



FİLAMAN SARIM KOMPOZİT BORULARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞININ SİMÜLASYONU

¹Mesut UYANER, ²Serdar GÜVENSOY

¹Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fak. Metl. ve Malzeme Müh. Bl., 42075, KONYA

²Sarsılmaz Silah Sanayi, 1. Organize Sanayi Bölgesi 5. Cadde No:20 Beyköy Beldesi, DÜZCE

¹muyaner@selcuk.edu.tr, ²serdarguvensoy@ttmail.com

ÖZET: Bu çalışmada düşük hızlı darbeye maruz E-camı/epoksi filaman sarım kompozit boruların dinamik cevabı araştırılmıştır. Uygulanacak yöntem Sonlu Elemanlar Yöntemi olup bu çalışma bilgisayar analizi sonuçlarının yorumlanmasına dayanmaktadır. Filaman sarım kompozit boru ve darbe olayı modellenmiştir. Benzeşim için ANSYS-LSDyna ticari yazılımı kullanılmıştır. Benzeşimde kullanılacak vurucu 24 mm çapında, küresel uçlu bir geometriye sahiptir. Vurucu kütlesi 6,35 kg' dır. İnceleme 2, 2,5 ve 3 m/s'lik çarpma hızlarında yapılmıştır. Çalışmalarda $[+55^\circ, -55^\circ]_3$, $[+55^\circ, -55^\circ]_4$, ve $[+55^\circ, -55^\circ]_5$ olmak üzere 6, 8 ve 10 tabakalı E-camı/epoksi malzemeden 72 mm iç çapında, bir V-yatağında dönmeden durabilen kompozit borular kullanılmış ve her bir borunun enine darbe yapılmıştır. Elde edilen bu veriler doğrultusunda, malzeme üzerine darbe esnasındaki kuvvet-zaman diyagramı, darbe enerjisi-yutulmuş enerji değişimi, hız-zaman değişimi grafikleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cam Elyaf Takviyeli Plastik, Filaman sarım, Açık uçlu boru, Düşük hızlı darbe.

Low-Velocity Impact Simulation of Open Ended Filament Wound Composite Tubes

ABSTRACT: In this study, dynamic response of low-velocity impact of E-glass/epoxy filament wound composite tubes was investigated. Applied method is Finite Element Method and it is based on theoretical studies and interpreting computer analyses results. A commercial software (ANSYS-LSDyna) was used for the simulation. Open ended filament wound composite tube and impact phenomenon were modeled. Diameter of hemispherical impactor is 24 mm and mass is 6.35 kg. Investigation has been carried out for 2, 2.5 and 3 m/s impact velocities. 6, 8 and 10 plies filament wound composite tubes with $[+55^\circ, -55^\circ]_3$, $[+55^\circ, -55^\circ]_4$, $[+55^\circ, -55^\circ]_5$ stacking sequences and 72 mm in diameter were used. They were positioned in V-block. Force-time history, energy, velocity-time diagram that depend on the base of data will be plotted. Obtained values were interpreted.

Keywords: Glass Fiber Reinforced Plastics, Filament wound, Open ended tube, Low-velocity impact.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mühendislik uygulamalarında, özellikle de mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin en uygun cevabı verebilmesi istenir. Kullanım amacına ve uygulama yerine göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde

olabilir. Genel olarak, darbeler düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar, fakat bu kategoriler arasında açık bir geçiş yoktur. Yapılan araştırmalar bu geçişin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini göstermektedir. Bu konuda yapılmış çalışmalardan bir kısmı düşük hızlı darbeyi hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine, çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1 ila 10 m/s

arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır. Buna karşın darbeye karşı olan cevap da malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımlarında darbe sonucunda oluşan hasar darbeye maruz kalan yüzeyde meydana gelir. Kompozit malzemelerde ise darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde de meydana gelebilir. İyapıda delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde görülebilir. Metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma veya kırılma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez.

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. Darbe, kompozit yapılarda 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 alınmalıdır. Darbelerin kompozit yapıların performansına etkileri kompozit malzemelerin kullanımında kısıtlayıcı bir etkendir. Bu nedenlerle kompozit malzemelerin düşük hızlardaki darbe problemi önemli pratik ve teorik uygulamaları temsil eder.

Teknolojinin gelişmesi ile beraber birçok alanda meydana gelen değişimler insan yaşamına getirdikleri kolaylıkların yanı sıra daha önce hiç karşılaşılmamış birçok problemi de beraberlerinde getirmişlerdir. Bu problemlerden biri de hareketli sistemlerin elemanlarında ani yük değişimlerinden

kaynaklanan problemlerdir. İvmeli hareketten kaynaklanan atalet kuvvetlerinin eleman üzerinde yarattığı etkiler daha önceden tahmin edilmeyecek sonuçlar doğurabilir. Dinamik çarpışmaların sonucunda meydana gelen ani ivme düşüşleri, eleman üzerine etkileyen kuvvetlerin sürekli olarak değişmesi nedeniyle oluşan ani ivme değişimleri de aynı şekilde beklenmeyen sonuçlar doğurabilir.

Bu çalışmanın amacı, kompozit boruların darbe yüklerine karşı davranışlarının incelenmesi ve ANSYS LS-DYNA programı ile gerilme ve kuvvet analizlerinin yapılmasıdır.

Tabakalı kompozit malzemelerin düşük hızlı darbeye vermiş oldukları cevap ile ilgili birçok deneysel çalışmalar yapılmıştır ve analitik yöntemler geliştirilmiştir. Bu alandaki önemli çalışmaların bir kısmı şunlardır:

Elyaf takviyeli kompozitlerin dinamik yükler altındaki davranışları Rotem ve Lifshitz (1971), Lifshitz (1976) ve Sierakowski ve diğ. (1971) tarafından araştırılmıştır. Sierakowski ve Chaturvedi (1997) ve Abrate (1998) çeşitli darbe modeli ve muayene yöntemlerinde ilerlemeler kaydetmişlerdir.

