Karbon Nanotüp ile Modifiye Edilmiş Filaman Sarım Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı

Mustafa TAŞYÜREK*, Necmettin TARAKÇIOĞLU**
*Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Bölümü
**Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Bölümü Kat:1 No:102
(Geliş / Received : 30.01.2015 ; Kabul / Accepted : 01.04.2015)

ÖZ

Bu çalışmada, farklı oranlarda takviye edilmiş filaman sarım cam takviyeli plastik (CTP) boruların statik iç basınç altındaki hasar davranışları incelenmiştir. Takviye malzemesi olarak çok duvarlı karbon nanotüp (KNT), matriks malzemesi olarak da orta viskoziteli epoksi kullanılmıştır. Deneyde serbest uçlu iç basınç testi uygulanmıştır. Deney numuneleri 6 tabakalı ve ±55° sarım açılı olacak şekilde üretilmiştir. Takviye malzemesi % 0,5 ve % 1 olarak ilave edilmiştir. Ayrıca her numune çeşidine yüzey çatlağının cidar kalınlığına oranı (a/t) 0,25 ve 0,5 ölçülerinde yüzey çatlağı açılmıştır. Saf epoksi ile üretilmiş aynı fiziki özelliklere sahip CTP borular karşılaştırma için kullanılmıştır. Farklı takviye oranlarına göre ve farklı yüzey çentiği geometrisine göre patlama basınç değerleri tespit edilmiş ve değişimi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karbon nanotüp (KNT), epoksi, nanokompozit, iç basınç testi

Damage Behavior of Filament Winding Pipes Modified with Carbon Nanotubes Under Internal Pressure

ABSTRACT

In this study, damage behavior of filament winded glass-reinforced plastic (GRP) pipes that reinforcing material mixed in different proportions of under static internal pressure was examined. Multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) are used as reinforcing material and the medium-viscosity epoxy are used as matrix material. Free-ended internal pressure test was applied to the experiment. Test specimens were produced with six layered and ±55° winding angle. Reinforcement material was added as 0,5% and 1%. In addition, the wall thickness ratio of surface cracks on each kind of sample (w / t) was opened as 0.25 and 0.5 measure. Pure epoxy GRP pipes with same physical characteristics have been used as comparison sample. According to the geometry of the notch surface and different reinforcement ratios burst pressure values were determined and investigated.

Keywords: Carbon nanotube (CNT), epoxy, nanocomposite, internal pressure test

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Cam elyaf takviyeli plastik(CTP) borular sıvı ve gaz taşımada, yüksek basınç tanklarında savunma ve havacılık ile uzay sektöründe kullanılmaktadır. Filaman sarım borular geleneksel borulara göre sertlik, dayanıklılık, ısı yalıtımı ve korozyon direnci yönünden birçok avantaja sahiptir. CTP boruların son zamanlarda ilgi görmesiyle birlikte kullanım alanlarının artması akademik yönden de araştırmaların çoğalmasına neden olmuştur. Ellyin ve ark. Cam elyaf ve epoksili boruları çok yönlü olarak imal etmiş ve çift eksenli yükleme altında davranışlarını incelemişlerdir [1].

KNT'ler keşfedildiklerinden itibaren bilim dünyası için büyük ilerlemelere yol açmıştır. Birçok disiplinde kullanılan KNT'ler malzeme sektörü için de yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu ilgi daha sağlam, daha dayanıklı, daha kullanışlı ve daha uzun ömürlü malzemeler imal etme isteğiyle birlikte gün geçtikçe artmaktadır. Takviye malzemesi olarak kullanılır olması özellikle plastik alanı ile yakın ilişki kurmuş termal [2,3], elektriksel [4,5], optik [6,7] ve mekanik [8,9,10] gibi birçok dalda araştırmalara konu olmuştur.

Li ve ekibi Sarmal KNT'li epoksi kökenli kompozit malzemelerin çekme gerilmesi ile nanomekanik özelliklerini incelemiş, uygun nano içerik yüzdesini tespit etmişlerdir [11]. Montezari ve ekibi asitle işlenmiş ve işlenmemiş olan epoksi-karbon nanotüp kompozitinin mekanik özelliklerini Halpin-Tsai modeli ile bağdaştırarak incelemişler ve ilave edilen yüzdeye göre uyumluluğunu tespit etmişlerdir [12]. Zhang ve ekibi [13] farklı şekillere sahip çok duvarlı karbon nanotüplerin mekanik özelliklerini incelemiş, sıcaklıkla ilişkilendirmiş, sıcaklığın young modülünü olumsuz etkilediğinin yanı sıra ve young modülünün en dış nanotüp duvarı çapına bağlı olduğunu vurgulamıştır. Tarakçıoğlu ve ark. [14,15] ±55° filaman sarım açılı elyaf takviyeli plastik boruların yüzey çatlağı etkisi altında mukavemetini ve yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Arıkan [16,17] boru eksenine çeşitli açılarda ve belirli çatlak derinlik oranında açılan yüzey çatlaklarının filaman sarım boruların iç basınç altındaki patlama mukavemetine etkisini incelemiştir.

