

**T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KOMPOZİT YAMA İLE TAMİR EDİLMİŞ ÇATLAKLI
FİLAMAN SARIM BORULARDA KIRILMA ANALİZİ**

**BURAK ÖNDER OLGUN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONYA 2008**

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOMPOZİT YAMA İLE TAMİR EDİLMİŞ, ÇATLAKLI FİLAMAN
SARIM BORULARDA KIRILMA ANALİZİ
BURAK ÖNDER OLGUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONYA 2008

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KOMPOZİT YAMA İLE TAMİR EDİLMİŞ, ÇATLAKLI FİLAMAN SARIM BORULARDA KIRILMA ANALİZİ

Burak Önder OLGUN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2008

Jüri: Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

Yrd. Doç. Dr. Behçet DAĞHAN

Bu çalışmada, yüksek basınca ve korozif ortamlara dayanıklı; sıvılaştırılmış petrol gazı, sıkıştırılmış doğalgaz, su ve kimyasal madde tankları yapımında ayrıca askeri alanda roketatar namlusu yapımında kullanılan, filaman sarım cam takviyeli plastik boruların, iç basınç etkisi altında yamalı(içten, dıştan, içten-dıştan ve sargılı) ve yamasız olarak statik iç basınç testleri yapılmıştır. Deneyleerde; serbest uçlu iç basınç testi altı tabakalı, $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip, E-cam/epoksi CTP borular kullanılmıştır. Üzerine eksenel yönde 15mm uzunluğunda kalınlık boyunca çatlak açılan numuneler farklı yamalar ile tamir edilmiştir. Hasarın oluşmaya başladığı basınç değerleri kaydedilmiştir.

Borular kabuk yama, dokuma kumaş ve prepreg yama türleri ile tamir edilmiş ve patlayıncaya kadar statik iç basınca maruz bırakılmıştır. Artan basınçla, hasarlı boru ve yamadaki hasar davranışı gözlenmiştir. Yama türlerine bağlı patlama basınçları grafik olarak verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kompozit yama, CTP boru, iç basınç, yama, tamir, takviye, filaman sarım.

ABSTRACT

Ms Thesis

FRACTURE ANALYSIS OF CRACKED FLAMENT WOUNDED PIPES REPAIRED WITH COMPOSITE PATCHES

Burak Önder OLGUN

Selçuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2008

Jury: Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

Yrd. Doç. Dr. Behçet DAĞHAN

In this study behavior of the filament glass fiber plastic pipes, which are resistance to high pressure and corrosion environmental also they are used to make petrol gas, pressed GNC, water and chemical material contain tanks also they are used to make weapons are tested statical inside pressures under pressure when they are patched inside, outside, both inside and outside and without patch. In the test free line inside pressure under layer $\pm 55^\circ$ patch angle E-glass/epoksi CTP pipes are used.

Over the specimans faces at the measure 15 mm long crack are opened in an axial way then these cracks are patched and they are tested to check the values of pressure at the time of occurring damages.

At the pipes different style of patches are used ,these are shell patch style, text patch and prepreg patch style .After patch these specimens are forced until they get explode with statical inside pressure .With the increase of the inside pressure ,damaged pipes and the damage at the patch are watched by this way the values of pressures that explosion occur due to the patch style are shown in a graphical way .

Key words: Composite patch ,CTP pipes ,inside pressure ,patch ,repair ,filament patch

TEŐEKKÖR

Bu alıőmanın tamamlanmasında her türlü desteğini esirgemeyen baőta tez danışman hocam Prof. Dr. Ahmet AVCI' ya, Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR' e Cihanbeyli Meslek Yüksekokulu Öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Ahmet SAMANCI' ya, Cihanbeyli Meslek Yüksekokulu Öğretim üyesi Berrin GÜNAYDIN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca malzeme temini hususundaki yardımlarından dolayı İZOREEL Kompozit İzole Malzemeler San. ve Tic. Ltd. Şti. yetkililerine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
1.GİRİŞ.....	1
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
3.KOMPOZİT MALZEMELER.....	8
3.1. GİRİŞ.....	8
3.2. ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİTLER.....	9
3.2.1. Filaman Sarım Tekniği.....	10
3.2.2. Takviye Malzemeleri.....	12
3.2.3. Matriks Malzemeleri.....	13
3.2.4. Sarım Prosesi.....	14
3.2.5. Helisel Sarım Makinaları.....	14
3.2.6. Mandreller.....	17
3.2.7. Sarım Kontrol Parametreleri.....	17
4. YAMA VE YAPIŞTIRMA TEKNOLOJİSİ.....	19
4.1. BAĞIN STATİK MUKAVEMETİ.....	19
4.1.1. Yapıştırıcı Katmanın Yüklenmesi.....	19
4.1.2. Kayma Gerilmeleri Dağılımı.....	20
4.1.3. Yapıştırıcı Katmanda Kayma Mukavemetini Etkileyen	

