

## Filaman sarım hibrit borularda darbe ön hasarının statik patlama mukavemetine ve hasar gelişimine etkisinin incelenmesi

Lokman GEMİ

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Seydişehir MYO, Konya/TÜRKİYE, lgemi@konya.edu.tr

### Özet

Filaman sarım kompozit borular yüksek basınçta kimyasal madde içeren akışkanların iletilmesinde, endüstriyel atıkların uzaklaştırılmasında, petrol ve doğalgaz iletim hatlarında kullanılmaktadır. Kullanım sırasında kompozit boruların uğrayacağı düşük hızlı darbeler; matris çatlakları, elyaf kopmaları ve özellikle tabakalar arası ayrılma gibi gözle zor tespit edilebilecek hasarlara yol açarlar. Oluşan bu hasarlar borularda hem mukavemet kaybına hem de yorulma ömründe düşüşe neden olabilirler. Bu amaçla cam/karbon/cam sıralaması kullanılarak  $[\pm 75_g^\circ/\pm 55_c^\circ/\pm 45_g^\circ]$  konfigürasyona sahip hibrit kompozit borular üretilmiştir. ANSI/AWWA C950 standardında ön görülen çalışma koşulları esas alınarak CTP borular basınç sınıflarına ayrılmış ve boruların işletme basınç değerleri 3, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 ve 48 MPa teğetsel ön gerilmeler olacak şekilde test koşulları belirlenmiştir. Düşük hızlı darbe hasarının etkisinin incelenmesi amacıyla, yukarıda belirtilen ön gerilmeler altında çalışan borular üzerine 20J enerjiyle düşük hızlı darbe uygulanmış ve ön hasar oluşturulmuştur. Düşük hızlı darbe sırasında boruların dinamik davranışları ve oluşan hasar incelenmiştir. Yapılan çalışma neticesinde 24 MPa ön gerilme değerinden daha yüksek gerilmeler altında, darbe ön hasarının, boruların yorulma davranışına etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Bu aşamadan sonra, ANSI/AWWA C950 standardında ön görülen işletme basıncı kategorilerinden 6, 12 ve 18 MPa ön gerilme değerleri esas alınarak deney parametreleri belirlenmiştir. Darbe hasarlı hibrit borular, ASTM D 1599-99 standardına göre statik iç basınç testine tabi tutulmuştur. Boruların patlama mukavemetleri belirlenmiştir ve oluşan hasarlar incelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Düşük hızlı darbe, Elyaf takviyeli plastik, Filaman sarım, Hasar davranışı, Hibrit kompozit, İç basınç

### Abstract

Filament wound composite pipes are used in high pressure chemical's transportation, industrial waste disposition, oil and natural gas transmission lines. In case of this type of pipes experience low velocity impacts, barely visible damages such as matrix cracking, fiber breakage and delamination can form. These damage types can result in both loss of strength and decrease of fatigue life. For investigation of this situation, composite pipes with glass/carbon/glass sequence have been produced at  $[\pm 75_g^\circ/\pm 55_c^\circ/\pm 45_g^\circ]$  configuration. In accordance with ANSI/AWWA C950 standard, the pipes classified into operating pressure classes and testing pressures determined such that tangential pre-stress are 3, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 and 48 MPa. In order to investigate the effect of low velocity impact damage and dynamic behavior, the pipes subjected to 20J low velocity impact while they are working under different pressures. After the tests, it is observed that when the operating pressure in higher than 24 MPa, the lows velocity impact damage does not affect the fatigue life of the pipes. After that point, the testing parameters modified by considering only pressure classes which yields 6, 12, 18 MPa's tangential pre-stresses. After the low velocity impact, the pipes subjected to internal pressure test according to ASTM D 1599-99 standard and burst pressure and damage formation have been investigated.

**Key words:** Low velocity impact, Fiber reinforced plastic, Filament wound, Damage behavior, Hybrid composite, Internal pressure

