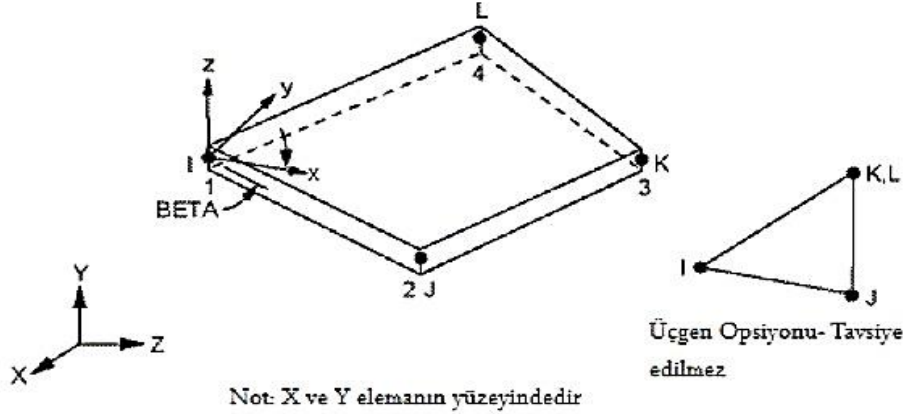
Burada [k] eleman özellik veya katılık matrisi, {u} düğüm noktalarındaki bilinmeyenlerin sütun vektörü ve {F} de düğüm noktalarına uygulanmış olan dış etkenlerin etkisini gösteren bir sütun vektörüdür [24].

Sonlu elemanlar analizi için gerekli temel adımların oluşturulması için ön işlemci, çözüm ve son işlemci modüllerinin oluşturulması gerekmektedir [23].

Yapılan analizde, sonlu elemanlarla problem çözümünde etkin bir paket program olan Ansys kullanılmıştır. Herhangi bir problemin Ansys analiz programında çözülebilmesi için; eleman tipinin belirlenmesi, malzemenin özelliklerinin tanımlanması, problem takımının modellenmesi, sonlu elemanlar modelinin oluşturulması (mesh edilmesi), sınır koşullarının belirlenmesi ve yüklerin uygulanması, çözümün yapılması ve son olarak çözüm sonuçlarının değerlendirilmesi gibi safhaların eksiksiz olarak yerine getirilmesi gerekmektedir [25].

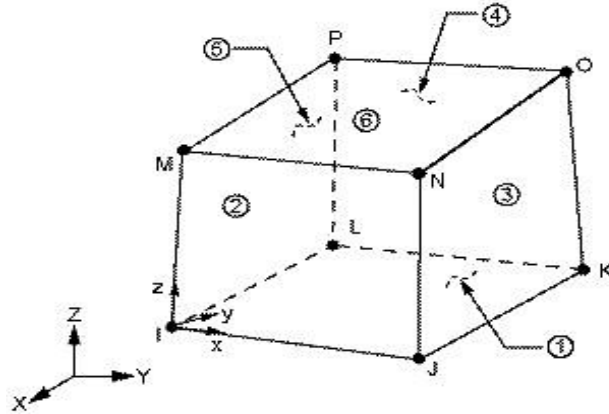
Ansys ile yapılan analizlerde Ls-Dyna modülü kullanılmıştır. Bunun nedeni; Ls-Dyna modülünün açık (eksplicit) çözüm kullanan bir sonlu elemanlar modelleme ve simülasyon yazılımı olmasıdır. Ls-Dyna modülü ile yapılan analizlerde; düşme testleri, çarpışma gibi kısa süreli-yüksek frekanslı ve yüksek derecede nonlineer dinamik benzeşimlerin gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır.

Ansys ile yapılan analizlerde; eleman tipi olarak kompozit levha için Thin Shell 163 (Şekil 1), vurucu için ise 3D Solid 164 (Şekil 2) seçilmiştir. Thin Shell 163 eleman tipi, ince sarım yapısıdır. 4-düğümli büküm ve zar kabiliyetine sahip bir elemandır. Düzlem ve normal gerilmeler uygulanabilir. Konum, hız ve ivme x, y ve z düğümlerinde 9, x, y ve z rotasyonunda 3 olmak üzere her düğümü 12 serbestlik derecesine sahiptir [26].



Şekil 1. Thin Shell163 Geometrisi [26]

Solid 164 eleman tipi, 3 boyutlu katı modellemede kullanılır. x, y ve z koordinatlarında konum, hız ve ivme değerleri olmak üzere sekiz noktada tanımlanır [26].