Teorik hesaplamalar darbe cevabını önceden belirlemek için şu çalışmalar yapılmıştır:

Sun ile Chattopadhyay (1975) ve Dobyms (1981), Whitney ile Pagano (1970) tarafından merkezinden darbeye maruz basitçe desteklenmiş bir ortotropik plağı incelemek için geliştirilen plaka denklemlerini kullanmışlardır. Chritoforou ve Yiğit (1996) moment denge metodu kullanarak basitçe desteklenmiş bir kompozit kirişin enine darbesi üzerinde çalışmıştır. Sankar (1992) en büyük temas kuvveti, temas süresi ve arka yüzeydeki en büyük şekil değiştirme gibi darbe karakteristiklerini önceden belirlemek için yarı deneysel bir formül sunmuştur.

Tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe cevabı analitik olarak Ramkuar ve Chen (1982) ile Abatan ve diğ. (1998) tarafından araştırılmıştır. Gong ve Lam (1999) 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 diğ. (1997) tarafından araştırılmıştır. Kim ve Kang (2001) darbe kuvvetini önceden belirlemek için enine darbeye maruz kompozit plakaların dinamik şekil değiştirmesinden yeni bir analitik yöntem geliştirmişlerdir.

Goo ve Kim (1997) 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.

Lal (1982,1983) grafit / epoksi tabakaların enine darbe davranışı ile ilgili deneysel ve analitik bir çalışma yapmıştır. Basit bir enerji yayma modeli darbe sonrası numunenin kalıntı mukavemetini tespit etmek için geliştirilmiştir.

Rijit bir küre ile darbe yapılan kompozit sandviç plakanın dinamik cevabı nümerik ve deneysel olarak Lee ve diğ. (1993) tarafından araştırılmıştır. Wang ve Vukhann (1994) karbon elyaf bulunan PEEK çapraz katlı tabakaların düşük hızdaki darbesini iki basit yaklaşım kullanarak araştırmıştır.

Whittingham ve diğ. (2004) ön gerilme altındaki karbon fiber/epoksi tabakaların düşük hızlı darbe cevabını araştırmışlardır. Ön gerilme altındaki numunede oluşan vurucu dalma miktarı, vurucu delme miktarı, yutulan enerji ve en büyük darbe kuvveti deneysel olarak tespit edilmiştir.

Belingardi ve Vadori (2003) karbon-elyaf/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 diğ. (2005) farklı vurucu geometrilerinin kompozit malzeme üzerindeki darbe etkilerini incelemişlerdir. Karbon-epoksi tabakalara yarı küresel, konik ve sivri vurucularla darbeler yapmışlardır. Kuvvet-zaman değişimini ve numunelerin yuttuğu enerji miktarlarını deneysel olarak tespit ederek

vurucu geometrilerinin etkilerini değerlendirmişlerdir.

Hosseinzadeh ve diğ. (2005) 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.

E-camı/epoksi tabakalı kompozit plakaların darbe altındaki davranışı Mili ve Necip (2001) tarafından deneysel olarak çalışılmıştır. Ağırlık düşürme darbe cihazı kullanmışlardır. Vurucu hızlarının ve tabakalanma sırasının kompozit plağın davranışına etkilerini değerlendirmişlerdir. Aslan ve diğ. (2003) ile Aslan ve Karakuzu (2002) düşük hızlı darbeye maruz fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin dinamik davranışını değerlendirmişlerdir. Cam fiber/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 (2005) 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 (2002) cam fiber epoksi matris 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.

N.Tarakçıoğlu, A.Samancı, A.Akdemir (2007), iç basınçlı filaman boruların yorulma davranışını incelemiştir.

Bu çalışmada düşük hızlı darbeye maruz E-cami/epoksi filaman sarım kompozit boruların dinamik cevabı araştırılmıştır. Problem ANSYS-LsDyna da modellenmiştir. Benzeşimden elde edilen veriler doğrultusunda, malzeme üzerine darbe esnasındaki kuvvet-zaman diyagramı, darbe enerjisi-yutulmuş enerji değişimi, hız-zaman değişimi grafikleri elde edilmiştir.

2. ANSYS® İLE ANALİZİN YAPILMASI (ANALYSIS WITH ANSYS®)

Çevrede meydana gelen olaylar ya da karşılaşılan problemler çoğu zaman kolayca kavranıp doğrudan çözülemezler. Bu yüzden karmaşık bir problem, bilinen veya kavranması daha kolay alt problemlere ayrılarak daha anlaşılır bir hale getirilir. Oluşturulan alt problemler çözülüp birleştirilerek esas problemin çözümü yapılabilir. Örneğin, gerilme analizi üzerinde çalışan mühendisler, gerilme problemini basit kiriş, plak, silindir, küre gibi geometrisi bilinen şekillerle sınırlarlar. Bu elde edilen sonuçlar çoğu kez problemin yaklaşık çözümüdür ve bazen doğrudan bazen de bir katsayı ile düzeltilerek kullanılır. Mühendislik uygulamalarında problemlerin karmaşıklığı sebebiyle genellikle problemlerin tam çözümü yerine, kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözüm tercih edilir. Öyle problemler vardır ki, tam çözüm imkânsız kabul edilerek yaklaşık çözüm tek yol olarak benimsenir. Bu yaklaşık çözüme örnek olarak sonlu elemanlar yöntemi; karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir.