## 1. Giriş

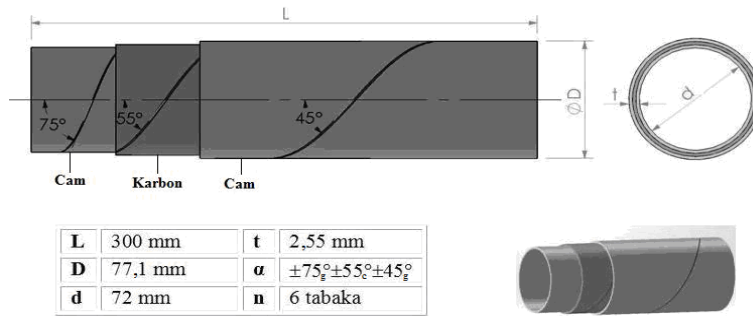
Birçok mühendislik uygulamasında kullanılan kompozit malzemelerin; son yıllarda teknolojinin de gelişmesi ile üretim teknikleri gelişmekte ve kullanım alanları hızla artmaktadır. Birçok iletim alanında kullanılan bu malzemeler üretim, servis ve bakım işlemleri sırasında yabancı cisimlerin darbesine maruz kalabilirler. Darbe yüklerine maruz kalan malzemenin mekanik özelliklerindeki değişim doğru hesap edilebilmelidir. Darbe sonrası veya farklı şekillerde hasarlandırılmış kompozit boruların kalan (artık) patlama mukavemetlerin tespiti ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Curtis ve ark. darbeye ya da statik batmaya maruz kalan filaman sarım kompozit tüplerin hasar, deformasyon ve kalan patlama mukavemetini incelemişlerdir. Statik batma ve düşük hızlı darbe sonuçları karşılaştırılmıştır. Elyaf burkulmasının kalan patlama mukavemetini %60 a kadar düşürdüğünü tespit etmişlerdir [1]. Deniz ve Karakuzu  $[\pm 55^\circ]_3$  sarım açılı cam-epoksi kompozit boruların darbe davranışına deniz suyuna daldırmanın etkisini deneysel olarak incelenmişlerdir. Kompozit borular 50 mm, 75 mm, 100 mm ve 150 mm lik dört farklı çapta seçilmiştir. Borular laboratuvar ortamında % 3.5 tuz oranına sahip deniz suyunda 3, 6, 9 ve 12 aylık periyotlarda bekletilmiştir. Bu periyotların sonunda numuneler 20 °C ortam sıcaklığında 15 J, 20 J ve 25 J olacak şekilde üç farklı enerji seviyesinde darbeye maruz bırakılmıştır. Absorbe edilen rutubet, deniz suyundaki tuz, boruların çapı, kalan mukavemet, maksimum temas kuvveti, absorbe edilen enerjinin kompozit boruların hasarı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [2].  $(\pm 55^\circ)_{10}$  filaman sarımlı cam epoksi silindirlerde meydana gelen darbe hasarının hidrostatik basınç direncine etkisini incelemiştir. Öncelikle hasarsız numunelere dış basınç uygulanmış ve patlama basınçları tespit edilmiştir. Daha sonra farklı enerji seviyelerinde hasarlandırılmış numunelere dış basınç uygulayarak numunenin patlama basıncındaki değişimler tespit edilmiştir [3]. Gning ve ark. kalın  $\pm 55^\circ$  filaman sarımlı cam epoksi tüplerine statik batma ve düşük hızlı darbe testleri uygulamışlardır. Ağırlık düşürme darbe testleri, 55 mm iç çaplı 6 mm kalınlığındaki tüplere 45 J enerji seviyesine kadar gerçekleştirilmiştir. Darbe hasarının patlama basıncına etkisi tanımlanmıştır. Darbe enerjisinin artmasıyla patlama basıncının düştüğü tespit edilmiştir [4]. Uyaner ve ark. filaman sarım tekniğiyle üretilmiş cam takviyeli plastik E-camı/epoksi, CTP boruların düşük hızlı darbe sonrası mukavemetini incelemişlerdir. Çalışmalarında,  $(\pm 55^\circ)_5$  sarım açılı filaman sarım CTP borulara 6,35 kg ağırlıklı 24 mm yarı küresel vurucu ile 2, 3 ve 4 m/s'lik çarpma hızlarında düşük hızlı darbe testleri yapılmıştır. Ayrıca hasarlı kompozit borulara ASTM D 1599-99 standardına göre statik patlatma testi uygulanmıştır. Çalışmadan elde ettikleri sonuçlara göre statik patlatma testi sonucunda, darbe enerjisinin artmasıyla boru numunesinin patlama basıncı değerinin düştüğünü tespit etmişlerdir [5]. Uçları açık ve kapalı filaman sarım CTP borular iç basınç testlerine tabi tutulmuştur [6,7,8,9]. Kısa süreli deneylerde, sarım açısının artışına bağlı olarak patlama basıncına yakın gerilmelerde, damlacıklar halinde sızıntının olduğu ve basıncın azaldığı gözlenmiştir. Bu olayı Jones ve ark. içten itibaren elyafa paralel oluşan radyal çatlakların, katlar arasındaki elyaf kesişme noktasında bir sızıntı yolu oluşturmalarıyla açıklamışlardır. Sürünmenin, kısa süre sızıntı gerilmesinin altındaki gerilmelerde çok uzun sürelerde meydana geldiği, bu olaya aslında radyal çatlamanın yol açtığı bilinmektedir. Tabakalı kompozit malzemelerde güvenilirlik yaklaşımıyla hasar mukavemetinin optimizasyonu konusunu incelemişlerdir [10]. Yaptıkları çalışmada iç basınç altındaki filaman sarım CTP boruların hasar davranışını incelemişlerdir. Bu boruların sızıntı hasarının, yüzeyin ıslanması ile başladığını rapor etmişlerdir [11]. Gemi ve ark. çalışmalarında  $\pm 55^\circ$  sarım açısına sahip fonksiyonel olarak derecelendirilmiş hibrit borular kullanmışlardır. Üretilen deney numunelerine 4 bar, 16 bar ve 32

bar basınç değerinde iç basınç uygulanmıştır. Farklı değerlerde iç basınç uygulanan hibrit boru numunelerine 5 J, 10 J, 15 J ve 20 J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testleri yapılmış ve numunelerin düşük hızlı darbe cevabı belirlenmiştir. Belirlenen basınç değerlerinde 20 J darbe hasarlı borular statik patlatma ile kalan mukavemetleri tespit edilmiştir [12]. Son yıllarda filaman sarım kompozit boruların düşük hızlı darbe sonrası kalan mukavemetleri tespiti ile ilgili birçok çalışma da yapılmıştır [13-14].