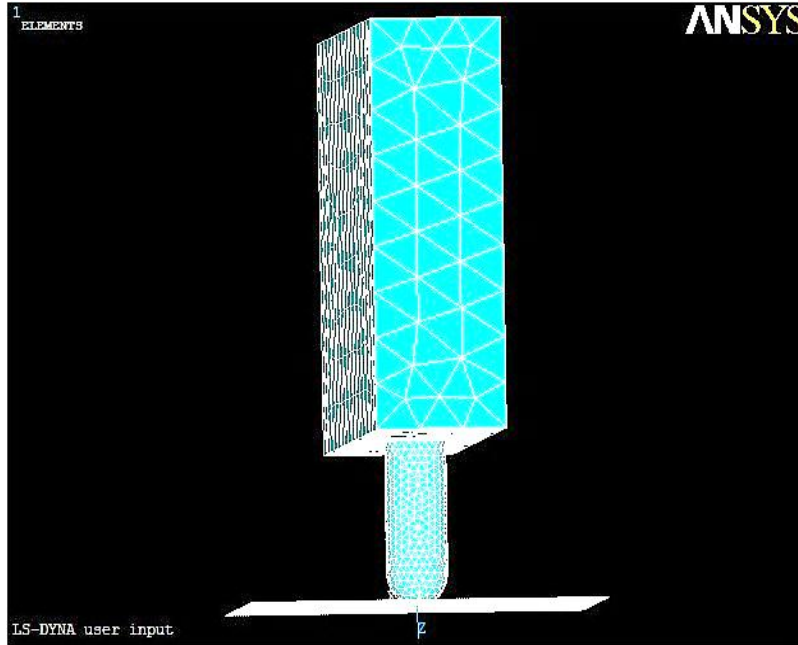


Şekil 2. SOLID 164 Geometrisi [26]

Analizlerde kullanılan değerler; kompozit levha ve vurucu için Tablo 1 de verilmiştir. Ayrıca modele uygun olarak oluşturulan ağ yapısı (mesh) ile darbe modeli Şekil 3'te görülmektedir

Tablo 1. Analizlerde kullanılan değerler

Eleman Tipi	Malzeme Özellikleri		
	E_x	E_y	E_z
Kompozit Levha Thin Shell 163	Elastisite Modülleri (GPa)		
	9.5	9.5	42
	Kayma Modülü (G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}) (GPa)		
	3.5		
	Poisson Oranları (NUXY, NUYZ, NUXZ)		
0.34			
Yoğunluk, DENS (kg/m^3)			
1840			
Vurucu 3D Solid 164	Elastisite Modülü (GPa)		
	210		
	Poisson Oranı		
0.29			
Yoğunluk, DENS (kg/m^3)			
7850			



Şekil 3. Analizde kullanılan darbe modeli

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

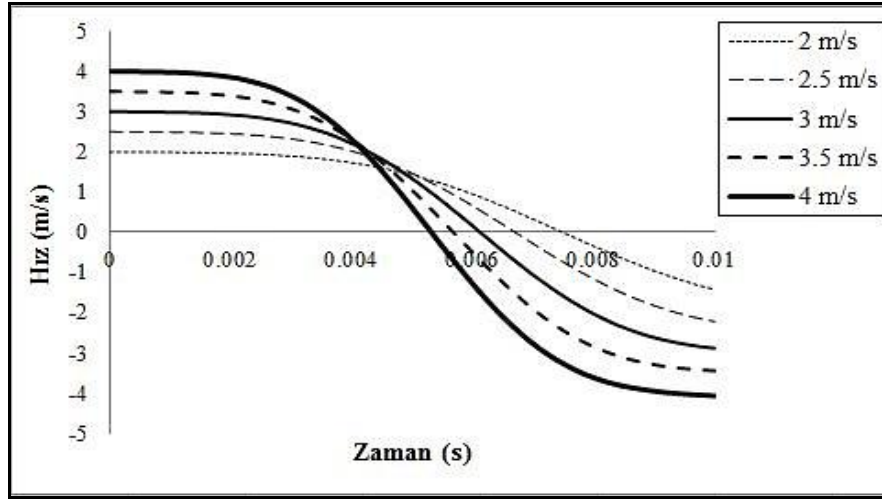
Yapılan çalışmada; 140×140 mm ebatlarında, 16 tabakalı ve $[0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_s$ oryantasyon dizilişine sahip ve et kalınlığı 3 mm olan tabakalı kompozit levha tanımlanmıştır. Vurucu kütlesi 17 kg'dır. Darbe ucu 24 mm çapında ve yarı küresel olarak tanımlanmıştır. Darbe testleri 2 m/s, 2.5 m/s, 3 m/s, 3.5 m/s, 4 m/s'lik çarpma hızlarında yapılmıştır. Kullanılan kompozit levha dört tarafı ankastre olarak ve üzerine uygulanan darbe levhanın merkezine gelecek şekilde tanımlanmıştır.

Bu şekilde; 2 m/s, 2.5 m/s, 3 m/s, 3.5 m/s ve 4 m/s'lik hızlar için ayrı ayrı darbe gerçekleştirilmiştir. Uygulanan bu darbeler neticesinde; hız-zaman, yer değiştirme-zaman, ivme-zaman, kuvvet-zaman ve kinetik enerji-zaman değişimleri elde edilmiştir.