Yüzey çatlağı bir plastik boru üzerinde değişik şekillerde ve ebatlarda imalat, taşıma, yerleştirme veya

* *Sorumlu Yazar (Corresponding Author)*
e-posta:mtasyurek@selcuk.edu.tr
Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2015.18.4 211-217

kullanım sırasında meydana gelebilir. Bu sebeple çözülmesi gereken bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada, tüm bu bahsedilen konulara değinilerek ±55° sarım açılı 6 tabakalı KNT takviyeli CTP borular kullanılmıştır. % 0,5 ve % 1 oranında takviyeli ve takviyesiz borularda a/t=0,25 ve a/t=0,50 eliptik yüzey çatlağı açılmıştır. Bu numuneler hasar görene kadar statik iç basınç altında teste tabi tutulmuşlardır. Farklı 9 numunenin patlama basıncı değerleri tespit edilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

2.1. Materyal (Material)

2.1.1. Epoksi matriks ve cam elyaf (Epoxy matrix and glass fiber)

Filaman sarım CTP boruların imalinde elyaf olarak 17 mikron çapında Vetrotex 1200 teks, E camı ve matriks malzemesi olarak orta viskoziteli Epikote 828 XA Bisfenol A ve sertleştiricisi kullanılmıştır. Üretici firmanın verilerine dayanarak yaklaşık olarak ağırlıkça % 44 oranında sertleştirici kullanılmıştır. Elyaf ve epoksinin özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Elyaf ve matriks özellikleri

Vetrotex 1200 teks E-camı	**E (GPa)**	**ν**	**σ_{cekme} (MPa)**	**ρ (gr/cm^3)**	**Viskozite (m.Pa.s)**
	73	0,25	2400	2,6	-
Ciba Geigy CY 225 epoksi reçine	3.4	0.38	50-60	1.2	8000-12000

2.1.2. Karbon Nanotüpler (Carbon Nanotubes)

Takviye malzemesi olarak Cheap tubes Inc. firması tarafından imal edilen çok duvarlı karbon nanotüp kullanılmıştır. Çok duvarlı karbon nano tüplerin özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2 Karbon nanotübün fiziki özellikleri

Özellikler	Değer
Saflık	%95
Uzunluk	10-30 mikron
İç çapı	2-5 nanometre
Dış çapı	< 8 nanometre
Özgül Yüzey Alanı	500 m^2/g
Elektrik İletkenliği	> 100 S/cm
Yoğunluk	2.1 g/cm^3

2.2. Numunelerin Hazırlanması (Preparation of Samples)

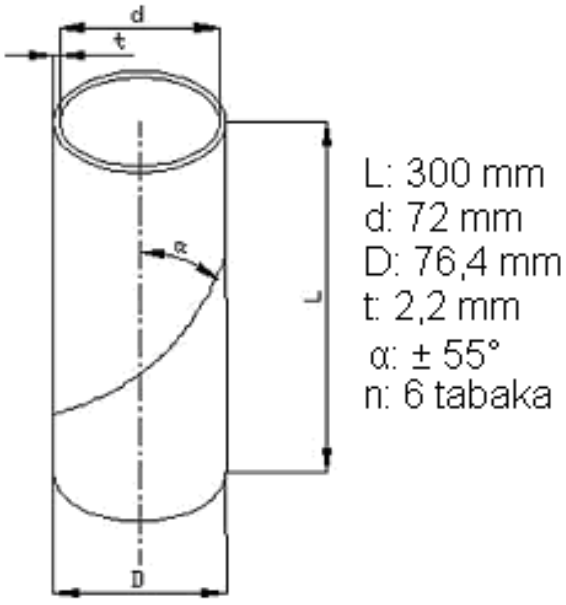
Filaman sarım CTP borular İzoreel Kompozit İzole Malzemeler San. Ve Tic. Ltd. Şti. tarafından sipariş üzerine temin edilmiştir. KNT takviyeli kompozit boruların üretimi ise yine aynı firma bünyesinde bizzat gerçekleştirilmiştir. Filaman sarım CTP boruların imalinde elyaf olarak Vetrotex 1200 teks, E camı ve matriks malzemesi olarak orta viskoziteli Epikote 828 XA Bisfenol A ve sertleştiricisi kullanılmıştır.

Deney numunelerinin üretiminde öncelikli olarak epoksi matriks yaklaşık olarak 60°C'ye ısıtılarak viskozitesinin düşürülmesi amaçlanmıştır. Zira yüksek viskozite karbon nanotüp gibi takviye malzemelerinin matriks içerisinde homojen olarak dağılmasını engelleyici bir özelliktir.