## 2. Materyal ve Metod

### 2.1. Hibrit kompozit boru üretimi

Bu çalışmada kullanılan hibrit borular; filaman sarım yöntemi ile cam/karbon/cam malzeme sırasında  $\pm 75_g^\circ/\pm 55_c^\circ/\pm 45_g^\circ$  sarım açılarında üretilmiştir. Cam-karbon elyaf/epoksi boruların hazırlanmasında; elyaf malzemesi olarak 1200 teks (17  $\mu\text{m}$  çapında) E camı ve 12K A-42 800 teks karbon elyaf, matris malzemesi olarak da Momentive, Bisphenol A, Epikote 828 reçine kullanılmıştır. Sertleştirici olarak Epikure 875 (Curing agent, Modified Carboxylic Acid Anhydride) kullanılmıştır. Hibrit boruların geometrik ölçüleri Şekil 1.'de verilmiştir. Kullanılan elyafların ve matrisin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



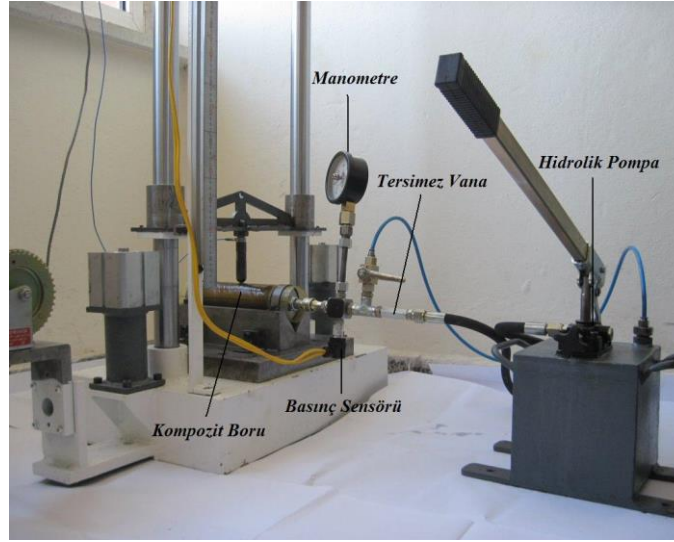
Şekil 1. Numune geometrisi

Tablo 1. Kullanılan elyafların ve matrisin özellikleri

	E (GPa)	$\sigma_{çek}$ (MPa)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\epsilon_{kop}$ (%)
Elyaf: E-camı	73	2400	2,6	1,5-2
Elyaf: Karbon-12K A-42	230	3500	1,75	1,5
Matris: Epoksi Reçine	3,4	50-60	1,2	4-6

### 2.2. Düşük Hızlı Darbe Deneyleri

Teğetsel ön gerilme altındaki hibrit kompozit boru numunelerinin düşük hızlı darbe cevaplarının araştırılması için Şekil 2'de görülen özel olarak imal edilmiş düşük hızlı darbe cihazı ve teğetsel ön gerilme sağlamak için iç basınç uygulama ünitesi kullanılmıştır [12]. Numunelerde 6, 12 ve 18 MPa değerlerinde teğetsel ön gerilmeler hesaplanmıştır. Hesaplanan teğetsel ön gerilme değerlerinde numunelere 20 J enerjide düşük hızlı darbe deneyleri uygulanmıştır.



Şekil 2. Düşük hızlı darbe test cihazı ve teğetsel ön gerilme sağlamak için iç basınç uygulama ünitesi

Darbe öncesi teğetsel ön gerilme uygulamak için serbest uçlu iç basınç test aparatı hazırlanmıştır [15]. Hazırlanan düzenek hibrit kompozit borunun içine, boru iki ucu sızdırmazlık keçeleri üzerine gelecek şekilde monte edilmiştir. Böylece boruya iç basınç uygulandığında boru çapı artarken boru boyu kısalabilmektedir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

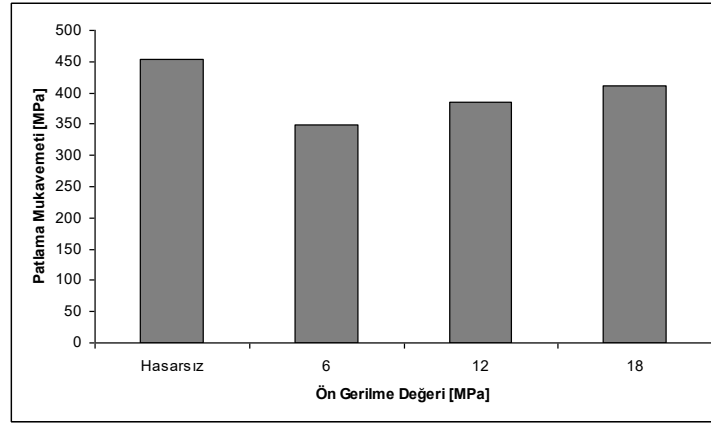
#### 3.1. Darbe ön hasarlı hibrit boruların statik iç basınç patlama deney sonuçları