3.1. Hız-Zaman Değişimi

Hız-zaman değişimleri incelendiğinde, öncelikle zaman başlangıçlarında hızın maksimum olduğu ve zaman geçtikçe hız azaldığı gözlemlenir. Belirli bir zaman da hız sıfırlanır (maksimum çökme anında) ve daha sonra geri sekme gerçekleşirse vurucunun hızı çarpma yönüne ters olduğu için negatif değer alır. Yine belirli bir zamanda hız sıfırlanır ve geri sekme olmazsa bu vurucunun numuneye nüfuz ettiğini yani saplandığını gösterir.

Delip geçme durumunda vurucu numuneye çarptıktan sonra sahip olduğu enerjinin tamamını sönmüleyemediği için numuneyi delmiş ve hareketine lineer olarak devam etmiştir [27]. Şekil 4'te verilen hız-zaman grafiği incelendiğinde, uygulanan darbe hızlarına göre geri sekme görülmekte ve hız artışına paralel olarak geri sekme hızında da artış gözlenmektedir. Bu da uygulanan darbenin elastik bir davranış gösterdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Değişik çarpma hızlarında 140×140 mm levhalarda sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen hız-zaman değişimi

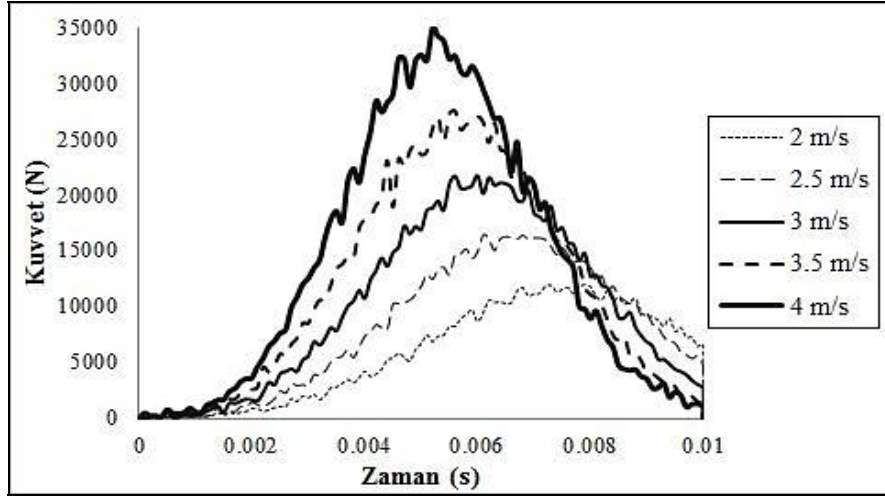
3.2. Kuvvet-Zaman Değişimi

Kuvvet-zaman grafiklerini incelediğimizde genel olarak vurucunun geri sekmesi durumunda kuvvet eğrileri zamanla parabolik bir görüntü çizmektedir. Vurucunun numuneye nüfuz etmesi ve delip geçmesi durumlarında ise kuvvet eğrilerinin şekilleri birbirine benzemektedir.

Vurucunun numuneyi delip geçmesi durumunda beklenen kuvvetin sıfıra düşme durumu asla gerçekleşmemektedir. Bunun nedeni, vurucu ile numune arasındaki sürtünme kuvvetidir [28].

Bütün şekillerde kuvvet hızla artarak bir azami kuvvet değerine ulaşmaktadır ve daha sonra sıfıra düşmektedir. Her bir grafikte darbenin başlangıcında bir salınım meydana geldiği görülmektedir. Bu durum numunenin merkezi üzerinde hasar mekanizması oluştuğunu göstermektedir [29].

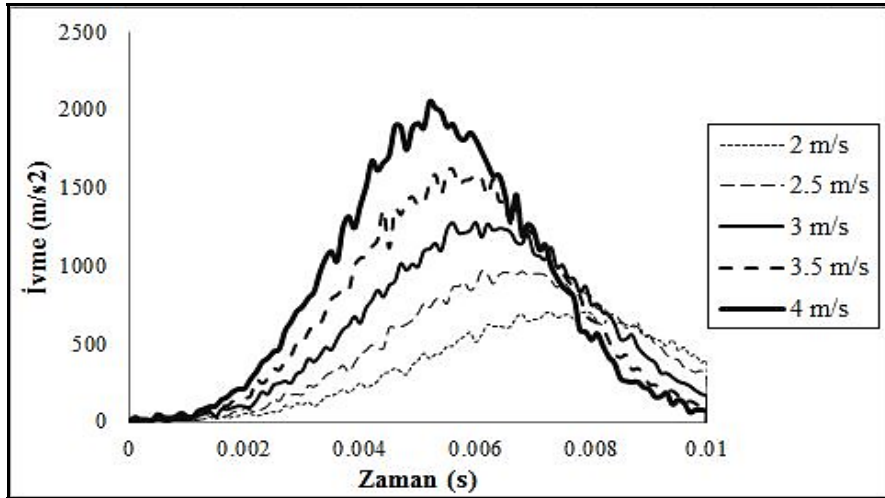
Şekil 5'te sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlar görülmektedir, buna göre artan darbe hızıyla birlikte kuvvet değerlerinin de benzer şekilde parabolik olarak arttığı görülmektedir.