ANSYS ® 12.1, çok çeşitli problemleri, sonlu elemanlar yöntemine dayanarak nümerik çözüm yapan bir paket programdır. Bu problemler; statik veya dinamik durum analizleri (lineer-nonlineer), termal, akışkan, elektromagnetik, vs. Genel olarak, sonlu elemanlarla çözüm üç ana bölüme ayrılır.

1. Ön Hazırlık İşlemleri (Pre-processing): Problemin tanımlanmasıdır. Ön hazırlık bölümünün ana adımları şöyledir:

- Anahtar noktaların (*keypoint*)/ düğümlerin (*node*)/ doğruların/ alanların/ hacimlerin tanımlanması

- Eleman tipinin ve malzemesinin/ geometrik özelliklerinin tanımlanması
- Doğruların/ alanların/ hacimlerin gerekli şekilde elemanlara ayrılması (mesh edilmesi).
- Analiz için gerekli ayrıntıların miktarı, analizin boyutuna göre (1D, 2D, aksimetrik, 3D) değişmektedir.

2. Çözüm (Solution): Yüklerin, sınırlamaların uygulanması ve çözümdür. Burada yükler (bir noktaya veya basınç), kısıtlamaları (öteleme ve dönme) belirlenir ve oluşan denklemlerin çözümü yapılır.

3. Çözüm Sonrası İşlemler (Post-processing): Sonuçların görülmesi ve değerlendirilmesidir. Bu adımda şunlar görmek istenebilir: Düğüm noktalarının yer değiştirme listesi, hız diyagramı, ivme diyagramı, kuvvet diyagramı.

2.1 ANSYS LS-DYNA İle Gerilme Analizi (Stress Analysis with ANSYS LS-Dyna)

ANSYS LS-DYNA ile gerilme analizi aşağıdaki sıra izlenir.

- Problemin açıklanması
- Analiz tipinin tanımlanması
- Geometrilerin modellenmesi
- Element tipinin ve malzeme özelliklerinin tanımlanması
- Mesh işleminin yapılması
- Yüklerin uygulanması
- Çözümün elde edilmesi
- Sonuçların incelenmesi

2.2 Analiz (Analysis)

Bu problemde, çeşitli hızlardaki vurucu, çeşitli et kalınlıklarındaki kompozit borunun üzerine düşürülmüştür. Vurucu 6,35 kg ağırlığındadır. Vurucu, çarpma hızları 2 m/s, 2,5 m/s ve 3,0 m/s olacak şekilde ilk hızlar ile 0,01m yüksekten numunelerin üzerine bırakılmıştır.

2.2.2 Analizde kullanılan fiziksel özellikler ve varsayımlar (Physical Properties and Assumptions)

- Vurucunun çapı 24 mm
- Vurucu ağırlığı 6,35 kg
- Vurucunun borudan uzaklığı 0,01 m
- Vurucunun malzeme özellikleri;
 - elastisite modülü 200 GPa

- Poisson oranı 0,32
- Numunenin boyutları dış çap 0,072 m, boy 0,3 m
- Numune et kalınlığı;
 - 10 tabakalı için 4,1 mm
 - 8 tabakalı için 3,1 mm
 - 6 tabakalı için 2,3 mm
- Numunenin malzeme özellikleri:

Kompozit malzeme için;

Yoğunluk, $DENS$: 1840 kg/m³,

Elastisite modülleri, E_x : 42 GPa, E_y : 9,5 GPa, E_z : 9,5 GPa,

Poisson oranları, $NUXY$: 0,216; $NUYZ$: 0,216; $NUXZ$: 0,34,

Kayma modülleri, G_{xy} : 2,244 GPa, G_{yz} : 2,244 GPa, G_{xz} : 3,5 GPa
- Numuneler [+55°,-55°]₃, [+55°,-55°]₄, ve [+55°,-55°]₅.
- Boru statik patlama basıncı;
 - 6 katlı: 320 bar (32 MPa)
 - 8 katlı: 440 bar (44 MPa)
 - 10 katlı: 560 bar (56 MPa).
- Bu basıncın statik patlama basıncının %35, %40 ve %45 'i değerinde iç basınç uygulanırken darbe simülasyonu gerçekleştirilecektir.
 - 6 katmanlı için :%35 (112 bar), %40 (128 bar) ve %45 (144 bar)
 - 8 katmanlı için :%35 (154 bar), %40 (176 bar) ve %45 (198 bar)
 - 10 katmanlı için :%35 (196 bar), %40 (224 bar) ve %45 (252 bar)
- İlk hız değerleri, enerjinin korunumu ilkesinden;

$$v_{01} = 1,950 \text{ m/s}$$

$$v_{02} = 2,460 \text{ m/s}$$

$$v_{03} = 2,967 \text{ m/s}$$
- Darbe Enerjisi;

$$v = 2 \text{ m/s için } E=12,7 \text{ J}$$

$$v = 2,5 \text{ m/s için } E=18,84 \text{ J}$$

$$v = 3 \text{ m/s için } E=28,57 \text{ J}$$

V-yatağı tasarımı için anahtar noktalar ve değerleri Çizelge 1 de verilmiştir.

Çizelge 1. Yatak tasarım noktaları (Key points for Vee)

nokta	x	y
1	0	0,051
2	0,051	0
3	0,1	0
4	0,1	-2
5	-0,1	-2
6	-0,1	0
7	-0,051	0

Modellemede kolaylık açısından deneylerde kullanılan vurucunun yerine küresel bir vurucu tasarlanmıştır. Bu nedenle gerçek kütlelerin boruya etki etmesi için vurucu yoğunlaştırılmıştır. Vurucunun yoğunluğu 877286,4 kg/m³ olarak hesap edilmiş ve benzeşimde bu değer kullanılmıştır.

Hava direnci ihmal edilmiştir. Vurucu dairesel hareket yapmamaktadır. Boru merkezden 100 mm'lik mesafelerde x ve z yönlerinde konum değişimi yapmamaktadır.