Hibrit kompozit boru numunelerine farklı teğetsel ön gerilme değerlerinde belli bir enerji seviyesinde darbe yüklemesi yapıldıktan sonra hasarlı borular statik iç basınç patlama testine tabi tutulmuştur. Statik iç basınç patlama testleri; hibrit boru numunelerine darbe ön hasarı oluşturulduktan sonra, statik patlama esnasında meydana gelen hasarları tespit etmek ve kalan patlama mukavemetini elde etmek amacıyla yapılmıştır. Statik iç basınç testi öncelikle hasarsız numuneler için gerçekleştirilmiş ve hasarsız numunenin teğetsel patlama mukavemeti tespit edilmiştir. Daha sonra sırasıyla 6, 12 ve 18 MPa teğetsel ön gerilme değerlerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerin statik iç basınç patlama testleri ile kalan patlama mukavemetleri tespit edilmiştir.

#### 3.2. Darbe ön hasarlı borularda ön gerilme - patlama mukavemet ilişkisi

Düşük hızlı darbe testleri öncesinde, hibrit kompozit boru numunelerine uygulanan teğetsel ön gerilme miktarının azalması, yer değiştirme (çökme) miktarının artmasına neden olmuştur. Artan yer değiştirme miktarı, oluşan darbe ön hasar miktarının artmasına ve kalan patlama mukavemetinin düşük çıkmasına sebep olmuştur. Statik iç basınç patlama deneylerinden elde edilen kalan patlama mukavemetleri Şekil 3'de verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi darbe deneylerinden önce uygulanan teğetsel ön gerilme değeri azaldıkça deney numunelerinin statik iç

basınç patlama mukavemetlerinde düşme meydana gelmiştir. Bunun en önemli nedeni teğetsel ön gerilme azaldıkça numunede meydana gelen hasarların artmasıdır. Hasarların artışının başlıca sebebi ön gerilmenin azalması ile numunenin darbe merkezi ve çevresinde yer değiştirmenin (çökmenin) artmasıdır. Yani, hibrit kompozit borularda hasar gelişimi yer değiştirme (çökme) kontrollüdür.



**Şekil 3.** Hasarsız ve farklı teğetsel ön gerilme uygulanmış hibrit kompozit boru numunelerinde 20 J darbe enerji seviyesi için elde edilen statik iç basınç patlama mukavemet değerleri

Darbeye maruz kalmış deney numunesinde oluşan hasarların artması patlama mukavemetinin düşmesine sebep olmuştur. 20 J darbe enerjisiyle 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlanmış numunenin patlama mukavemetinde yaklaşık olarak %9'lik bir azalma meydana gelmiştir. 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlanmış numunenin patlama mukavemetinde yaklaşık olarak %15'lik bir azalma oluşurken, 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlanmış numunenin patlama mukavemetinde yaklaşık olarak %23'lük bir azalma meydana gelmiştir. Darbe deneyleri esnasında numunelerin ön gerilme etkisinde olmasına rağmen özellikle düşük ön gerilme seviyelerinde darbe sonrasında numunelerde çökmeden dolayı elyaf hasarları meydana gelmiştir. Uygulanan teğetsel ön gerilme değerindeki artış, numunenin dıştan uygulanan yüklere karşı daha az şekil değiştirmesine ve elyaf hasarlarının daha az oluşmasına sebep olmuştur. Patlama mukavemet değerinin azalmasında etkili olan hasar mekanizmalarının birisi de delaminasyondur. İlave olarak numune kesitinde darbe sonrası oluşan matris iç yüzey ve dış yüzey çatlaklarıyla beraber radyal matris çatlakları da patlama basıncının düşmesinde etkili olmuştur. Darbe esnasında teğetsel ön gerilme değeri azaldıkça delaminasyon alanı ve matris çatlakları artmaktadır. Çökme oranına bağlı olan bu artış, hibrit numunenin patlama mukavemet değerinin düşmesine neden olmaktadır. Statik iç basınç patlama testi esnasında, iç basıncın yükselmesiyle beraber tabaka içlerinde oluşan radyal çatlaklar büyümekte ve basınçlı yağ bu çatlaklardan delaminasyon alanına ilerlemektedir. Bu durumda darbe hasarlı numunelerde, basınçlı yağın dış yüzey matris çatlaklarına ulaşması hızlanmakta ve sonuç hasarlarının oluşumu daha düşük basınçlarda gerçekleşmektedir.

### 3.3. Darbe ön hasarlı borularda ön gerilme - patlama mukavemet ilişkisi

Statik iç basınç patlama deneyleri esnasında üç önemli hasar aşaması tespit edilmiştir. Bu hasar aşamaları sırasıyla; sızıntı başlangıcı (terleme veya damlacık), su jeti oluşumu ve sonuç hasarıdır.