Şekil 5. Değişik çarpma hızlarında 140×140 mm levhalarda sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen kuvvet-zaman değişimi.

3.3 İvme-Zaman Değişimi

İvmenin zamana göre değişimi beklediği gibi, kuvvetin zamana göre değişimine benzer şekilde artan darbe hızıyla birlikte ivme değerlerinin de benzer şekilde ve parabolik olarak arttığı görülmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Değişik çarpma hızlarında 140×140 mm levhalarda sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen ivme-zaman değişimi.

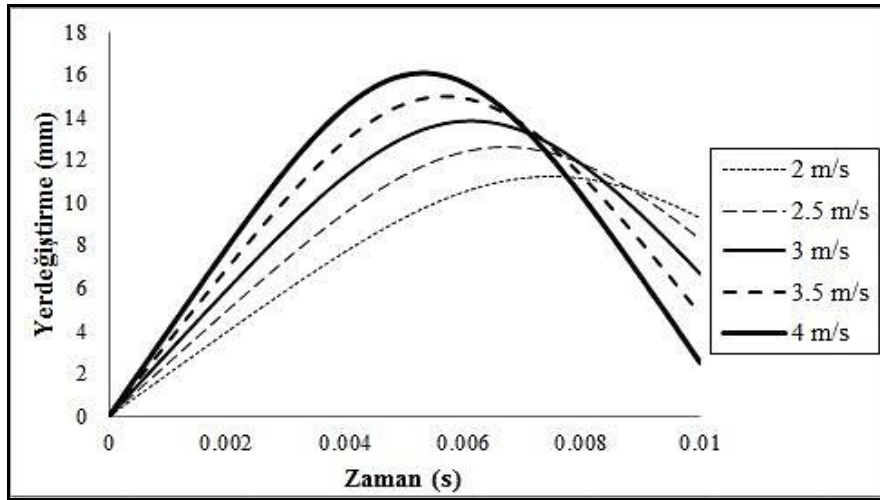
3.4 Yer Değiştirme-Zaman Değişimi

Yer değiştirme-zaman değişimine bakıldığında genel olarak parabolik bir eğri oluşumu gözlemlenmektedir. Vurucunun geri sekmesi durumu söz konusu ise eğrinin maksimum yer değiştirmeye ulaşıldıktan sonraki süreçte azaldığı görülmektedir. Vurucunun numuneye nüfuz etmesi durumunda, maksimum yer değiştirmeye ulaşıldıktan sonra sabit bir değerde kalır. Bunun nedeni vurucunun numuneye saplanması ve hızının sıfırlanmasıdır.

Vurucunun numuneyi delip geçmesi durumunda ise vurucunun hızı sıfırlanmadığından yer değiştirme sürekli olarak artış gösterir.

Maksimum yer değiştirmenin maksimum kuvvete göre daha geç olduğu görülmektedir. Bu aradaki gecikme darbe enerjisi arttıkça artmaktadır. Bu da vurucunun maksimum kuvvete ulaştıktan sonra biraz hareketine devam ettiğini göstermektedir [27].

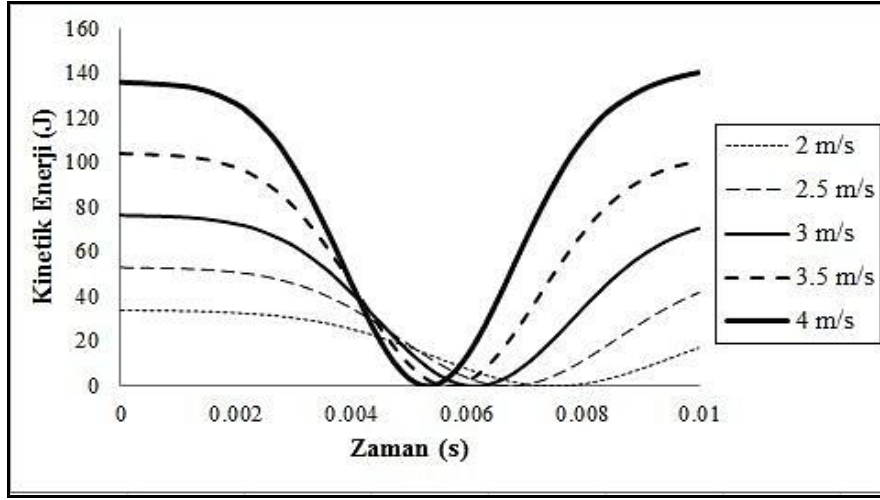
Sonlu elemanlar yöntemiyle ulaşılan sonuçlara bakıldığında, analizde geri sekme durumu söz konusu olduğu için yer değişiminin zamanla değişimini veren eğri artan darbe hızıyla birlikte parabolik olarak artış göstermekte ve belirli bir maksimum değere ulaşmaktadır. Bu maksimum değere ulaştıktan sonra eğrinin yine parabolik olarak azaldığı görülmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Değişik çarpma hızlarında 140×140 mm levhalarda sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen yer değiştirme-zaman değişimi.