2.2.3 Analiz Aşamalarının Özeti (Summary of Analysis Steps)

Analiz tipinin tanımlanması,
 Preferences'ın ayarlanması,
 Geometrilerin modellenmesi,
 Numunenin modellenmesi,
 Vurucunun modellenmesi,
 Yatak modellenmesi,
 Element tipinin ve malzeme özelliklerinin tanımlanması,
 Element tipinin tanımlanması,
 Malzemelerin özelliklerinin tanımlanması,
 Vurucunun mesh işleminin yapılması,
 Numunenin mesh işleminin yapılması,
 Yatak mesh işleminin yapılması,
 Vurucu bileşeninin oluşturulması,
 Numune bileşeninin oluşturulması,
 Yatak bileşeninin oluşturulması,
 Kontak parametrelerinin belirtilmesi,
 Yüklerin uygulanması,
 Vurucuya ilk hızın uygulanması,
 Çıktı kontrollerinin belirtilmesi,

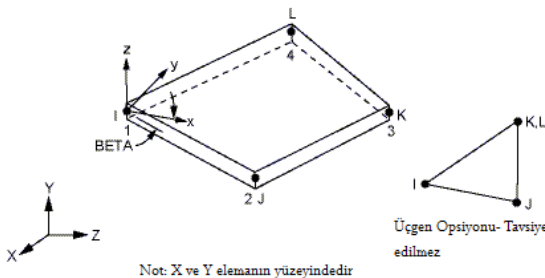
Çözümün elde edilmesi,
Darbe-yutulan enerji değişimi, Kuvvet-zaman ve hız-zaman grafiklerinin elde edilmesi,
Sonuçların incelenmesi.

2.3 ANSYS Çalışmaları (ANSYS Studies)

Düşük hızlı darbeye maruz E-camı/epoksi filaman sarım kompozit boruların dinamik cevabı araştırılmıştır. Filaman sarım kompozit boru ve darbe olayı modellenmiştir. Benzeşimde kullanılan vurucu 24 mm çapında, küresel bir geometriye sahiptir. Vurucu kütlesi 6,35 kg'dır. İnceleme 2, 2,5 ve 3 m/s'lik çarpma hızlarında yapılmıştır. Çalışmalarda $[+55^\circ, -55^\circ]_3$, $[+55^\circ, -55^\circ]_4$, ve $[+55^\circ, -55^\circ]_5$ olmak üzere 6, 8 ve 10 tabakalı E-camı/epoksi malzemeden 72 mm iç çapında, bir V-yatağında dönmeden durabilen kompozit borular kullanılmış ve darbe her bir borunun enine yapılmıştır. Elde edilen bu veriler doğrultusunda, malzeme üzerine darbe esnasındaki kuvvet-zaman diyagramı, Darbe enerjisi-yutulan enerji değişimi, hız-zaman değişimi grafikleri elde edilmiştir.

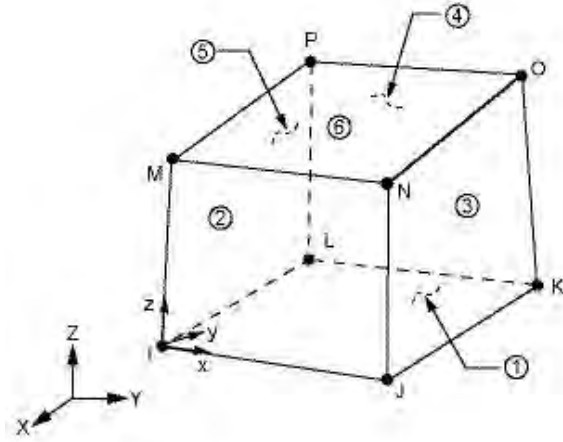
2.3.1 Analiz Elemanları (Analysis Elements)

SHELL163: İnce sarım yapıdır. 4-düğümülü büküm ve zar kabiliyetine sahip bir elemandır (Şekil 1). 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. Sadece sarım yapısında kullanılır.



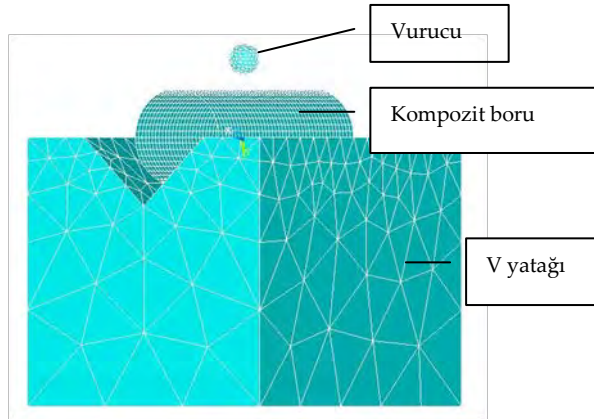
Şekil 1. SHELL163 Geometrisi (Geometry of element SHELL163)

SOLID164: SOLID164 3 boyutlu katı modellemede kullanılmakta olup x, y ve z koordinatlarında konum, hız ve ivme değerleri olmak üzere sekiz noktada tanımlanır (Şekil 2).



Şekil 2. SOLID164 Geometrisi (Geometry of element SOLID164)

Modellenmiş ve elemanlara bölünmüş bileşenler Şekil 3 te görülmektedir.



Şekil 3. Elemanlara bölünmüş problem geometrisi (Geometry of meshed problem)

Analizde kullanılan temas tipi "Surface to Surf" ve "Automatic(ASTS)" kullanılmıştır.