Hibrit borularda; beyazlaşma başlangıcı ve yoğun beyazlaşma numune genelinde görülmemiştir. Bunun sebebi  $\pm 75^\circ$  sarımlı cam tabakasının şekil değişimini belli bir noktadan sonra sınırlandırmasıdır. Elyafa dik çekme gerilmeleri ve elyafa paralel kayma gerilmelerinin etkisiyle elyaf doğrultusunda mikro çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Tabakalı kompozit malzemede farklı elyaf yönlenmelerinden dolayı bu katmanların eğilme rijitlikleri farklılık gösterir. Delaminasyonun en önemli sebeplerinden birisi de tabakalar arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığıdır. Özellikle darbe ön hasarlı numunelere uygulanan gerilme değeri arttıkça darbe bölgesinde bulunan tabakalar arası matris çatlakları ilerlemiş ve numunede terleme veya damlama şeklinde ilk sızıntı gerçekleşerek ilk hasar aşaması ortaya çıkmıştır. İç basıncın artmaya devam etmesi nedeniyle numunede meydana gelen sızıntı su jetine dönüşerek ikinci hasar aşamasının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Kısa bir süre sonra yoğun su jeti gerçekleşmiş ve sonrasında infilak ederek elyaf kopması şeklinde kompozit numunede son hasar meydana gelmiştir. Şekil 4’de sırasıyla; hasarsız, 6, 12 ve 18 MPa teğetsel ön gerilmede 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış boruların statik iç basınç patlama testi neticesinde elde edilen sonuç hasar fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 4. Hibrit kompozit boruların statik iç basınç testi sonucu sırasıyla; darbe hasarsız ve 6, 12, 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerde oluşan sonuç hasarının, a) dış ve b) iç görünüşleri

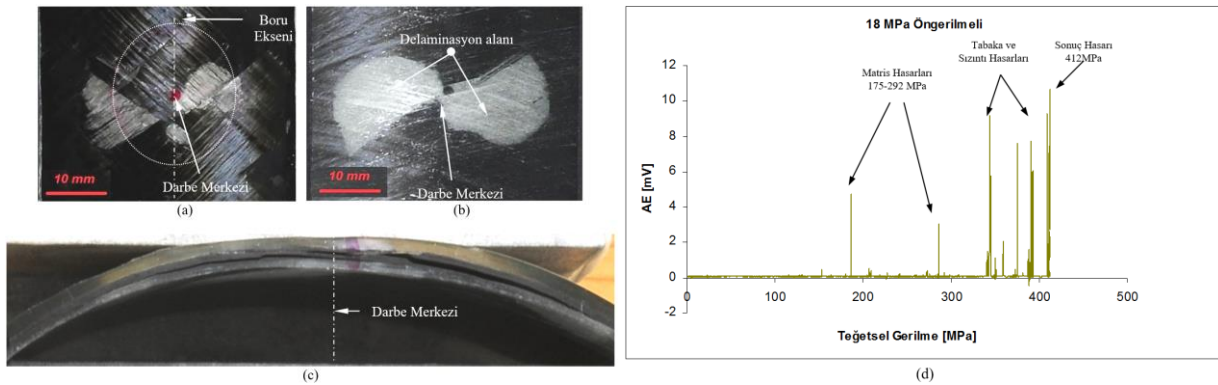
### 3.4. Makro/mikro hasar analizi

*Hasarsız hibrit kompozit deney numunelerinde;* statik iç basınç patlama testi esnasında uygulanan iç basıncın etkisiyle gerilme değerleri artmaya devam etmiş ve 175 MPa ila 204 MPa gerilme



değeri civarında numunede boru eksenine doğrultusunda  $\pm 45^\circ$  cam tabakasında yüzey matris çatlaklarının oluştuğu gözlenmiştir. Numuneye uygulanan gerilme değeri artırıldıkça numunede tabakalar arası matris çatlamları oluşmaya başlamış ve 263 MPa gerilme değerinden sonra şiddetli şekilde sesler gelmiştir. 321 MPa gerilme değerinden sonra numune geometrisinde herhangi bir değişiklik olmaz iken ara ara çatlama sesleri gelmeye devam etmiştir. Numunede herhangi bir eğilme veya sehim gerçekleşmemiştir. 453 MPa gerilme değerine ulaşıldığında numunede özellikle karbon tabakasında bulunan elyafların kopması sonucunda deney numunesi infilak ederek büyük bir gürültüyle patlamıştır. Patlamanın etkisiyle numunede yarıma meydana gelmiş ve sonuç hasar oluşumu gerçekleşmiştir.

18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde; 20 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış hibrit boruların darbe bölgesinde Şekil 5.a'da görüldüğü gibi elyaf doğrultusunda küçük bir delaminasyon alanı mevcuttur. Hasarlı numune statik iç basınç patlama testine maruz bırakıldığında numunede oluşan darbe ön hasarının patlama mukavemetinde düşmeye neden olduğu tespit edilmiştir.