3.5 Kinetik Enerji-Zaman Değişimi

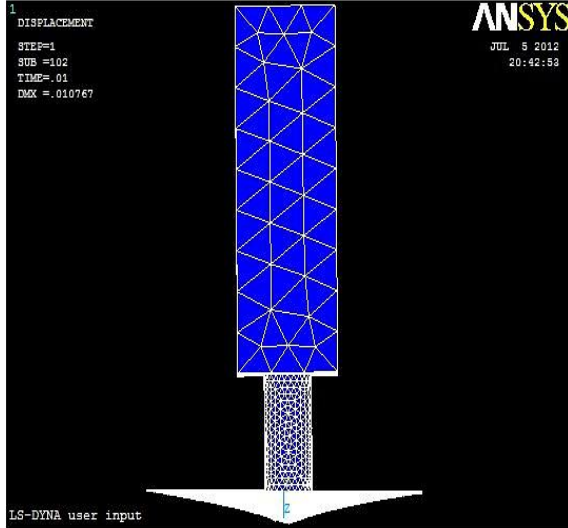
Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen kinetik enerjinin zamanla değişimi incelendiğinde, analizde geri sekme söz konusu olduğu için hızın zamanla değişiminden hareketle zaman başlangıçlarında hızın maksimum olduğu dolayısıyla kinetik enerji değerinin de zaman başlangıcında maksimum olduğu görülmektedir. Zaman geçtikçe hızın azaldığı ve belirli bir zaman da hızın sıfırlandığı (maksimum çökme anında), kinetik enerji değerinin ise maksimum çökme anına kadar parabolik olarak azaldığı ve maksimum çökme anında sıfırlandığı görülmektedir. Bu andan itibaren vurucu hızının darbe yönüne ters olarak arttığı ve buna paralel olarak kinetik enerji değişiminin de bu andan itibaren parabolik olarak artış gösterdiği görülmektedir (Şekil 8).



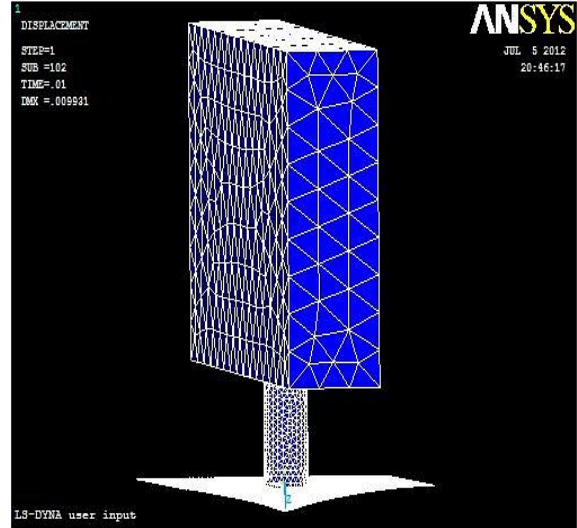
Şekil 8. Değişik çarpma hızlarında 140×140 mm levhalarda sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen kinetik enerji-zaman değişimi.

3.6 Simülasyon Sonuçları

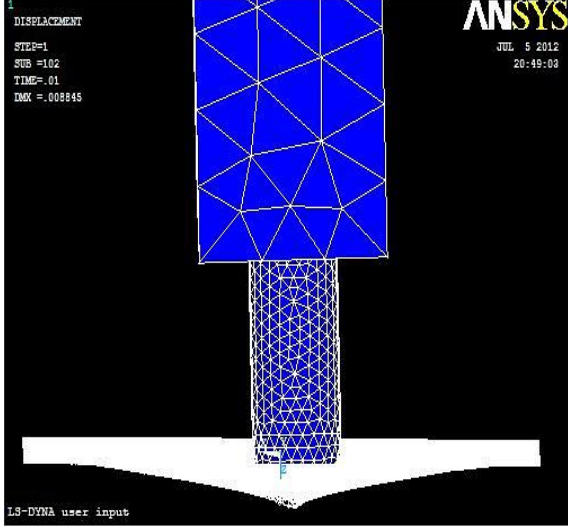
Şekil 9'da 2 m/s, 2.5 m/s, 3 m/s, 3.5 m/s ve 4 m/s darbe hızları için yer değiştirme Şekil 10'da ise aynı hız değerleri için gerilme simülasyon sonuçları verilmiştir.