Faktörler.....	20
4.2. YAMA VE YAPIŞTIRMA TEORİSİ.....	21
4.2.1. Yamanın Ana Malzemeyi Örtme Boyu.....	21
4.2.2. Kompozit Boru ve Kompozit Yamanın Yüzeyinin Hazırlanması.....	23
4.2.3. Kompozit Boru ve Kompozit Yamada Yer Değiştirme Uyumluluğu.....	24
4.2.4. Yapıştırıcı Tabaka Kalınlığı.....	25
5. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	26
5.1. GİRİŞ.....	26
5.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI.....	26
5.2.1. CTP Boru Numunelerinin Hazırlanması.....	26
5.2.2. Hasarlı Boruların Tamir İşlemlerinin Yapılması.....	30
5.3. SERBEST UÇLU İÇ BASINÇ TEST APARATININ HAZIRLANMASI.....	I.....31
5.4. DENEY SETİNİN HAZIRLANMASI VE DENEY YAPILMASI.....	32
5.5. YAMA NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI.....	33
5.5.1. Kabuk Yama Numunelerinin Hazırlanması.....	33
5.5.2. Sargı Yama Numunelerinin Hazırlanması.....	35
5.5.2.1. Prepreg Yama Numunelerinin Hazırlanması.....	35
5.5.2.2. Cam Kumaş Malzemedan Yapılan Yama.....	37
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	40
6.1. HASARSIZ CTP BORUNUN İÇ BASINÇ TEST SONUÇLARI.....	40
6.2. KOMPOZİT KABUK YAMA İLE TAMİR EDİLMİŞ CTP BORUNUN İÇ BASINÇ TEST SONUÇLARI.....	42
6.2.1. İçten Kabuk Yama Yapılmış CTP Boruların İç Basınç Test	

Sonuçları.....	42
6.2.2. Dıştan Kabuk Yama Yapılmış CTP Boruların İç Basınç Test	
Sonuçları.....	44
6.3.3. İçten-Dıştan Kabuk Yama Yapılmış CTP Boruların İç Basınç Test	
Sonuçları.....	45
6.3.4. Kabuk Yama Test Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	46
6.3. SARGI YAMA YAPILMIŞ CTP BORUNUN İÇ BASINÇ TEST	
SONUÇLARI.....	47
6.3.1. Prepreg ile Sargı Yama Yapılmış, CTP Boruların İç Basınç Test	
Sonuçları.....	47
6.3.2. Cam Elyaf Kumaş İle Yama Yapılmış CTP Boruların İç Basınç	
Test Sonuçları.....	53
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
8. KAYNAKLAR.....	61

1. GİRİŞ

İstenen amaç için tek başlarına uygun olmayan farklı iki veya daha fazla malzemeyi istenen özellikleri sağlayacak şekilde belirli şartlar ve oranlarda fiziksel olarak, makro yapıda bir araya getirilerek elde edilen malzemeye kompozit malzeme denir.

Kompozit malzemeler günümüzde her alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle filaman sarım tekniği olarak bilinen; yüksek mukavemet ve elastisite modülüne sahip takviye malzemesi elyafların, bağlayıcı bir reçine ile ıslatılarak, bir silindir üzerine farklı açılarda ve çok katlı, ileri-geri, belli bir kalınlığa ulaşınca kadar sarılması yöntemiyle üretilen kompozit borular, depolama tankları ve basınçlı kaplar, endüstride fazlaca kullanılmaktadır. Bu yöntem ile üretilen kompozit malzemelerin başlıca kullanım alanı, endüstriyel alanda; proses tankları, depolama tankları, proses boruları, basınçlı borular, basınçlı tanklar, yer altı tankları, gaz yıkama kuleleri, bacalar, otomobil ve kamyon şaftları, askeri alanda ve havacılıkta; roketatar gövdesi, roket gövdesi, roket muhafazaları, uçak ve planör gövdeleri, uçak kanatları, helikopter pervaneleri, uçak havalandırma kanalları, tarım alanında; sulama boruları, tahıl siloları, salamura tankları, spor alanında hokey raketleri, golf sopaları gibi yüksek basınca ve korozif ortamlara dayanıklı, bununla birlikte yüksek mukavemetinin yanı sıra hafif olduğu için metalik malzemelerden daha fazla tercih edilmektedir.

Kullanılmaya devam eden borularda hasar oluşma ihtimali her zaman mevcuttur. Bu hasarlar; çentik, delik veya kanal şeklinde oluşabilmektedir. Hasar çoğu zaman ilerler ve kendini geliştirir. Bu nedenle tamir edilemeyen hasarlar oluşmadan, hasarlı bölge tamir edilmelidir.

Günümüzde çok miktarda kullanılan cam elyafların tamir edilerek tekrar kullanılabilmesi bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmıştır. Ekonomik olarak ve kullanılabilirliğin devamını sağlama, uygulama kolaylığı itibariyle yama ile tamirinin yapılması bir avantaj olarak görülmektedir. Yama, kompozite yapılan bir takviyedir. Yama; mekanik bir destek ya da yapıştırıcı madde ile hasara uğramış veya zayıflamış yapıya yama malzemesinin iliştilmesi olayıdır.