KNT'ler Bandelin HD 2200 model ultrasonik homojenizatörde epoksi matriks içerisinde karıştırılmıştır. Karıştırma süresi 15 dakika olarak seçilmiştir. Sertleştirici ilave edilmeden önce sıcaklıkla beraber oluşan hızlı reaksiyon sonucu gözenekli bir yapının oluşumunu önlemek amacıyla numune oda sıcaklığında bir süre soğumaya bırakılmıştır. Sertleştirici düşük devirde hava kabarcığı oluşturmayacak şekilde 5 dakika boyunca karıştırılmıştır.

Reçine sıcaklığı 65 °C olacak şekilde ayarlanmıştır. Elyaf bant genişliği 6 elyaf rulosundan alınan elyafların yan yana getirilmesiyle 12 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Sarım işlemi sonucunda 1 m boyunda, 72 mm iç çapa ve 55 ° sarım açısına sahip, ortalama 2,2 mm cidar kalınlığındaki numuneler elde edilmiştir.

İşlemler sonucunda elde edilen numuneler kürleme işlemine geçirilmiştir. Kürleme işleminde numuneler fırın içerisinde reçinenin akmaması için sürekli olarak döndürülmek suretiyle 3 saat 135 °C'de ardından 3 saat 150 °C'de hareketli olarak tutulmuştur. Bütün halde kürleme fırınından çıkarılan numune, boyu 300 mm olacak şekilde kesilerek son halini almıştır. Üretilen numunelerin geometrisi şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Numune Geometrisi

2.3. Yakma Testi (Burn-off Test)

Yakma testi ASTM D-2584'e göre gerçekleştirilmiştir. Reçine bir yakma fırını içerisinde 600 °C'de elyaflardan tamamen uzaklaştırılana kadar yakıldı. Malzemenin dayanıklılığı hakkında bilgi sahibi olmamıza yardım eden elyaf hacim oranı, ağırlık kaybı dikkate alınarak formül 1 yardımıyla tespit edilmiştir.

$$Vf=(Wf/\rho f)/(Wc/\rho c) \quad (1)$$

Numuneler yakma işleminin öncesinde ve sonrasında 0,0001 g ölçme hassasiyetli bir elektronik hassas terazide ölçülmüştür.

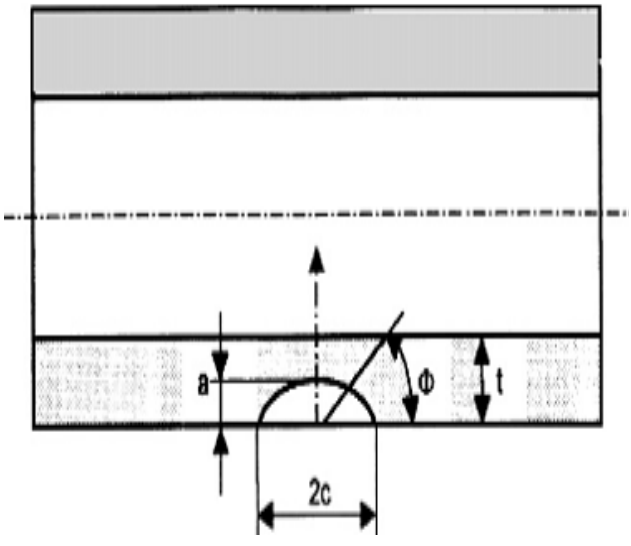
2.4. Boşluk İçeriği (Void Content)

Takviyeli plastik boşluk içeriği için test yöntemi ASTM D 2734, boşluk içeriğini belirlemek için kullanılan en yaygın test yöntemidir. Bu test metodu takviye edilmiş kompozitlerin ya da plastiklerin boşluk içeriğini belirlemeyi kapsamaktadır. İyi bir kompozit % 1'den daha az boşluk içeriği vermelidir.