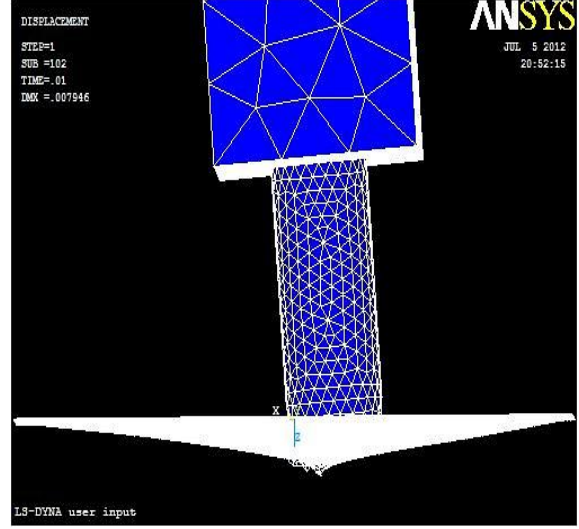
a)



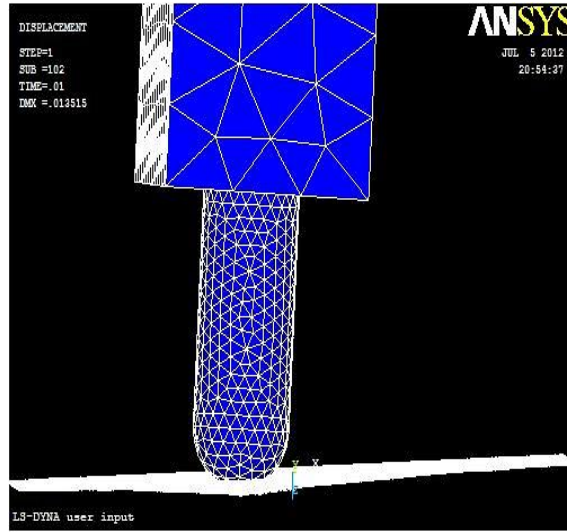
b)



c)



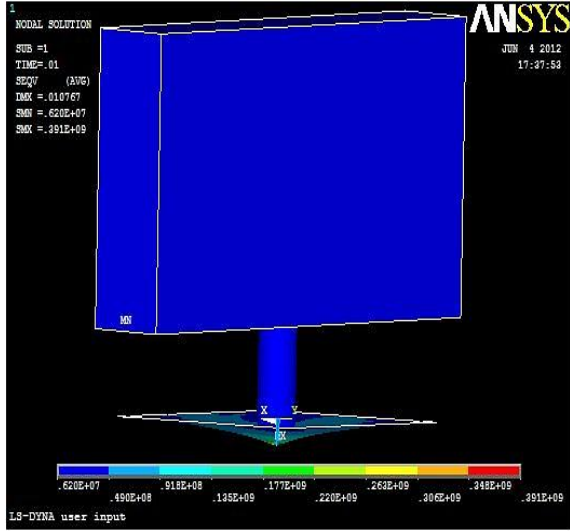
d)



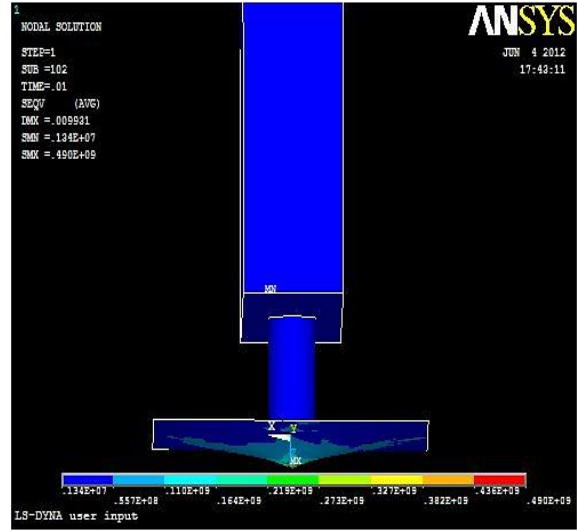
e)

Şekil 9. a) 2 m/s b) 2.5 m/s c) 3 m/s d) 3.5 m/s e) 4 m/s darbe hızları için toplam yer değiştirme simülasyon sonuçları.

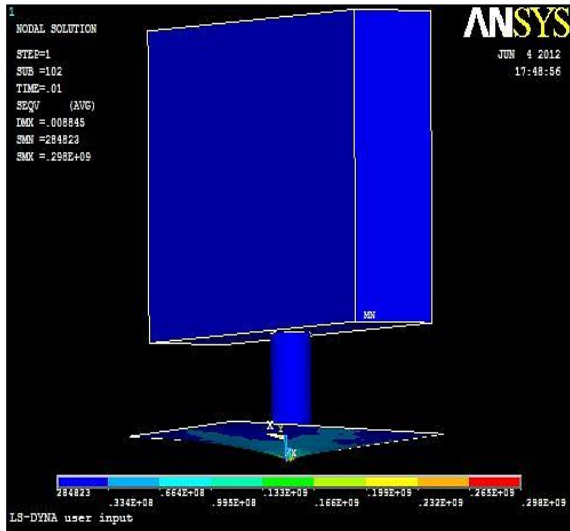
E-CAMI/EPOKSİ TABAKALI KOMPOZİTLERDE DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞININ SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ



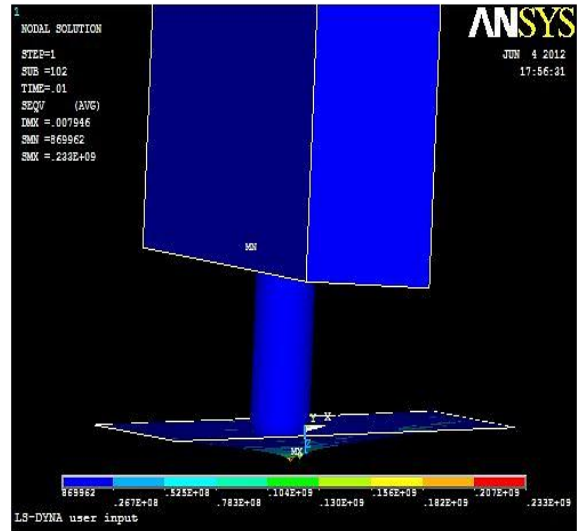
a)



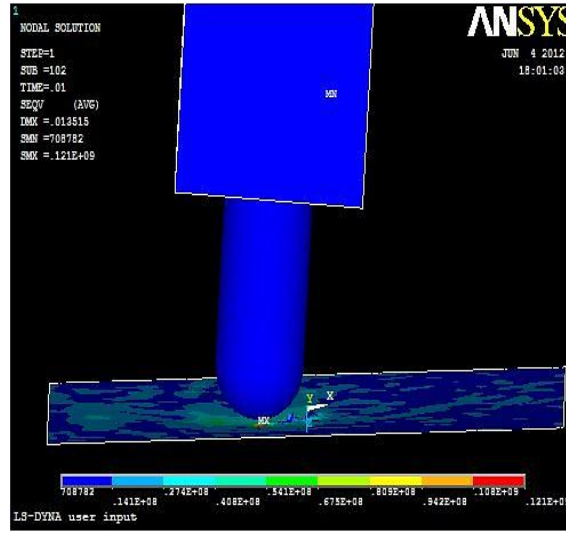
b)



c)



d)



e)

Şekil 10. a) 2 m/s b) 2.5 m/s c) 3 m/s d) 3.5 m/s e) 4 m/s darbe hızları için toplam gerilme simülasyon sonuçları.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

1. Hızın zamanla değişimi incelendiğinde, artan darbe hızıyla beraber geri sekme hızının da arttığı görülüyor. Bu da darbenin elastik bir davranış gösterdiğini ortaya koyuyor.
2. İvme-zaman ve kuvvet-zaman değişimleri incelendiğinde ikisinin de benzer bir görüntüde (çan eğrisi şeklinde) oluştuğu görülmektedir.
3. Darbe hızının artmasıyla birlikte en büyük temas kuvveti de artmaktadır.
4. Yer değiştirme-zaman değişimi incelendiğinde, artan darbe hızıyla birlikte yer değiştirme eğrisinin de belirli bir ana kadar parabolik olarak arttığı ve maksimum yer değiştirmeye ulaşıldıktan sonraki süreçte parabolik olarak azaldığı görülmektedir.
5. Kinetik enerjinin zaman başlangıcında maksimum olduğu ve zaman geçtikçe parabolik olarak azaldığı ve maksimum çökme anında sıfır olduğu görülmektedir. Maksimum çökme değerine ulaşıldıktan sonra ise parabolik olarak arttığı gözlenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] KARA, M., “Düşük Hızlı Darbeye Maruz Tabakalı Kompozitlerin Dinamik Cevabı”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2006.
- [2] RAMKUMAR, R.L., and CHEN, P.C., “Low Velocity Impact Response of Laminated Plates”, AIAA Journal, 21, 1448-1452, 1982.
- [3] ABATAN, A., HU, H., and OLOWOKERE, D., “Impact Resistance Modeling of Hybrid Laminated Composites”, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 11, 249-260, 1998.
- [4] GONG, S.W., and LAM, K.Y., “Transient Response of Stiffened Composite Plates Subjected to Low Velocity Impact”, Composites, Part B, 30, 473-484, 1999.
- [5] LEE, Y.S., KANG, K.H., and PARK, O., “Response of Hybrid Laminated Composite Plates under Low Velocity Impact”, Computers & Structures, 65, 965-974, 1997.
- [6] KIM, J.K. and KANG, K.W., “An Analysis of Impact Force in Plain-weave Glass-epoxy Composite Plates Subjected to Transverse Impact”, Composite Science and Technology, 61, 135-143, 2001.
- [7] GOO, N.S. and KIM, S.J., “Dynamic Contact Analysis of Laminated Composite Plates under Low Velocity Impact”, AIAA Journal, 35, 1518-1521, 1997.