Bu çalışmada; altı tabakalı, $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip, E-cam elyaf takviyeli cam takviyeli plastik (CTP) borular kullanılmıştır. Üzerine aksenal doğrultuda açılmış olan 15mm genişliğinde kalınlık boyunca çatlak bulunan boruların kompozit yama ile tamiri incelenmiştir. Bu amaçla 50X50mm, 75X75 mm, 100X100 mm boyutlarında, iç ve dış çapında üretilmiş boru aynı borulardan kesilerek elde edilmiştir. Yama uzunluğu hesaplanmış ve yama uzunluğunun ancak sarmal olarak yapılacağı sonucuna ulaşılmıştır. Prepreg ve dokuma kumaş kullanılarak yama yapılmıştır. Yama kat sayısı değiştirilerek mukavemete etkisi ve hasar davranışı grafik ve fotoğraflarla verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yapı ve makine elemanlarında muhtelif şekillerde hasarlar oluşabilir. Kompozit malzemelerin hasar davranışları mühendislik açısından çözülmesi gereken bir problemdir. Kompozit malzemeler genel olarak statik ya da dinamik yük altında imalattan kaynaklanan hatalara karşı oldukça duyarlıdır. Bu sebeple kompozit malzemelerde çatlak ilerlemesiyle ilgili geniş araştırmalar yapılmıştır. Ve bu hasarların yama ile tamir edilmesi pek çok makalede konu edilmiştir.

Wang ve Pidaparti, 2002, boron/epoksi yamalı ve yamasız 7075-T6 alüminyum alaşımında monotonik çekme ve yorulma çatlak ilerlemesini araştırmıştır. Alüminyum levhalar V tipi kenar çentiğine sahiptir ve 1, 2, ve 4 katlı boron/epoksi kompozit yama ile onarılmıştır. Kat sayısının artması ile gerilme şiddet faktöründe 2-4 kat azalır, yorulma ömründe ise 10 kat artış gözlenmiştir.

Hosseini-Toudeshky ve ark. 2005, tek kenarı cam/epoksi kompozit yama ile onarılmış merkezi çatlaklı alüminyum panellerin Mod I koşulunda deneysel yorulma çatlak ilerleme davranışını araştırmıştır. Çatlağın Tek kenarı onarılmış panellerin kalınlığı boyunca ilk konumundan üniform olmayan bir şekilde ilerlediği görülmüştür. Onarılmış panellerin çatlak ilerleme ömrü üzerine yama kalınlığının etkisi ince ve kalın panel kalınlığı için araştırılmıştır. 2.29 mm kalınlıklı panelin çatlak ilerleme ömrü 4 katlı yama ile yaklaşık % 65, 16 katlı yama ile % 236 artmıştır. 6.35 mm kalınlıklı panelin ömrü 4, 8 ve 16 kat yama ile yaklaşık olarak % 21-35 artmıştır.

Wang ve ark. 2006, boron/epoksi yamalı ve yamasız, çentikli 7075 ve 6061 alüminyum alaşımının giga çevrim rejimde yorulma çatlak ilerleme davranışını deneysel araştırmıştır. 1, 2 ve 4 katlı yama ile çalışmışlar. 7075 alüminyum alaşımında 2 ve 4 katlı yama koşulları arasında açık bir fark görülmemesine rağmen çatlak ilerlemesi genellikle geciktirilmiştir. 6061 alüminyum alaşımında yama etkisinin 7075 alüminyum alaşımından daha etkili olduğu görülmüştür.

Soutis ve ark. 1999, dıştan kompozit yama ile onarılmış CFRP tabakalı yapıların basma yükü ile testini yapmıştır. Onarılmış bölgedeki gerilme dağılımını

belirlemek için üç boyutlu sonlu eleman analizi yürütülmüştür. Numunelerin merkezinde 10 mm çaplı delik mevcut olup, bu deliğin yaklaşık % 50 tabakalı yapının dayanımını azalttığı bulunmuştur. Dıştan yama onarımları ile hasarlı yapının dayanımı, hasarsız yapının dayanımının % 80 ine geri dönmüştür.

Yapı ve makine elemanlarında muhtelif şekillerde hasarlar oluşabilir. Kompozit malzemelerin hasar davranışları mühendislik açısından çözülmesi gereken bir problemdir. Kompozit malzemeler genel olarak statik ya da dinamik yük altında imalattan kaynaklanan hatalara karşı oldukça duyarlıdır. Bu sebeple kompozit malzemelerde çatlak ilerlemesiyle ilgili geniş araştırmalar yapılmıştır. Ve bu hasarların yama ile tamir edilmesi pek çok makalede konu edilmiştir.