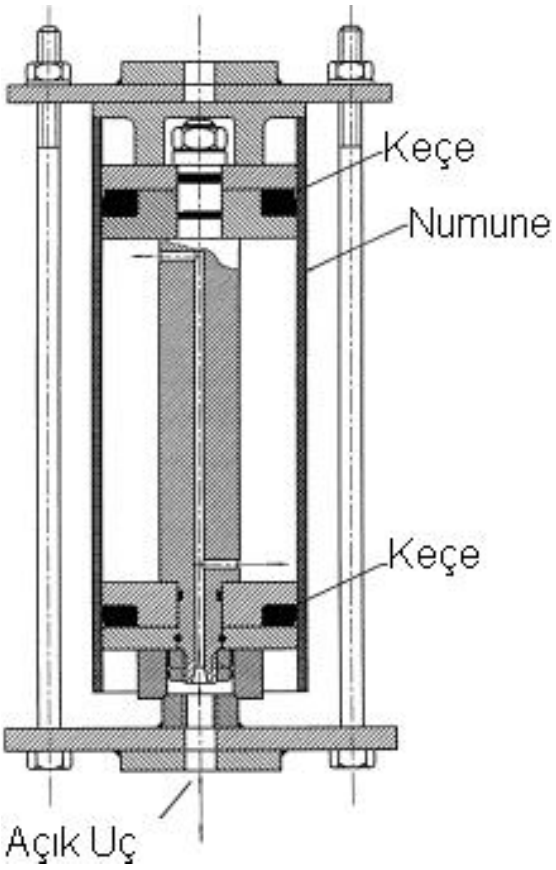
Numunelerdeki muhtemel boşluklar sünekliği azaltıcı yönde etkiye sahiptir. Bu durum çekme uzamasının azalmasından anlaşılabilir [18]. Fakat bu mikro boşluklar KNT takviyesiyle doldurulduğu için ara yüzey oluşturulması sebebiyle azaltılabilir[19]. Bu sayede süneklik arttırılabilir. Ayrıca numunede yer alan boşlukların KNT'ler tarafından doldurulabildiği, bu sayede de kırılma tokluğunu arttırıcı yönde etkide bulunduğu söylenebilir. Bu ifade Yu tarafından da benzer şekilde bildirilmiştir [20].

2.5. Açık Uçlu İç Basınç Testi (Open-ended internal pressure test)

72 mm iç çapa ve ortalama 2,2 mm cidar kalınlığına sahip olan iç basınç test numuneleri 300 mm boyunda kesilerek hazırlanmıştır. Yüzey çatlakları bir freze tezgâhı kullanılarak çatlak derinliğinin cidar kalınlığına oranı şekil 2'de gösterildiği gibi a/t= 0,25 ve 0,50 olacak şekilde açılmıştır. Numunelerin aparat içerisine yerleştirme durumu şekil 3'te, test aparatı ise şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 2 Yüzey çatlağı geometrisi