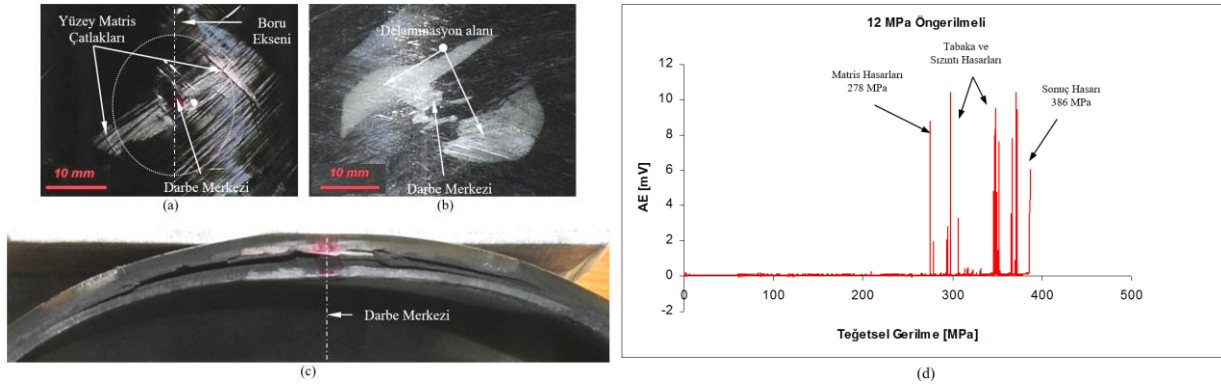


**Şekil 5.** 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerin a) dış ve b) iç görünüşü, c) radyal kesit görünüşü d) patlama esnasındaki akustik veri-gerilme değişimleri

Numunedeki darbe hasarının, hasar gelişimine de etkisi olmuştur. Statik iç basınç patlama testi esnasında iç basıncın artmaya başlamasıyla elyafların teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışması, farklı sarım açlarına sahip elyaf demetlerinin kesiştiği noktalarda oluşan kayma ve basma gerilmelerini arttırmaya başlamıştır. Bu durum darbe hasar bölgesinde hasarın gelişimini hızlandırmıştır. Deney esnasında gözlemlenen makro hasarlardan ve Şekil 5.d'de akustik veri-gerilme değişim grafiğinden de anlaşıldığı gibi 175 MPa ve 292 MPa gerilme aralığında numuneden matris çatlama sesleri geldiği tespit edilmiştir. Uygulanan gerilme değeri 350 MPa'ya ulaştığında darbe bölgesinde, darbe hasarından kaynaklanan tabaka hasarlarının ilerlemesi ile terleme şeklinde sızıntı oluşmaya başlamış ve boru yüzeyini ıslatmıştır. Wang ve ark. kompozit boruların sızıntı hasar başlangıcının yüzeyin ıslanması ile başladığını rapor etmişlerdir. Basıncın artmasıyla numunede oluşan sızıntı da artmaktadır [16]. Uygulanan gerilme değeri 412 MPa olduğunda deney numunesi darbe hasarlı bölgeden infilak ederek patlamış ve sonuç hasarı oluşmuştur. Bu deney numunesinde de hasarsız numunede olduğu gibi yoğun su jeti oluşumu gözlenmemiştir.

12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde; 20 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış borunun darbe bölgesinde Şekil 6.a.b'de görüldüğü gibi  $\pm 45^\circ$  dış ve  $\pm 75^\circ$  iç kısımda elyaf sarım doğrultusunda

delaminasyon alanı ve yüzeyde matris çatlakları mevcuttur. Ayrıca Şekil 6.c'de görüldüğü gibi numune kesitinde radyal çatlaklar oluşmuştur. Statik iç basınç patlama testinde numunedeki darbe ön hasarının patlama mukavemetinde bariz bir düşmeye neden olduğu tespit edilmiştir. Numunedeki darbe ön hasarı statik iç basınç patlama testindeki hasar gelişimi üzerinde de önemli ölçüde etkili olmuştur.



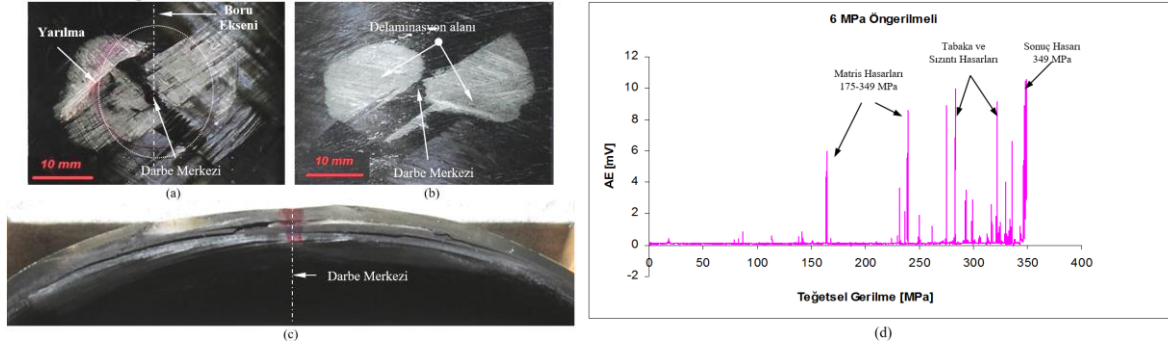
**Şekil 6.** 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerin a) dış ve b) iç görünüşü, c) radyal kesit görünüşü d) patlama esnasındaki akustik veri-gerilme değişimleri