Analizde boruya uygulanan basınçlar şunlardır:

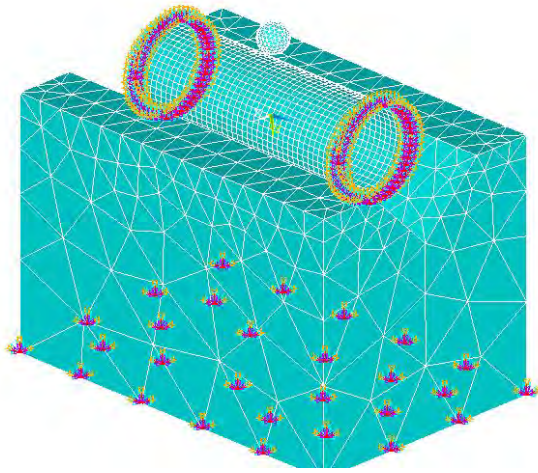
6 katmanlı için : 112, 128 , 144 [bar]

8 katmanlı için : 154, 176, 198 [bar]

10 katmanlı için: 196, 224, 252 [bar]

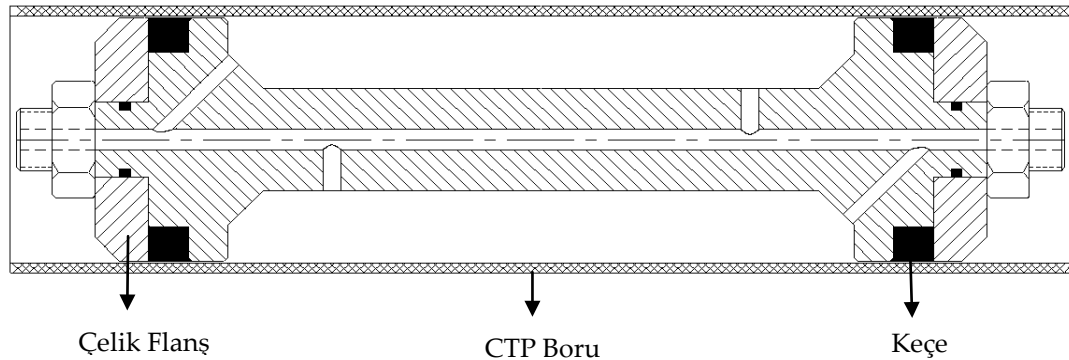
değerleri girilir.

Kısıtları uygulanmış problem Şekil 4 te görülmektedir.



Şekil 4. Probleme kısıtların uygulanması
(Constraints of the problem)

6, 8 ve 10 tabakalı ve değişen basınçlı borular için ve 2, 2,5 ve 3 m/s vurucu hızları için



Şekil 5. Serbest uçlu iç basınç test aparatı (Şahin, 2011) (Open-ended internal pressure test apparatus)

Kompozit boruların iç basınç deneylerinde açık uçlu aparat kullanılmaktadır (Şahin, 2011). Bu aparatın ayrıntılı resmi Şekil 5 te görülmektedir. Aparatın keçe kısımlarından boru yataklanmaktadır. Bu nedenle analizde keçelere karşılık gelen 200 mm lik kısımdan kısıtlama uygulanmıştır.

Modelleme V-yataklı ve yataksız olarak tekrarlanmıştır. Boru uçlarının x ve y koordinatlarında hareketi sınırlandırılarak analizler yapılmıştır. Boru her katman sayısına iç içe boru olarak modellenmiş ve analizleri yapılmıştır.

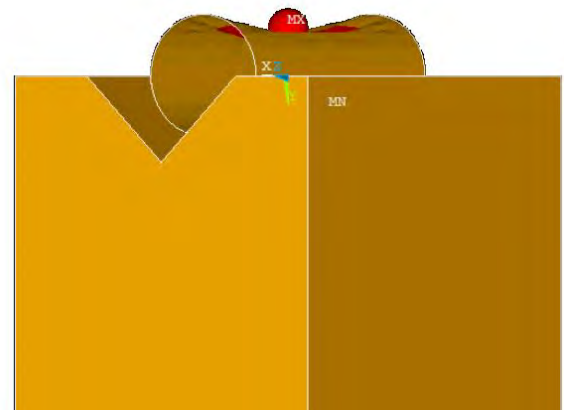
Yapılan bu analizler zaman aralığı değiştirilerek tekrar edilmiştir. Farklı basınçlar için bu analizler yinelenmiştir. Borunun tüm uzunluğu modellenerek yapılan bu analizlerde istenen sonuca yaklaşamamıştır.

izlenecek yol aynıdır. Toplam analiz sayısı 36 dır.

3. SİMÜLASYON SONUÇLARININ İNCELENMESİ (INVESTIGATION of SIMULATION RESULTS)

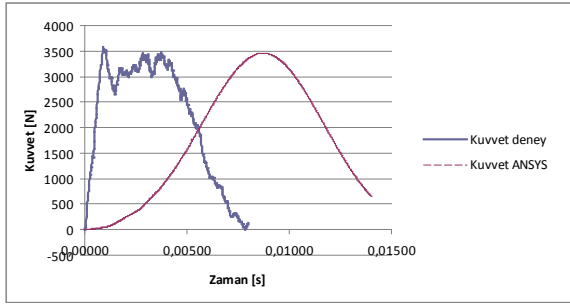
3.1. Simülasyon (Simulation)

Analizlerde farklı modelleme ve analiz yöntemleri uygulanmıştır. Bu analiz sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılmış, ANSYSde simülasyonu yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda Shell 163 elemanı kullanılarak yapılan analizlerde boru mesnetlenmesi yapılmadığında vurucudan gelen kuvvet neticesinde boruda büzülme olmakta ve borunun tamamı ezilmektedir.



Şekil 6. Analiz sonucunda kompozit borudaki deformasyon (Deformation of composite tube after analysis)

Vurucu dört parça halinde modellenmiş ve vurma noktasının tam boruya gelmesi sağlanmıştır. Yapılan bir analiz neticesinde deforme olmuş kompozit boru Şekil 6 da görülmektedir.