- [8] WHITTINGHAM, B., MARSHALL, I.H., MITREVSKI, T., and JONES, R., “The Response of Composite Structures with Pre-Stress Subject to Low Velocity Impact Damage”, *Composite Structures*, 66, 685-698, 2004.
- [9] BELINGARDI, G., and VADORI, R., “Influence of Laminate Thickness in Low Velocity Impact Behavior of Composite Material Plate”, *Composite Structures*, 61, 27-38, 2003.
- [10] MITREVSKI, T., MARSHALL, I.H., THOMSON, R., JONES, R. and WHITTINGHAM, B., “The Effect of Impactor Shape on the Impact Response of Composite Laminates”, *Composite Structures*, 67, 139-148, 2004.
- [11] HOSSEINZADEH, R., SHOKRIEH, M.M. and LESSARD, L., “Damage Behavior of Fiber Reinforced Composite Plates Subjected to Drop Weight Impacts”, *Composite Science and Technology*, 66, 61-68, 2006.
- [12] SUGUN, B.S., and RAO, R.M.V.G.K., “Low Velocity Impact of Glass, Carbon and Kevlar Composites Using Repeated Drop Tests”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.23, No.15, 1583-1599, 2004.
- [13] MILI, F., and NECIP, B., “Impact Behavior of Cross-Ply Laminated Composite Plates under Low Velocities”, *Composite Structures*, 51, 237-224, 2001.
- [14] ASLAN, Z., KARAKUZU, R. and OKUTAN, B., “The Response of Laminated Composite Plates under Low-Velocity Impact Loading”, *Composite Structures*, 59, 119-127, 2003.
- [15] ASLAN, Z. and KARAKUZU, R., “Transient Dynamic Analysis of Laminated Composite Plate Subjected to Low-Velocity Impact”, *Mathematical & Computational Applications*, Vol. 7, No.1, 73-82, 2002.
- [16] BAUCOM, J.N., and ZIKRY, M.A., “Low Velocity Impact Damage Progression in Woven E-glass Composite Systems”, *Composites*, 36, 658-664, 2005.
- [17] BELINGARDI, G., and VADORI, R., “Low Velocity Impact Tests of Laminate Glass-Fiber-Epoxy Matrix Composite Material Plates”, *International Journal of Impact Engineering*, 27, 213-229, 2002.
- [18] UYANER, M., KARA, M., ve ATABERK, N., “E-cami/epoksi Tabakalı Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Davranışına Numune Boyutlarının Etkisi”, 8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, İstanbul, 2007.
- [19] ŞENEL, M., ÜNAL, R., MUMYAKMAZ, B., ve KARAKOÇ, F., “Ön gerilmeli Kompozit Plakların Düşük Hızlı Darbe Yüğü Etkisi Altında Davranışlarının İncelenmesi”, TÜBİTAK, Proje No: 105M195, Kütahya, 2009.
- [20] GÜVENSOY, S., “Filaman Sarım Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Davranışının Simülasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2010.
- [21] ŞENEL, M., and KURŞUN, A., “Investigation of the Effect of Low-Velocity Impact on Composite Plates with Preloading”, *Experimental Techniques*, (baskıda).
- [22] SHOKRIEH, M.M., and FAKHAR, M.N., “Experimental, Analytical and Numerical Studies of Composite Sandwich Panels under Low-Velocity Impact Loadings”, *Mechanics of Composite Materials*, Vol.47, No:6, 643-658, 2012.
- [23] MOAVENI, S., *Finite Element Analysis, Theory and Applications with ANSYS*, Bill Stenquist, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1999.
- [24] CHAPRA, S.C., and CANALE, R.P., *Yazılım ve Programlama Uygulamalarıyla Mühendisler için Sayısal Yöntemler*, Çeviri Editörleri Heperkan, H., Kesgin, U., Literatür Yayıncılık, İstanbul, 919-923, 2003.
- [25] ANSYS Release 8.1 Documentation Preview, “Chapter 2. Elements”, SAS IP. Inc., USA, Copyright ©, 2004.
- [26] ANSYS (R) Release 13.0, ANSYS, Inc. Yardım dosyaları.
- [27] ATAS, C., and SAYMAN, O., “An Overall View on Impact Response of Woven Fabric Composite Plates”, *Composite Structures*, 82: 336-345, 2007.
- [28] KARAKUZU, R., İÇTEN, B.M., AKTAŞ, M., TOPARLI, M., ATAŞ, C., ve ARMAN, Y., “Kompozit Plakalarda Sıcaklığın Darbe Davranışına Etkisi”, TÜBİTAK, Proje No; 104M426, İzmir, 6-8, 23-26, 2007.
- [29] WANG, H., and VUKHANH, T., “Damage Extension in Carbon Fiber/PEEK Cross Ply Laminates under Low-Velocity Impact”, *Journal of Composite Materials*, 28, 684-704, 1994.