Şekil 3 Açık uçlu iç basınç test aparatı ve numune

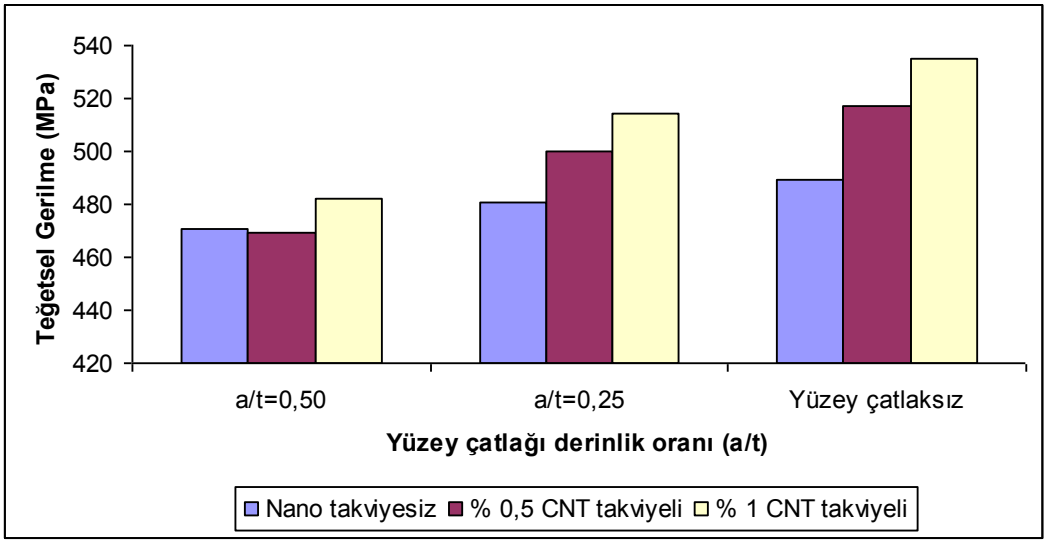


Şekil. 4 Test aparatı

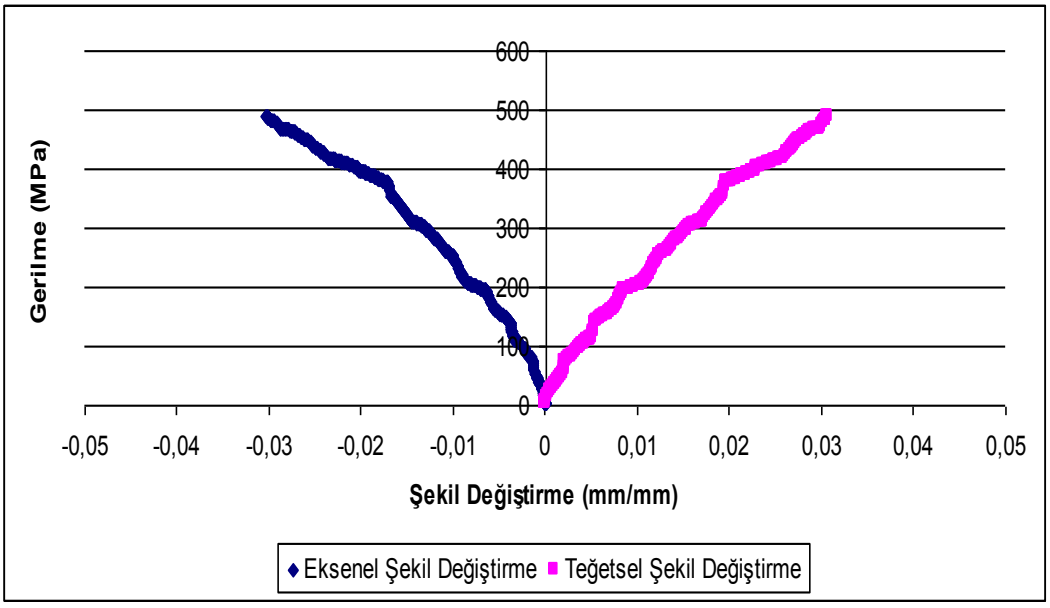
3. DENEY SONUÇLARI (TEST RESULTS)

Öncelikli olarak yakma testi yapılmıştır. Numunelerin elyaf hacim oranları nano takviyesiz numune, % 0,5 CNT ilaveli numune ve % 1 CNT ilaveli numune için sırasıyla 0,52, 0,53 ve 0,52 olarak tespit edilmiştir.

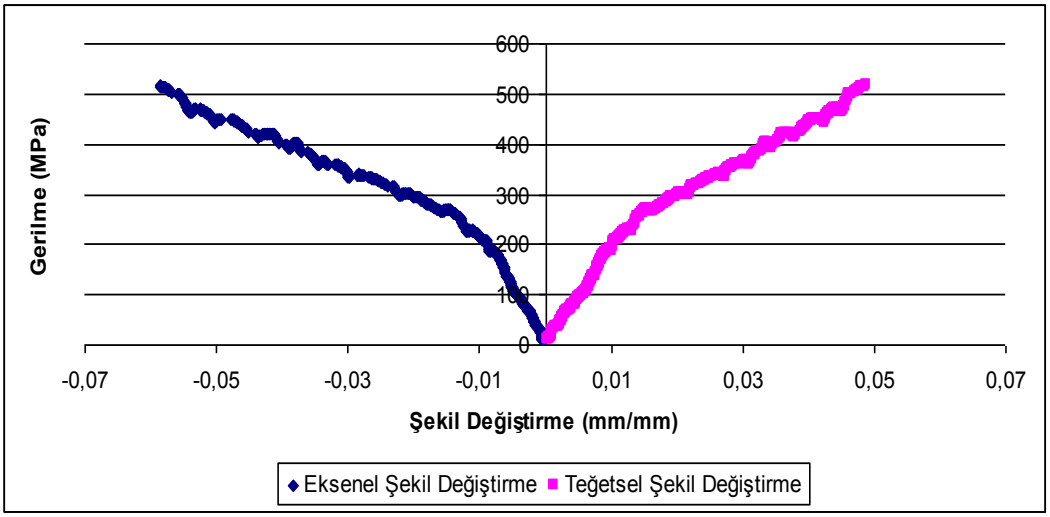
Daha sonra ASTM D2734 numaralı takviyeli plastiklerin boşluk içeriği için standart test metoduna göre teorik yoğunluk hesaplanmış, test prosedürü metot C'ye göre ağırlık ve hacim ölçümlerinden faydalanılarak ölçülen yoğunluk hesaplanmış ve neticesinde numunelerde % 0,24 oranında boşluk miktarı belirlenmiştir.