Martens ve Ellyin (2000), $\pm 66^\circ$ ve 0° sarım açılı, 34 asimetrik tabakalı filaman sarım CTP boru numuneleri ile farklı aksenal/çevresel gerilme değerleri için statik iç basınç testleri yapmışlardır. Bunlardan; serbest uçlu iç basınç testlerinden elde ettikleri sonuçlar; patlama gerilmesi $\sigma_{\theta\theta_{statik}}=300$ MPa, elastik bölgede $\sigma_{\theta\theta}=155$ MPa, $\sigma_{zz}=0.5$ MPa, $\% \varepsilon_{\theta\theta}=0.46$, $\% \varepsilon_{zz}=-0.15$, poisson oranı $\nu=0.32$ ve elastisite modülü $E_{\theta\theta}=37.7$ GPa olarak sunulmuştur.

Yine Ellyin ve Martens (2000), bu kez aynı numuneler ile farklı bir çalışma olarak iç basınç yorulma testlerini yapmışlardır. ASTM D-2992 standardına göre $R=0.05$ ve $f=0.42$ Hz değerlerinde yapılan yorulma deneyleri ile, gerilme ile ömür arasında $\sigma = 504.18 (N)^{-0.121}$ şeklinde bir ilişki tespit etmişlerdir.

Xia ve ark. (2001), yaptıkları çalışmada filaman sarım kompozit borularda elastik gerilme analizinin basitleştirilmiş bir şeklini incelemişlerdir.

Perreux ve Joseph (1996), $\pm 55^\circ$ sarım açılı ve üç tabakalı, E cam-epoksi reçine, filaman sarım borularda, frekansın yorulmaya etkisini incelemişlerdir. Aksenal çekme, açık uçlu ve kapalı uçlu iç basınç yükleme durumları için frekans $f=0.02\sim 5$ Hz aralığında değiştirilerek, sonuçlar gözlenmiştir. Serbest uçlu statik mukavemet $\sigma_{\theta\theta_{statik}} = 550$ MPa bulunmuştur. Yine serbest uçlu yorulmada $f=0.2$ Hz' de $\sigma_{\theta\theta}=100$ MPa da $N=200.000$ çevrim, $\sigma_{\theta\theta}=150$ MPa basınçta $N=20.000$ çevrim ve $\sigma_{\theta\theta}=200$ MPa da $N=2.000$ çevrim yapmıştır. $f= 0\sim 1$ Hz aralığında frekansın artmasıyla ömür artmakta olup, 1 Hz' den sonra frekans artışı ile ömrün

değişmediğini ayrıca açık-uçlu ile kapalı-uçlu iç basınç yorulma testlerinin benzerlik arzettiğini hatta $S-N$ diyagramı eğrilerinin hemen hemen çakıştığını rapor etmişlerdir.

Richard ve Perreux (2000), yaptıkları çalışmada tabakalı kompozit malzemelerde güvenilirlik yaklaşımıyla hasar mukavemetinin optimizasyonu konusunu incelemişlerdir. Ayrıca iç basınç altındaki filaman sarım CTP boruların hasar davranışını incelemişlerdir. Bu borularda sızıntı hasarının yüzeyin ıslanması ile başladığını rapor etmişlerdir.

Kaynak ve Mat (2001), $\pm 55^\circ$ sarım açılı, 2 tabakalı, CTP boruları, %60, %70 ve %80 $\sigma_{zz \text{ statik}}$ gerilme oranlarında, $R=0.1$ ve $f=0.1$, 1 ve 10 Hz frekans altında çekme yorulmasına tabi tutmuş ve frekansın, hasar mekanizmasına etkisini; matriks çatlama, elyaf boyunca matriks çatlama ve elyaf kopması olmak üzere üç safhada incelemiştir.

Tarakçıoğlu (1992), $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 75^\circ$ E cam-epoksi reçine, filaman sarım borularda, serbest uçlu iç basınç testlerinde sırasıyla, elyaf hacimsel oranı $V_f=0.62$, 0.63, 0.63 olan borularda, poisson oranını $\nu=0.78$, 0.56, 0.32, elastisite modülünü $E=15.4$, 23.4 ve 39.3 MPa olarak bulmuştur.

Yine Tarakcioglu ve ark. (2000), iç çap $d=68$ mm, et kalınlığı $t=2.5$ mm olan, $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 75^\circ$ sarım açılı, E cam-epoksi reçine, filaman sarım borularda (çatlaksız), serbest uçlu statik iç basınç teğetsel mukavemeti sırasıyla, $\sigma_{\theta\theta \text{ statik}} = 252$, 439 ve 997 MPa bulmuşlardır. Sonra $a/c=0.2$, 0.3, 0.4 ve $a/t=0.25$, 0.38, 0.5, 0.63, 0.75 oranlarında, eksenel doğrultuda yarı eliptik yüzey çatlakları açılmış aynı boruların, statik çatlaklı mukavemet ve kırılma tokluğu değerlerini bulmuşlardır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki; $\pm 45^\circ$ sarım açılı çatlaklı boruların mukavemeti ile çatlaksız boruların mukavemeti hemen hemen aynı çıkmıştır. Serbest uçlu statik iç basınç testlerinde $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 75^\circ$ sarım açılı yüzey çatlaklı borular, yüzey çatlaklarına (özellikle sığ yüzey çatlaklarına $a/t=0.25$, 0.38 değerlerinde) duyarsız davranmıştır. Ayrıca Newman-Raju yaklaşımının deneysel sonuçlarla uyumadığını rapor etmişlerdir.