Şekil 7. 10 sarımlı boruların 2 m/s çarpma hızı ile analiz sonucunun deneysel çalışma ile karşılaştırılması (Comparison of the experimental and the simulation results for 10 ply tube impacted at 2 m/s velocity)

Yapılan simülasyonun doğrulanması amacıyla 10 sarım sayısı ve 2 m/s lik parametreler ile yapılan analiz sonucunda elde edilen kuvvet-zaman grafiği (Uyaner ve diğ., 2010), analizdeki kuvvet-zaman grafiği ile karşılaştırılmış ve en büyük kuvvete ait değerler birbirine yakın çıkmıştır (Şekil 7). Uyaner ve diğ., 2010 da darbe esnasında oluşan hasarlar kuvvetin değişiminde dalgalanmalara sebep olmuştur. Ayrıca yine bu hasarlar sebebiyle analiz neticesinde ortaya çıkan temas süresi deneysel çalışmadan daha kısa olmuştur. ANSYS® analizinde bu çalışma için kullanılan elemanlarda hasar modelleri bulunmadığından kuvvetin zamana bağlı değişimi tipik çan eğrisi şeklinde ortaya çıkmıştır.

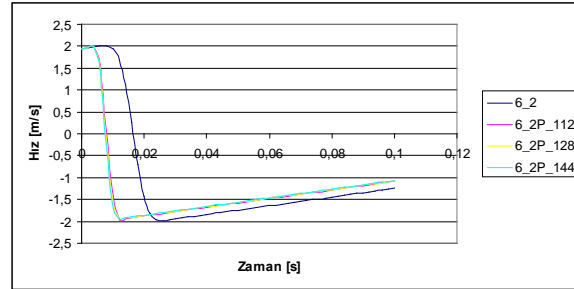
Elde edilen bu veriler doğrultusunda, malzeme üzerine darbe esnasındaki kuvvet-zaman diyagramı, darbe enerjisi-yutulan enerji değişimi, hız-zaman değişimi grafikleri elde edilmiştir. Simülasyonlar basınçlı ve basınçsız olarak yapılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıya çıkarılmıştır. Serilerde kullanılan notasyonda şu sıra gözetilmiştir: Tabaka sayısı_Çarpma hızı_P_İç basınç değeri. P etiketi bulunmayan seriler iç basınçsız olanlara aittir.

3.2. Hız-zaman karşılaştırması (Velocity-time)

Statik patlama basıncı 320 bar olan kompozit borunun iç basınçsız ve statik patlama basıncının %35, %40 ve %45 değerinde oluşan 112, 128 ve 144 bar basınç altında analizinde Şekil 8 deki hız grafiği oluşmaktadır. Bu grafikte 2 m/s çarpma hızına sahip vurucu incelenmiştir.

Boru basınç altına girdiğinde genişlediğinden vurucunun boruya temas süresi azalmıştır. Farklı basınçların birbiri ile karşılaştırmasında yüksek basınçta genişleme daha fazla olduğundan vurucunun boruya erişmesi daha az zaman almaktadır.

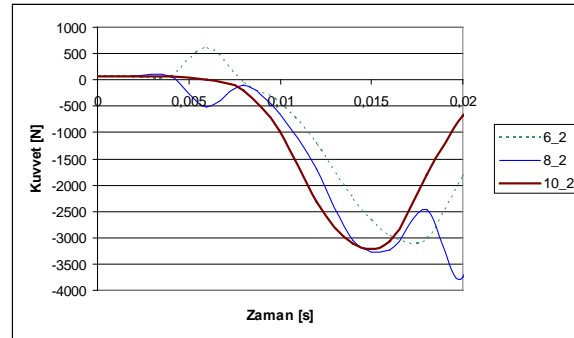


Şekil 8. Altı tabakalı boru için hız-zaman grafiği (Velocity versus time for 6 ply tube)

Basınçlı veya basınçsız boruya temas eden vurucu hızı sıfır değerine ulaştığında -y yönüne hareketine başlamakta ve ilk hızının verdiği enerji ile borudan uzaklaşmaktadır.

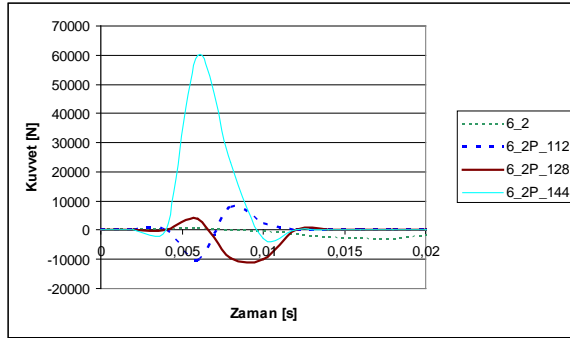
2,5 m/s ve 3 m/s çarpma hızları için benzer değişimler elde edilmiştir. Yer kazancı nedeniyle bunlar makalede verilmemiştir. Tüm sonuçlar Güvensoy, 2010 da mevcuttur.

3.3. Kuvvet- zaman karşılaştırması (Force-time)



Şekil 9. Farklı katmanlı borularda temas anındaki kuvvet-zaman grafiği (Force-time histories for various plied composite tubes)

6, 8 ve 10 katmanlı borular için vurucunun temas noktasına uyguladığı kuvvetin zamana bağlı değişimi 2 m/s çarpma hızı için Şekil 9'da verilmiştir. Çarpmadan önceki kuvvet dalgalanması hesaplama aralığının azlığından ve interpolasyon hesap hatasından kaynaklanmaktadır. Aynı durum benzer şekilde 2,5 m/s ve 3 m/s hızlarında da görülmüştür.