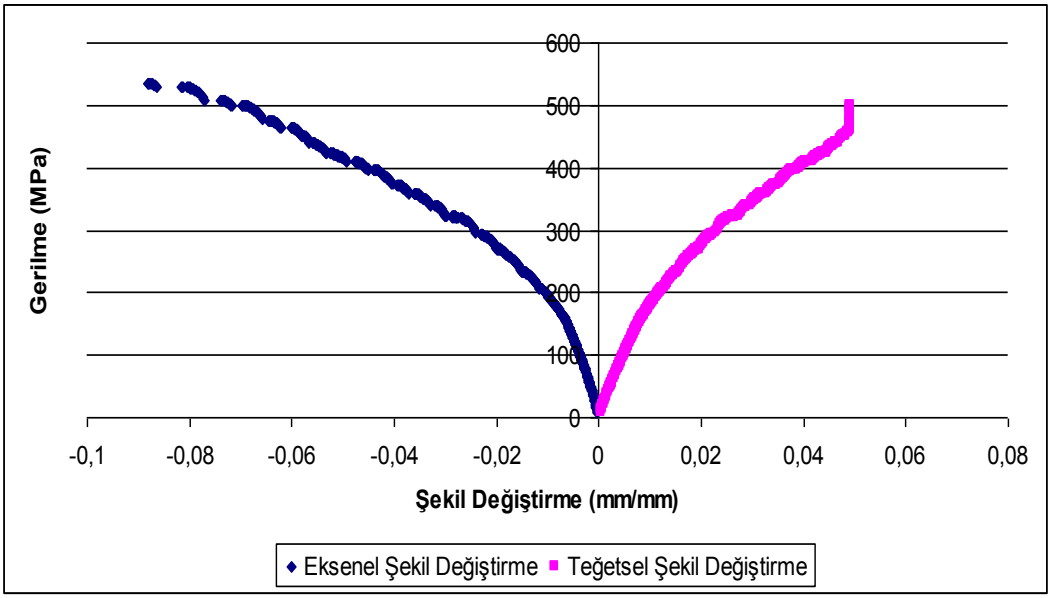
Şekil 5 Numunelerin patlama basıncı değerleri



Şekil 6 Nano takviyesiz kompozit numunelerin teğetsel gerilme–gerinme grafiği



Şekil 7 % 0.5 CNT'li nanokompozit numunelerin teğetsel gerilme–gerinme grafiği



Şekil 8 % 1 CNT'li nanokompozit numunelerin teğetsel gerilme–gerinme grafiği

Yapılan statik iç basınç deneyleri neticesinde farklı oranlarda takviye malzemesi ilave edilen numuneler ve saf numuneler sonuç hasarına ulaşana kadar test edilmişlerdir. Bu numuneler hem yüzey çatlağı açılmış hem de açılmamış olan parçaları kapsamaktadır. KNT yüzdesine bağlı olarak numunelerin patlama basıncı değişimi Şekil 5'te verilmiştir. Aynı şekilde çatlak derinliği değişimine bağlı olarak patlama basıncı değerleri de görülmektedir.

Çatlak derinliğinin cidar kalınlığına oranı arttıkça patlama basıncında düşüş gözlenmiştir. Yani boru mukavemetinde azalma meydana gelmiştir. a/t= 0,50 değerinin a/t= 0,25 değerine göre daha düşük sonuç vermesinin başka bir nedeni de derinliğin yanı sıra çentik uzunluğunun da artmasıdır. Yüzey çatlağı açılmamış numunelerde en yüksek değer olarak % 1 KNT'li boruda 535 MPa değer, en düşük değer olarak da 520 MPa ile diğer numunelerde gözlenmiştir. Tüm numuneler kendi içerisinde çatlak miktarı arttıkça boru mukavemeti yönünden olumsuz etkilenmiştir. a/t= 0,25 olan çentikli borularda en yüksek değer % 1 KNT'li boruda 519 MPa olarak en düşük değer ise nano takviyesiz numunede 494 MPa ile gözlenmiştir. a/t= 0,50 olan çatlaklı borularda en yüksek değer % 1 KNT'li boruda 483 MPa olarak en düşük değer ise % 0,5 KNT'li boruda 437 MPa olarak gözlenmiştir.

Statik iç basınç deneyleri sonucunda patlama basıncı değerinin büyük bir kısmının elastik bölgede olduğu daha sonra plastik şekil değiştirmeye uğradığı ve nihayetinde infilak ederek sonuç hasarına uğradığı tespit edilmiştir. İç basınç arttırıldıkça boru çapında artış ve boru boyunda kısalma meydana gelmiştir. Boru boyutundaki bu fiziki değişim; boruların 6 tabakalı olarak üretildiği için tabakalar arası kayma gerilmesi oluşmasına da neden olmuştur.

Yapılan serbest uçlu iç basınç testi sırasında hasar belirtisi olarak ilk önce elyaf – matriks ayrılması meydana gelmiştir. Elyaf doğrultusunda gerçekleşen beyazlaşma ile fark edilebilen elyaf – matriks ayrılması ilk olarak genellikle borunun orta kısımlarında oluşmuştur. Elyaf boyunca beyazlaşmanın ardından mikro çatlaklar oluşmuş, artan basınçla beraber ses ile de belli olmaya başlamıştır. Daha sonra nano takviyesiz numunelerde boru eksenine paralel olarak birkaç cm boyunda matriks çatlakları meydana gelmiştir. Bu matriks çatlakları nanokompozit numuneler şeffaf olmadığı için bu borularda deney esnasında fark edilememiştir. Beyaz çizgilerin sayıca artmaları ve kesişmeleri sonucunda tabaka ayrılmaları gözlemlenmiştir. Patlama öncesinde, çatlak ilerlemesi sonucunda iç yüzey ile dış yüzey arasında bir sıvı geçişi deliği oluştuğundan dolayı patlamaya sebebiyet verilmiştir.