Gemi (2003), $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 75^\circ$ filaman sarım açılı E cam-epoksi CTP boruların, yorulma davranışını incelemiş ve hasar oluşumunu safhaları ile birlikte

izah ederek, gerilme ile yorulma ömrü arasındaki ilişkiyi *S-N* diyagramları ile vermiştir.

Ki- Hyun Chung, Won-Hu Yang, (2002). Eğilmiş merkez çatlaklı sert kabuklu malzemenin yapışmalı tamirli kırılma mekanik analizi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Hasarlı veya çatlaklı yapıların servis ömrünün araştırılması araştırmacı ve mühendislerin merak konusu olmuştur. Kompozit sertleştirilmiş paneller kullanarak eğilmiş merkez çatlak tamiri ile, sert kabuklu yapıda gerilme şiddeti faktörünün bir analizi geliştirilmiştir. Bir eğilmiş çatlakta kırık davranışı ve çatlak büyümesi ve ilerlemesi davranışının karakterize edilmesi için sayısal bir inceleme oluşturulmuştur. Çatlak gelişimi yönünü araştırmak için maksimum tanjant gerilmesi (MTS) kriteri kullanılır.

Wei- Chung Wang, Jiong- Shiun Hsu, (2000). Araştırmacılar kenar çatlaklı plakalar üzerinde kompozit yama tamirli malzemede boyut etkisini araştırmışlardır. Yama geometrisi optimizasyonu için sırası ile X ve Y eksenleri boyunca seçilerek uzatılmıştır. Bu makalede üç farklı geometrili kompozit yaması ile bir kenar çatlaklı alüminyum alaşım plakasının tamir yeterliliği hem AF-ESPI hemde Modal test metodları ile araştırılmıştır. Sonuçlardan görüldüğü kadarıyla kenar çatlaklı plaka öncesi ve hatta yamadan sonraki Mod I titreşimi için belirli bir fark oluşmamaktadır. Diğer taraftan ikinci ve dördüncü modlar için hem X, hem de Y yönlerinin boyutlarının uzatılması gerekli değildir.

Houssam Toutanji, Sean Dempsey, (2001). Gerilmeye maruz kalmış boruların gelişmiş kompozit malzemeler ile güçlendirilmesini araştırmacılar konu edinmişlerdir. Fiberle güçlendirilmiş polimer kompozitler (FRPC) yapıların ortalama tamir süresinde güçlü bir yerleri vardır. Bunun yanında FRP lerinde byine boruların tamir edilmesinde yeni bir olarak bakılabilir. Araştırmada FRPC kullanımının faydaları ve boru kenarlarındaki farklı gerilme durumuna ve bu gerilmelerin malzemeye etkisi araştırılmıştır. Tekrarlı gerilmeden dolayı hasar görmüş yüzeylerin tamirinde FRPC plakaların etkisi de araştırılmıştır. Üç farklı FRPC şekli deneylerde kullanılmıştır. Bunlar cam FRP (GFRP) , Aramid FRP (AFRP) ve karbon FRP (CFRP) dir. Bu farklı plakaların boru yüzeylerindeki performansları analitik olarak kıyaslanacaktır. Bu araştırmalara göre CFRP hem cam hemde aramid esaslı

malzemelere göre boruların maksimum iç basınç kapasitesini ve mukavemetine, durabilitesine, korozyon etkilerinde daha iyi performans vermiştir.

A. Chukwujekwur Okafor, Navdeep Singh, U.E. Enemuoh, S.V. Rao, 2005, Çatlamış alüminyum uçak panellerinin yapışkan bağlantılı, bileşik yama tamirinin dizaynı, analizi ve performansı araştırıldı. Çatlama öncesi 381*89*1,6 mm boyutlarındaki 2024 T3 clad alüminyum panelleri sekizgen, tek tarafı bor ile kaplı bileşik yama ile tamir edilmesi test örneği olarak kullanıldı. İki farklı kat (5-6 Kat) araştırıldı. Lineer ve lineer olmayan element analizleri alüminyum panel için sekize yirmi dört derece eğimli altıgen şeklinde elementler yama olarak kullanıldı. Bor yaması ve yapışkan madde tek eksenli gerilebilir yüklemeye maruz bırakıldı. Elde edilen baskı dağılımı tamir edilen yapının dayanıklılığını ve mukavemetteki artışı tesbit için kullanıldı. Maksimum yüzey geriliminin yamanın uygulanmasından sonra açıkça azaldığı ve çatlağın yön değiştirerek etkisinin azaldığı ortaya çıkmıştır.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Giriş

Kompozit malzemeler, tasarımda aranan özellikleri verebilecek uygun bir malzeme üretmek amacıyla, makro boyutta iki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesi ile elde edilen yeni malzemelerdir.