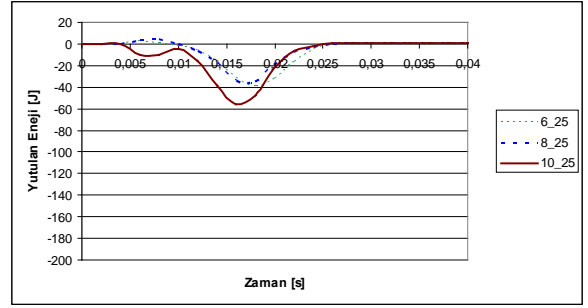
Şekil 10. Farklı basınçlar için borudaki temas kuvveti-zaman grafiği (*Force-time histories for various composite tubes subjected to various internal pressure*)

Statik patlama basıncı 320 bar olan kompozit borunun iç basınçsız ve statik patlama basıncının %35, %40 ve %45 i olan 112, 128 ve 144 bar iç basınca maruz kompozit boruların 2 m/s çarpma hızı için yapılan analizlerden elde edilen kuvvet değişimleri Şekil 10 da verilmiştir. Basıncılı veya basınçsız boruya temas eden vurucu hızı sıfır değerine ulaştığında -y yönüne hareketine başlamakta ve ilk hızının verdiği enerji ile borudan uzaklaşmaktadır.

Basınçsız boruların analizinde olduğu gibi 2,5 m/s ve 3 m/s lik çarpma hızları için elde edilen kuvvet-zaman değişimleri 2 m/s çarpma hızı için elde edilenlere benzerdir.

6.4. Darbe enerjisi-yutulmuş enerji karşılaştırması (Impact energy – absorbed energy)

Değişik sayıdaki katmanlara sahip iç basınçsız kompozit boruların darbe simülasyonunda yutulmuş enerjinin zamana bağlı değişimleri de elde edilmiştir. Bu veri yığınları arasından temsil amacıyla 2,5 m/s çarpma hızı için olanı Şekil 11 de sunulmuştur. Bu grafik incelendiğinde 10 katmanlı borunun diğerlerine nazaran daha fazla enerji yuttuğu görülmektedir.



Şekil 11. Farklı katman sayılı borudaki temas anında yutulmuş enerji-zaman grafiği (*Absorbed energy-time histories for various plied composite tubes*)

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION and SUGGESTIONS)

Deney sonuçları ile analiz sonuçlarının farklı çıkmasının bir nedeni boruda darbe esnasında hasarın oluşması ve hasarın mekanizmasına göre (matris çatlaması, elyaf kopması ve tabaka ayrılması) kuvvet değerlerinde süreksizlik oluşmasıdır. Hasarsız cismin darbesinde kuvvet-zaman diyagramı tipik çan-eğrisi şeklinde çıkmaktadır.

Analiz olarak ince tabakalı eleman kullanılması neticesinde deneysel-analiz farkı artmaktadır. LS-Dyna için Thick shell elemanlarının ANSYS modülüne eklenmesi ile incelemelerin yeniden yapılabileceği ve deneysel-analiz farkının azalacağı beklenmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı öğrencisi Serdar GÜVENSOY'un, Doç. Dr. Mesut UYANER danışmanlığında hazırlanan *Filaman Sarım Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Davranışının Simülasyonu* isimli yüksek lisans tezinden derlenmiştir. ANSYS-LS-Dyna yazılımı için Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 10201035 numaralı proje ile destek alınmıştır.

SEMBOLLER VE KISALTMALAR (SYMBOLS and ACRONYMS)

$DENS$: Yoğunluk [kg/m^3],
 E_x : x ekseninde elastisite modülü [GPa],

E_y	: y ekseninde elastisite modülü [GPa],	G_{xz}	: xz kayma modülü[GPa],
E_z	: z ekseninde elastisite modülü [GPa],	v_{01}	: 1. Lineer hız,
ν_{xy}	: xy düzleminde Poisson oranı,	v_{02}	: 2. Lineer hız,
ν_{yz}	: yz düzleminde Poisson oranı,	v_{03}	: 3. Lineer hız,
ν_{xz}	: xz düzleminde Poisson oranı,	P	: Boru iç basıncı [bar, 1×10^5 Pa].
G_{xy}	: xy kayma modülü [GPa],		
G_{yz}	: yz kayma modülü [GPa],		