Numunenin farklı elyaf doğrultularının kesiştiği noktalarda meydana gelen gerilmeler çaptaki ve boydaki değişimde etkili olmuştur. 220 MPa ve 278 MPa gerilme aralığında yüzey matris çatlaklarında terleme şeklinde sızıntı olduğu gözlenmiştir. Oluşan sızıntının en önemli sebebi numune kesitinde düşük hızlı darbe neticesinde oluşan iç ve dış yüzey matris çatlaklarıyla beraber tabaka ayrılmaları ve tabakalar içinde oluşan radyal çatlaklardır. İç basıncın etkisiyle bu çatlaklar ilerlemiş ve basınçlı yağ delaminasyon bölgesine dolarak dış yüzeye doğru yükselmiştir. Yüzeyde bulunan matris çatlaklarına ulaşan basınçlı yağ buradan sızmaya başlamıştır. Deney esnasında gözlemlenen makro hasarlardan ve Şekil 6.d'de akustik veri-gerilme değişim grafiğinden anlaşıldığı gibi gerilme değeri 278 MPa civarına ulaştığında numunede matris çatlama sesleri gelmeye başlamıştır. Numunede matris çatlak seslerinin başlaması kompozit numunede darbe hasarının haricinde, başka kalıcı hasarların oluşmaya başladığını, darbe yüklemesinden kaynaklanan tabaka hasarlarının artmaya başladığı ve elyaf matris ara yüzey ayrılmalarının oluştuğunu işaret etmektedir. Basıncın artmaya devam etmesi neticesinde numunede oluşan tabaka hasarının ilerlemesi ile sızıntıda artmaya devam etmiş ve damlacık şekline dönüşmüştür. Maksimum mukavemet değerine yakın gerilme değerinde sızıntı su jetine dönüşmüştür. 386 MPa gerilme değeri aralığında numunede darbe merkezinden infilak etme şeklinde bir patlama ile sonuç hasarı meydana gelmiştir.

6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde; 20 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış borunun darbe bölgesinde Şekil 7.a.b'de görüldüğü gibi elyaf doğrultusunda 12 MPa ve 18 MPa teğetsel ön gerilme değerlerinden daha büyük bir delaminasyon alanı mevcuttur. Darbe merkezi çevresinde oluşan dairesel yüzey matris çatlaklarıyla beraber yüzeyde yarıma şeklinde büyük matris çatlakları oluşmuştur. Bu çatlaklar 12 MPa ve 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlandırılmış numuneden çok daha fazladır. 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlandırılmış numunenin statik iç basınç patlama testinden elde edilen sonuçlara göre numunedeki darbe hasarı maksimum mukavemet değerinde ciddi bir düşmeye sebep olmuştur. Bu gerilme değerinde deney



numunesinde oluşturulan hasar statik iç basınç patlama testindeki hasar gelişimine de önemli bir etki yapmıştır.



**Şekil 7.** 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerin a) dış ve b) iç görünüşü, c) radyal kesit görünüşü d) patlama esnasındaki akustik veri-gerilme değişimleri

İç basınç yüklemesinden kısa bir süre sonra yüzey matris çatlaklarıyla beraber yüzeyde yarılma şeklinde büyük matris çatlaklarından terleme olmaksızın damlama şeklinde sızıntı oluşmaya başladığı görüldü. Şekil 7.d’de akustik veri-gerilme değişim grafiğinden de anlaşıldığı üzere 175 MPa ile 248 MPa gerilme aralığında hasarlı numuneden matris çatlama sesleri gelmeye başlamıştır. Matris çatlama seslerinin başlaması; öncekilerde olduğu gibi kompozit numunede darbe hasarının haricinde başka kalıcı hasarların oluşmaya başladığını, darbe hasarından kaynaklanan delaminasyonların artmasını ve elyaf doğrultusunda mikro çatlakların oluştuğunu göstermektedir. Basıncın artmaya devam etmesiyle 329 MPa gerilme değerinde darbe bölgesinden tabaka hasarı ile birlikte damlama şeklinde sızıntı oluşmuştur. Bu sızıntı hasarı ilerleyen gerilme değerlerinde su jeti şeklinde sızıntıya dönüşmüştür. 349 MPa gerilme değerinde yoğun su jeti olmaksızın infilak ederek sonuç hasarı gerçekleşmiştir. Tabakalar arası çatlak miktarının, tabaka ayrılmalarının ve matris yüzey çatlaklarının fazla olması sebebiyle sonuç hasara ulaşma daha düşük gerilme değerinde gerçekleşmiştir. Şekil 4’de 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış boruların iç basınç patlama deneyi sonucunda elde edilen son hasar fotoğraflarına makro boyutta bakıldığında düşük teğetsel ön gerilme değerlerinde hasarlandırılan hibrit borularda hasar tahribatı daha küçük oluşurken yüksek teğetsel ön gerilme seviyelerinde tahribat daha büyük gerçekleşmiştir. Düşük teğetsel ön gerilme seviyelerinde darbe merkezi etrafında yoğunlaşan darbe ön hasarının daha fazla olması; sonuç hasarının yüksek teğetsel ön gerilmelerde oluşan sonuç hasarlara göre daha küçük olmasına sebep olmuştur.