Kompozit malzemelerin bilinen klasik metal malzemelere göre üstün yanları, malzeme kombinasyonunun çok sayıda olmasıdır. Kompozitlerin avantajları onlara malzeme özelliklerini istenildiği gibi değiştirme olanağı tanır. Dolayısıyla, yapıda var olması istenen düşük ağırlık, yüksek mukavemet, yorulma ve korozyon direnci, estetik görünüm, elektrik yalıtkanlığı, rijitlik gibi malzeme özelliklerinin biri veya birkaçı kolaylıkla elde edilebilir.

Kompozit malzemelerin avantajı; bileşenlerinin en iyi özelliklerini bir araya getirmesidir. Kompozit malzemelerin üretimi ile aşağıdaki özelliklerden biri veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanır:

- 1- Mukavemeti artırmak,
- 2- Rijitliği artırmak,
- 3- Korozyona karşı direnç,
- 4- Ağırlığı hafifletmek,
- 5- Yorulma ömrünü uzatmak,
- 6- Sıcak ortamlarda kullanımı iyileştirmek,
- 7- Isıl yalıtım,
- 8- Isıl iletkenlik,
- 9- Elektrik iletkenliği,
- 10-Estetik.

Bu sayılan özelliklerin hepsi aynı anda iyileşmez ve zaten buna gerek de yoktur. Ancak hangi özelliklerin iyileştirilmesi isteniyorsa kompozit malzeme o amaca uygun şekilde imal edilir.

Kompozit malzemeler *matriks* adı verilen bir ana bileşenle, yüksek mukavemet ve yüksek elastiklik modülüne sahip olan *takviye elemanı* (fiber, tane, tanecik, pulcuk, tabaka) olarak adlandırılan yapısal bileşenlerden oluşurlar. Yapısal bileşenler olarak da beş şekilde sınıflandırılabilirler(Samancı,2004). Bunlar;

1. Elyaf takviyeli kompozitler,
2. Pulcuk takviyeli kompozitler,
3. Parçacıklı kompozitler,
4. Dolgulu kompozitler,
5. Tabakalı kompozitler.

3.2. Elyaf Takviyeli Kompozitler

Takviye malzemesi elyaf halindedir. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin özellikleri, fiber/matriks karışım oranlarını değiştirmek ve her bir fazın sahip olduğu nitelikleri düzenlemek suretiyle ayarlanabilir. Özellikleri ve sahip olduğu nitelikleri yönlere göre değişen malzemeler, anizotropik malzemelerdir. Malzemenin anizotropik olmasının en önemli neticelerinden birisi, malzeme davranışlarını izah edebilmek için gerekli olan parametre sayısının artmasıdır. Mesela, izotropik malzemelerin elastik davranışının izah edilebilmesi için yalnızca iki sabit parametre gerekirken, genel anizotropik malzeme için 21 ve ortotropik malzeme için 9 sabit parametrenin bulunması gereklidir. Elyafli kompozitler yumuşak ve sünek matriks içine sert, dayanıklı, elastikliği yüksek elyaflar ilave edildiğinde çekme dayanımı, yorulma dayanımı, elastisite ve özgül dayanım özellikleri iyileştirilir. Elyafli kompozitler tek yönlü sürekli elyafli, kırılmış elyafli, ortagonal elyafli, çapraz dizilmiş sürekli elyafli ve rastgele dizilmiş sürekli elyafli olmak üzere beş sınıfa ayrılırlar (Şahin, 2000).