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abatan, A., Hu, H. and Olowokere, D., 1998, "Impact Resistance Modeling of Hybrid Laminated Composites", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 11, 249-260.
- Abrate, S., 1998, *Impact on Composite Structures*, Cambridge, Cambridge University Press. 135-160.
- ANSYS® Release 12.1, ANSYS, Inc. Yardım dosyaları
- Aslan, Z., Karakuzu, R. and Okutan, B., 2003, "The Response of Laminated Composite Plates under Low-Velocity Impact Loading", *Composite Structures*, 59, 119-126.
- Aslan, Z. and Karakuzu, R., 2002, "Transient Dynamic Analysis of Laminated Composite Plate Subjected to Low-Velocity Impact", *Mathematical and Computational Applications*, Vol. 7, No.1, 73-82.
- Baucom, J.N., and Zikry, M.A., 2005, "Low Velocity Impact Damage Progression in Woven E-glass Composite Systems", *Composites*, 36, 658-664.
- Belingardi, G., Vadori, R., 2002, "Low Velocity Impact Tests of Laminate Glass-Fiber-Epoxy Matrix Composite Material Plates", *International Journal of Impact Engineering*, 27, 213-229.
- Belingardi, G., Vadori, R., 2003, "Influence of Laminate Thickness in Low Velocity Impact Behavior of Composite Material Plate", *Composite Structures*, 61, 27-38.
- Christoforou, A.P. and Yiğit, A.S., 1996, "Impact of Composite Structures-The Momentum Balance Method", *Journal of Composite Materials*, 30,1068-1086.
- Dobyns, A.L., 1981, "Analysis of Simply Supported Orthotropic Plates Subjected to Static and Dynamic Loads", *AIAA Journal*, 19,642-680.
- Gibson R.F., 1994, *Principles of Composite Material Mechanics*, Mc-Graw Hill. 392-393.
- Gong, S.W. and Lam, K.Y., 1999, "Transient Response of Stiffened Composite Plates Subjected to Low Velocity Impact", *Composites Part B*, 30, 473-484.
- Goo, N.S. and Kim, S.J., 1997, "Dynamic Contact Analysis of Laminated Composite Plates under Low Velocity Impact" *AIAA Journal*, 35, 1518-1521.
- Güvensoy, S., 2010, *Filaman Sarım Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Davranışının Simülasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Husseinzadeh, R., Shokrieh, M.M. and Lessard, L., 2006, "Damage Behavior of Fiber Reinforced Composite Plates Subjected to Drop Weight Impacts", *Composite Science and Technology*, 66, 61-68.
- Kim, J.K. and Kang, K.W., 2001, "An Analysis of Impact Force in Plain-weave Glass-epoxy Composite Plates Subjected to Transverse Impact", *Composite Science and Technology*, 61, 135-143.
- Lal, K.M., 1982, "Prediction of Residual Tensile Strength of Transversely Impacted Composite Laminates", *Structure Solid Mech. NASA CP-2245*, pp.97-111.
- Lal, K.M., 1983, "Low Velocity Transverse Impact Behavior of 8-Ply Graphite-Epoxy Laminates" *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2, 216-225.
- Lee, L.J., Huang, K.Y. and Fann, Y.J., 1993, "Dynamic Responses of Composite Sandwich Plate Impacted By Rigid Ball", *Journal of Composite Materials*, 27, 1238-1256
- Lee, Y.S., Kang, K.H. and Park, O., 1997, "Response of Hybrid Laminated Composite Plates under Low Velocity Impact", *Computers and Structures*, 65, 965-974.

- Lifshitz, J.M., 1976, "Impact Strength of Angle Ply Fiber Reinforced Materials", *Journal of Composite Materials*, 10, 92-101.
- Mili, F. and Necip, B., 2001, "Impact Behavior of Cross-Ply Laminated Composite Plates under Low Velocities", *Composite Structures*, 51, 237-224.
- Mitreviski, T., Marshall, I.H., Thomson, R., Jones, R. Whittingham, B., 2004, "The Effect of Impactor Shape on the Impact Response of Composite Laminates", *Composite Structures*, 67, 139-148.
- Prasad, C.B., Ambur, D.R., ve Starnes, J.H.Jr., 1994, "Response of Laminated Composite Plates to Low Speed Impact By Different Impactors" *AIAA Journal*, 32, 1270-1276.
- Ramkumar, R.L., ve Chen, P.C., 1982, "Low Velocity Impact Response of Laminated Plates" *AIAA Journal*, 21, 1448-1452.
- Rotem, A., ve Lifshitz, J.M., 1971, "Longitudinal Strength Of Unidirectional Fibrous Composite Under High Rate Of Loading", *Proc. 26th Annual Tech. Conf. Soc. Plastics Industry Reinforced Plastics, Composites Division*, Washington, DC, Section 10-G: pp. 1-10.
- Samancı, A., Tarakçioğlu, N., Uyaner, M., 2004, "Yüzey Çatlaklı Filaman Sarım CTP Borularda Sarım Açısı ve Çentik Derinliğinin İç Basınç Yorulma Davranışına Etkisi", *11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu*, 19-21 Nisan 2006, Denizli, TÜRKİYE.
- Sankar, B.V., 1992, "Scaling of Low Velocity Impact for Symmetric Composite Laminates", *Journal of Reinforced Plastics Composites*, 11, 297-305.
- Sierakowski, R.L., Nevil, G.E., Ross, A., and Jones, E.R., 1971, "Dynamic Compressive Strength and Failure of Steel Reinforced Epoxy Composites", *Journal of Composite Materials*, 5, 362-377.
- Sierakowski, R.L., and Chaturvedi, S.K., 1997, *Dynamic Loading and Characterization of Fiber-Reinforced Composites*. New York, Wiley.
- Sun, C.T., ve Chattopadhyay, S., 1975, "Dynamic Response of Anisotropic Laminated Plates under Initial Stress to Impact of a Mass", *ASME Journal of Mechanics*, 42, 693-698.
- Stronge, W.J., 2000, *Impact Mechanics*, Cambridge, Cambridge University Press. 1-26.
- Şahin, A., 2011, *Düşük Hızlı Darbe Görmüş Filaman Sarım E-Camı/Epoksi Boruların İç Basınç Altında Yorulma Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Uyaner, M., Kara, M., Gemi, L., "Filaman Sarım E-Camı/Epoksi Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Sonrası Mukavemeti", *13th International Materials Symposium (IMSP'2010)*, 13-15th October 2010, Pamukkale University, Denizli, Turkey.
- Wang, H., ve Vukhanh, T., 1994, "Damage Extension in Carbon Fiber/PEEK Cross Ply Laminates under Low-Velocity Impact", *Journal of Composite Materials*, 28,684-704.
- Whittingham, B., Marshall, I.H., Mitrevski, T., Jones, R., 2004, "The Response of Composite Structures with Pre-Stress Subject to Low Velocity Impact Damage", *Composite Structures*, 66, 685-698.
- Whitney, J.M. and Pagano, N.J., 1970, "Shear Deformation in Heterogeneous Anisotropic Plates", *Journal of Applied Mechanics*, 37, 1026-1031.