#### 4. Sonuçlar

Düşük hızlı darbe testleri öncesinde, hibrit kompozit boru numunelerine uygulanan teğetsel ön gerilme miktarının azalması, yer değiştirme (çökme) miktarının artmasına neden olmuştur. Hibrit borularda; beyazlaşma başlangıcı ve yoğun beyazlaşma numune genelinde görülmemiştir. Tabakalı kompozit malzemede farklı elyaf yönlenmelerinden dolayı bu katmanların eğilme rijitlikleri farklılık gösterir. Delaminasyonun en önemli sebeplerinden birisi de tabakalar arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığıdır. Özellikle darbe ön hasarlı numunelere uygulanan gerilme değeri arttıkça darbe bölgesinde bulunan tabakalar arası matris çatlakları ilerlemiş ve numunede terleme veya damlama şeklinde ilk sızıntı gerçekleşerek ilk hasar aşaması ortaya çıkmıştır. İç basıncın artmaya devam

etmesi nedeniyle numunede meydana gelen sızıntı su jetine dönüşerek ikinci hasar aşamasının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Kısa bir süre sonra yoğun su jeti gerçekleşmiş ve sonrasında infilak ederek elyaf kopması şeklinde kompozit numunede son hasar meydana gelmiştir.

## References

- [1] Curtis, J., Hinton, M.J., Li, S., Reid, S.R., Soden, P.D., 2000, Damage, deformation and residual burst strength of filament-wound composite tubes subjected to impact or quasi-static indentation, *Composites Part B*, 31: 419-433.
- [2] Deniz, ME., Karakuzu, R., 2012, Seawater effect on impact behavior of glass–epoxy composite pipes, *Composites Part B*, 43: 1130–1138.
- [3] Gning, P.B., Tarfaoui, M., Collombet, F., Davies, P., 2004, Prediction of damage in composite cylinders after impact, *Journal of Composite Materials*, 39: 917-928.
- [4] Gning, P.B., Tarfaoui, M., Collombet, F., Riou, L., Davies, P., 2005, Damage development in thick composite tubes under impact loading and influence on implosion pressure: experimental observations. *Composites: Part B* 36: 306-318.
- [5] Uyaner, M., Kara, M., Gemi, L., 2010, Filaman sarım E-camı/epoksi kompozit boruların düşük hızlı darbe sonrası mukavemeti, *13<sup>th</sup> International Materials Symposium*,
- [6] Jones, M.L.C., Hull, D., 1979, Microscopy of failure mechanisms in filament wound pipe, *J. Material Science*, 14:165-174.
- [7] Misag-39-Tübitak projesi, 2001, Filaman sargı tekniği ile kompozit malzeme kullanılarak yüksek basınca dayanıklı optimum boru tasarımı, Barış Elektrik End. A.Ş.
- [8] Spencer, B., Hull, D., 1978, Effect of winding angle on failure of filament wound pipe, *Composites*, 9: 263-271.
- [9] Onder, Aziz, et al. "Burst failure load of composite pressure vessels." *Composite structures* 89.1 (2009): 159-166.
- [10] Richard, F., Perreux, D., 2000, A reliability method for optimization of  $\pm\theta$  fiber reinforced composite pipes, *Reliability Engineering and System Safety*, 68:53-59.
- [11] Perreux, D., Joseph, D., 1997, The effect of frequency on the fatigue performance of filament wound pipes under biaxial fatigue experimental results and damage model, *Composites Science and Technology*, 57:353-364.
- [12] Gemi, L., Kara, M., & Avci, A. (2016). Low velocity impact response of prestressed functionally graded hybrid pipes. *Composites Part B: Engineering*, 106, 154-163
- [13] Uyaner, M., Kara, M., & Şahin, A. (2014). Fatigue behavior of filament wound E-glass/epoxy composite tubes damaged by low velocity impact. *Composites Part B: Engineering*, 61, 358-364.
- [14] Kara, M., Uyaner, M., Avci, A., & Akdemir, A. (2014). Effect of non-penetrating impact damages of pre-stressed GRP tubes at low velocities on the burst strength. *Composites Part B: Engineering*, 60, 507-514.
- [15] Gemi, L., Tarakçıoğlu, N., Akdemir, A., & Şahin, Ö. S. (2009). Progressive fatigue failure behavior of glass/epoxy ( $\pm 75$ )<sub>2</sub> filament-wound pipes under pure internal pressure. *Materials & Design*, 30(10), 4293-4298.
- [16] Wang, S.S., Srinivasan, S., Cole, B., 1997, Long term leakage failure and life prediction fiber composite laminate tubing under combined internal pressure and axial loading, *Theory and Experiments 2.nd International Conference on Comp. Materials for Offshore Operations CMOO-2*, University of Houston, Houston TX