Şekil 9'da görülen patlama sonrası görüntüleri patlama şiddeti hakkında bilgi vermektedir. Bazı numuneler üzerine açılan yüzey çatlağının patlama basıncı üzerindeki etkisi patlama esnasında numune üzerinde oluşan yarılmalardan rahatlıkla anlaşılmaktadır. Yüksek basınç değerlerinde patlamaya maruz kalan boruların üzerinde oluşan hasar bölgesi alanı diğer borulara göre daha fazla oluşmuştur. Ayrıca numuneler üzerinde patlamanın şiddetli olması bakımından tabakaların yer yer ayrıldığı gözlenmiştir. 110° olarak meydana gelen bu ayrılmalar da yüzey çatlağı açılmamış olan numunelerde çatlaklı numunelere kıyasla daha belirgindir. Ayrılmanın derecesi bize elyaf sarım açısı doğrultusunda oluştuğunun bir ispatıdır.



Şekil 9 Yüzey çatlaksız, 0,25 yüzey çatlaklı ve 0,50 yüzey çatlaklı %1 CNT takviye edilmiş numuneler



Şekil10 Çentiksiz, 0,25 çentikli ve 0,50 çentikli %1 CNT takviye edilmiş numuneler patlama sonrası görüntüleri

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, karbon nanotüplerin filaman sarım CTP boruların iç basınç etkisi altındaki patlama mukavemetleri ve hasarı üzerine etkisi araştırılmıştır. a/t=0,25 ve a/t=0,50 oranlarında eliptik yüzey çatlağı açılmış ve açılmamış olan numunelerin her biri % 0,5 ve % 1 KNT takviyeli ve nano takviyesiz olmak üzere üçer çeşitten toplam 9 farklı numune üretilmiştir.

Yapılan serbest uçlu iç basınç testleri sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- a/t=0,50 değeri her numune çeşidinin kendi içerisinde beklenildiği gibi en düşük değerleri vermiştir. Bunu a/t=0,25 değeri izlemiş, en yüksek değerler ise yüzey çatlaksız numunelerden alınmıştır.
- KNT takviyesi her durumda olmasa bile genellikle patlama basıncını olumlu bir şekilde etkilemiştir. Bu sebeple iç basınç artışı sırasında meydana gelen hasar aşamaları KNT takviyesiyle daha yüksek basınç değerlerinde gerçekleşmiştir.
- Yapılan serbest uçlu statik iç basınç testlerinde hasar aşaması olarak ilk önce beyazlaşmalar gözlenmiştir. Bu beyazlaşmalar sarım açısı doğrultusunda meydana gelmiştir. Daha sonra tabakalar arası ayrılma neticesinde büyük alanlı beyazlaşmalar gözlenmiştir. Son adımda ise; elyaf kopmaları başlamıştır. Bu kopmalar artan basınçla beraber sesle kendini oldukça belli etmiştir. Tüm borular iç basıncın artmasıyla birlikte birçok elyaf demetinin aynı anda kopmasıyla büyük bir gürültüyle infilak etmek suretiyle hasarlarını sonlandırmışlardır.
- Patlama sonrası hasar incelendiğinde kopmaların sarım açısına paralel olarak 110°'lik bir açı ile gerçekleştiği görülmektedir. Bu kopmalar yer yer tabaka ayrılmasına da neden olmuştur. Bu tabaka ayrılması yüzey çatlaksız numunelerde daha belirgin şekilde görülmektedir.
- KNT'lerin özgül yüzey alanlarının oldukça geniş olması sebebiyle çok düşük miktarlarda da olsa takviye edilmesi sonucu epoksi matriksin şeffaf görüntüsü siyahi bir hal almıştır. Bu boyar özellik hasar aşamalarının tam olarak gözlemlenmesini olumsuz olarak etkilemiştir.

5. SEMBOLLER (SYMBOLS)

KNT	:	Karbon nanotüp
MWCNT	:	Multiwalled carbon nanotube
a/t	:	Yüzey çatlağı derinlik oranı
CTP	:	Cam takviyeli plastik
E	:	Elastikiyet modülü
ν	:	Poisson oranı
σ	:	Çekme mukavemeti
ρ	:	Yoğunluk
Wf	:	Elyaf ağırlığı (yakma sonundaki kalan ağırlık)
Wc	:	Kompozit numunenin ağırlığı (tartılan ilk ağırlık)
ρf	:	Elyaf yoğunluğu
ρc	:	Kompozit yoğunluğu

6. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Deneysel veriler Mustafa TAŞYÜREK'in doktora çalışmasından alınmıştır. Bu makale Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü (BAP) tarafından 10101020 nolu tez projesi kapsamında desteklenmiştir.

7. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1- Ellyin, F., Carroll, M., Kujawski D., Chiud, A., S., "The behavior of multidirectional filament wound fibreglass/epoxy tubulars under biaxial loading", ***Composites Part A*** 28, 781-790, (1997)

2- Zhou, Y., Pervin, F., Lewis, L., Jeelani, S., "Experimental study on the thermal and mechanical properties of multi-walled carbonnanotube-reinforced epoxy", ***Materials Science and Engineering A*** **452–453**, 657–664, (2007)

3- Xiong, J., Zheng, Z., Qin, X., Li, M., Li, H., Wang, X., "The thermal and mechanical properties of a

polyurethane/multi-walled carbon nanotube composite", ***Carbon***, 44, 2701–2707, (2006)

4- Spitalsky, Z., Tasis, D., Papagelis, K., Galiotis, C., "Carbon nanotube–polymer composites: Chemistry, processing, mechanical and electrical properties", ***Progress in Polymer Science***, 35, 357–401, (2010)

5- Liu, Y., Gao, L., "A study of the electrical properties of carbon nanotube-NiFe2O4 composites: Effect of the surface treatment of the carbon nanotubes", ***Carbon***, 43, 47–52, (2005)

6- Stoylov, S., P., Stoilova-McPhie, S., "Electro-optic properties of organic nanotubes" ***Advances in Colloid and Interface Science***, 166, 24–35, (2011)

7- Lee, S., W., Grebel, H., Kornblit, A., Lopez, D., "Electrical and optical properties of carbon nanotube/polypyrrole addressable intra-connects", ***Synthetic Metals***, 159, 462–466, (2009)

8- Gojny, F., H., Wichmann, M., H.G., Fiedler, B., Schulte, K., "Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study", ***Composites Science and Technology***, 65, 2300–2313, (2005)

9- Nardelli, M., B., Fattebert, J., L., Orlikowski, D., Roland, C., Zhao, Q., Bernholc, J. , "Mechanical properties, defects and electronic behavior of carbon nanotubes", ***Carbon,*** 38, 1703–1711, (2000)

10- Bokobza, L., "Mechanical, electrical and spectroscopic investigations of carbonnanotube-reinforced elastomers", ***Vibrational Spectroscopy***, 51, 52–59, (2009)

11- Li, X., F., Lau, K., T., Yin, Y., S., "Mechanical properties of epoxy-based composites using coiled carbon nanotubes", ***Composites Science and Technology***, 68, 2876–2881, (2008)

12- Montazeri, A., Javadpour, J., Khavandi, A., Tcharkhtchi, A., Mohajeri, A., Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites, ***Materials and Design***, 31, 4202–4208, (2010)

13- Zhang, Y., C., Chen, X., Wang, X., "Effects of temperature on mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes", ***Composites Science and Technology***, 68, 572–581, (2008)

14- Tarakçioğlu, N., Gemi, L., Yapici, A., "Fatigue failure behavior of glass/epoxy ±55 filament wound pipes under internal pressure", ***Composites Science and Technology***, 65, 703–708, (2005)

15- Tarakçioglu, N., Akdemir, A., Avci, A., "Strength of filament wound GRP pipes with surface crack", ***Composites: Part B***, 32, 131-138, (2001)

16- Arikan, H., "Failure analysis of $(\pm 55°)_3$ filament wound composite pipes with an inclined surface crack under static internal pressure", ***Composite Structures***, 92 182–187, (2010)

17- Arıkan, H., "Filaman Sarım Kompozit Boruların Mix Moda Göre Statik İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı", ***8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı***, İstanbul/TÜRKİYE, S: 527-533, 7 – 9 Kasım 2007

18- Loos, M., R., Yang, J., Feke, D., L., Manas-Zloczower, I., Unal, S., Younes, U., Enhancement of fatigue life of polyurethane composites containing carbon nanotubes, ***Compozites: Part B*** 44, 740-744, (2013)

19- Tang, L., C., Zhang, H., Han, J., H., Wu, X., P., Zhang, Z., Fracture mechanism of epoxy filled with ozone functionalized multi-wall carbon nanotubes, ***Composites Science and Technology*** 72, 7-13, (2011)

20- Yu, N., Zhang, Z., H., He, S., Y., Fracture thoughness and fatigue life of MWCNT/epoxy composites, ***Materials Science and Engineering A*** 494, 380-384, (2008).