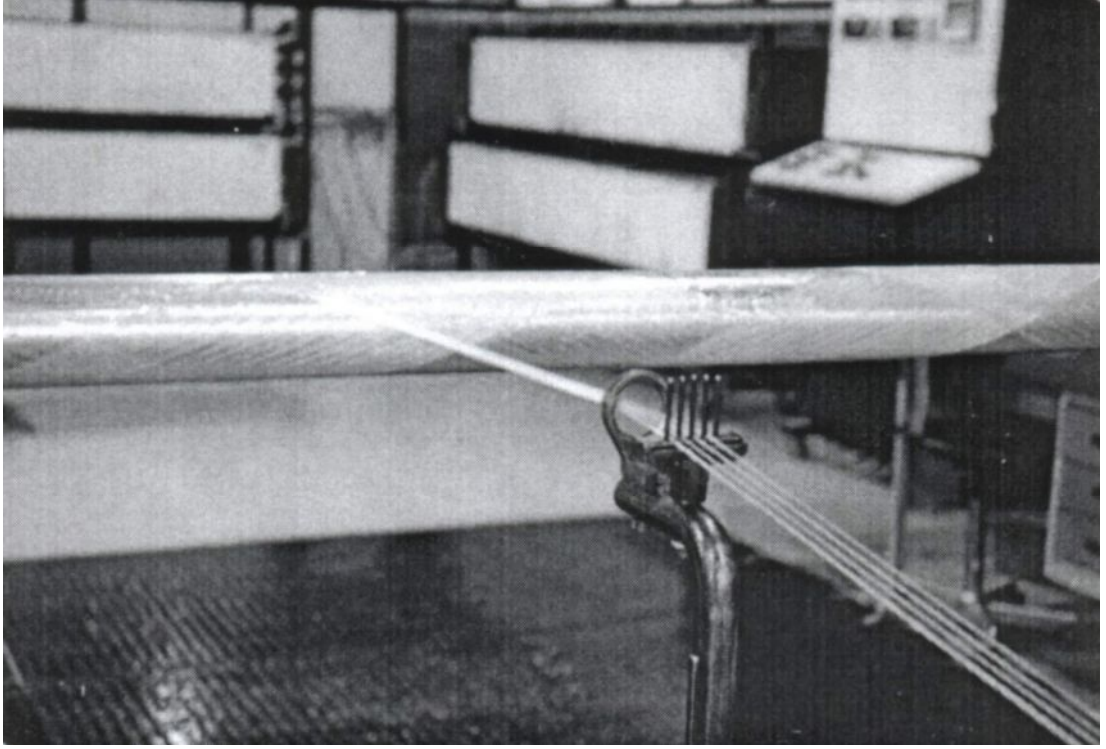
3.2.1. Filaman Sarım Tekniği

Filaman sarım tekniği kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan ve bilinen en verimli yöntemlerden biridir. Günümüzde filaman sarım tekniği depolama tankları, uçak, helikopter, yel değirmeni palleri, roket namlu boruları, yapı elemanları, spor malzemeleri, miller, tork çubukları, pnömatik-hidrolik silindirler, elektrik izolatör gövdeleri üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır (Misag-39 2001).

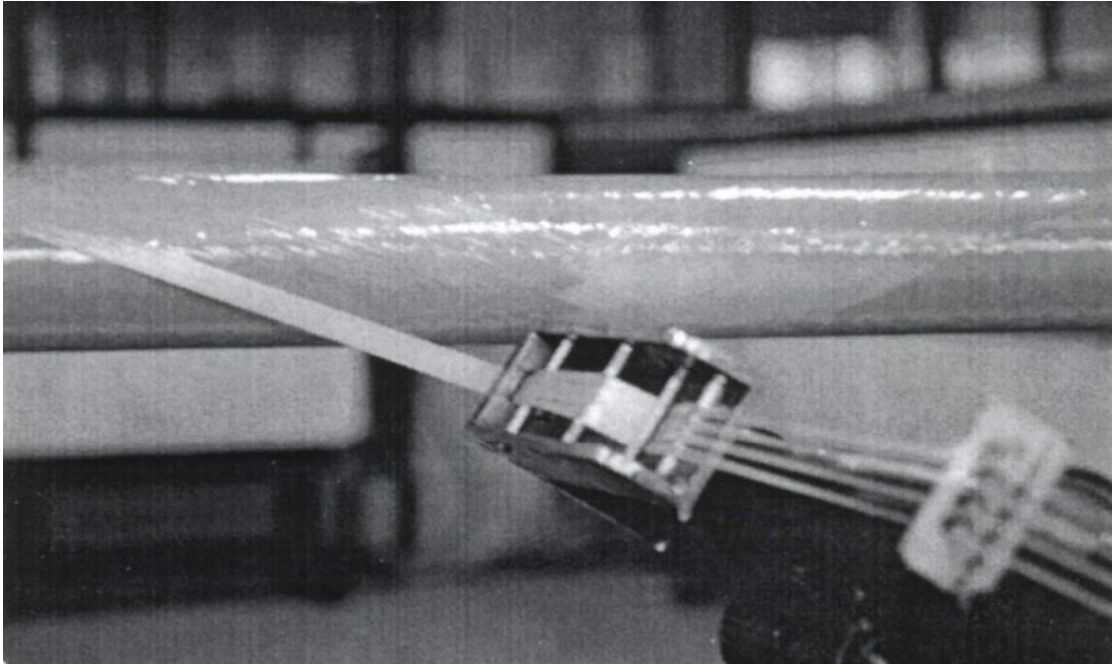
Tasarımları özel olarak yapılmış sargı makineleriyle kafa ve mandrel dönüş hızları ayarlanarak istenilen sarım açılarında üretim yapılır. Sarım birbirine yapışık bantlar halinde veya tekrarlanan paternlerin bütün mandrel kaplaması halinde gerçekleştirilir. İstenilen kalınlığa erişilene kadar birbirini takip eden katmanlar aynı veya değişik sarım açılarında sarılırlar. Sarım açıları mandrel boyuna doğru 25° gibi düşük açılardan mandrel eksenine dik (90°) açıya kadar değişebilir. Genellikle elyaflar arasındaki yapıştırıcı reçine olarak termoset reçine malzemesi kullanılır. Yaygın olarak kullanılan ıslak sarımda, reçine sarım esnasında uygulanır (Şekil 3.1 ve 3.2).

Alternatif yöntem olan kuru sarımda ise, önceden reçine emdirilmiş, “prepreg” elyaf/reçine sistemleri kullanılır. Sarım işlemi tamamlandıktan sonra parçalar yüksek sıcaklıklarda fırınlanır. Üretim prosesi mandrelin çıkarılmasıyla tamamlanır. Gerekli durumlarda parça üzerinde talaşlı imalat teknikleri uygulanabilir (Misag-39 2001).

Filaman sarım tekniğinde hemen her tip sürekli elyaf kullanılabilmesine rağmen filaman sarım metodu esas olarak bir cam elyaf sarım metodudur. Grafit, aramid ve kevlar49 gibi elyaflar yüksek özgül mukavemet ve elastisite modülü gerektiren havacılık ve uzay alanlarında kullanılmaktadır. Bu teknikte kullanılan başlıca reçine malzemeleri ise epoksi, polyester ve vinilester olarak özetlenebilir.



Şekil 3.1 Cam/epoksi sarımı



Şekil 3.2 Aramid/epoksi sarımı

3.2.2. Takviye Malzemeleri

Filaman sargı tekniğinde en yaygın takviye malzemesi olarak E-Cam elyaf kullanılmaktadır. E-Cam' a göre güçlü fakat daha pahalı olan S-Cam, karbon, aramid gibi elyaflar ise genellikle havacılık sanayinde kullanılır. Her iki cam elyafta filaman sargıya uygun yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Cam elyafların diğer takviye malzemelerine göre tek dezavantajları düşük elastisite modülüne sahip olmalarıdır. Tek yönlü kompozitlerde erişilebilecek en yüksek elastisite modülü 42-56 GPa civarındadır.

Daha yüksek elastisite modüllü sargı malzemeleri arasında en çok ilgi görenler karbon ve aramiddir. Bu takviye malzemelerinin özgül elastisite modülü, cam elyafın özgül elastisite modülünün yaklaşık üç-dört katı kadardır. Karbon ve aramidin diğer avantajları ise cam elyafinkine yaklaşan özgül mukavemet sağlayan, düşük yoğunluklarıdır. Son yıllarda, bu malzemelerin fiyatındaki büyük düşüğe rağmen, daha çok havacılık sanayi karbon ve aramidi etkin olarak kullanmaktadır.

Cam elyafın, daha yüksek elastisite modülüne sahip fiberlerle çeşitli kombinasyonlarından oluşan melez kompozitler ise, ağırlık ve mukavemetin fiyata göre optimize edildiği yapılar için uygundur.

Filaman sargılı yapılarda kullanılmak üzere birçok başka filaman malzemesi test edilmiştir. Bunların arasında çelik tel, boron, berilyum, poliamidler, polyesterler ve asbest de bulunmaktadır. Fakat hiç birinin kullanımı piyasada yaygınlık kazanmamıştır.

E-cam' ın ve S-cam' ın tek-filaman mukavemetleri S-cam' ın ki daha yüksek olmak üzere 2.0 GPa' dan 5.0 GPa' a kadar çıkabilir. Genellikle, açıklanan mukavemet değerleri çok sayıda bireysel deney sonuçların birleşmesi ile elde edilmiş olup açıkça yüksek bir standart sapmaya sahiptir. Bu dağılım, fiberdeki çiziklerden ve çiziklerle çevresel faktörler arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır. Fiberlerin mukavemetini azaltan çevresel faktörlerin başında

nem gelir. Çekme mukavemetini etkileyen diğeri bir faktör de elyaf çapıdır. Büyük çaplı elyafların küçük çaplı olanlara göre daha zayıf olduğu gözlemlenmiştir.

3.2.3. Matriks Malzemeleri

Filaman sarım sisteminde matriks malzeme olarak epoksi, polyester veya vinilester reçineler esas alınır. Fenolikler, silikonlar ve poliamidler, yüksek ısı dayanımı gereken yerlerde veya elektriksel uygulamalarda kullanılırlar. Bu üç reçinenin sertleşmesi esnasında su buharı ve solventler açığa çıktığından, ısı ve basınç etkisi gerektiğinden kullanımları zordur.

Ayrıca termoplastikler için matriks malzeme olarak kullanma araştırmaları devam etmektedir. Termoplastiklerin en önemli avantajları sertleştirme işlemi gerektirmemesi ve uzun ömürlü olmalarıdır. Bununla birlikte filaman sarım işlemi için termoplastiklerle ilgili bir metot da mevcut değildir. Termoplastik sarım için önce elyafın termoplastik ile kaplanması daha sonra sarım esnasında elyaflar arasında hava boşluğu kalmayacak şekilde sıkıştırılması gerekir. Bu işlem şimdilik yapılamamaktadır.

Epoksi reçine; uzay ve havacılık gibi ağırlığın kritik olduğu ve yüksek mukavemet istenen yerlerde tercih edilir. Epoksi reçinenin, polyester gibi daha ucuz olan bir reçineye tercih edilme sebepleri; daha iyi mekanik özellikleri, yorulma dayanımı, ısı dayanımı, takviye malzemesine iyi yapışması ve sertleşme esnasındaki düşük çekme oranı şeklinde sayılabilir. Uzay ve havacılık sanayinde epoksi reçinenin hala tercih edilme sebebi; sayılan özellikleri uzun süreden beri taşıyor olması ve güvenilirliğinin denenmiş olmasıdır.

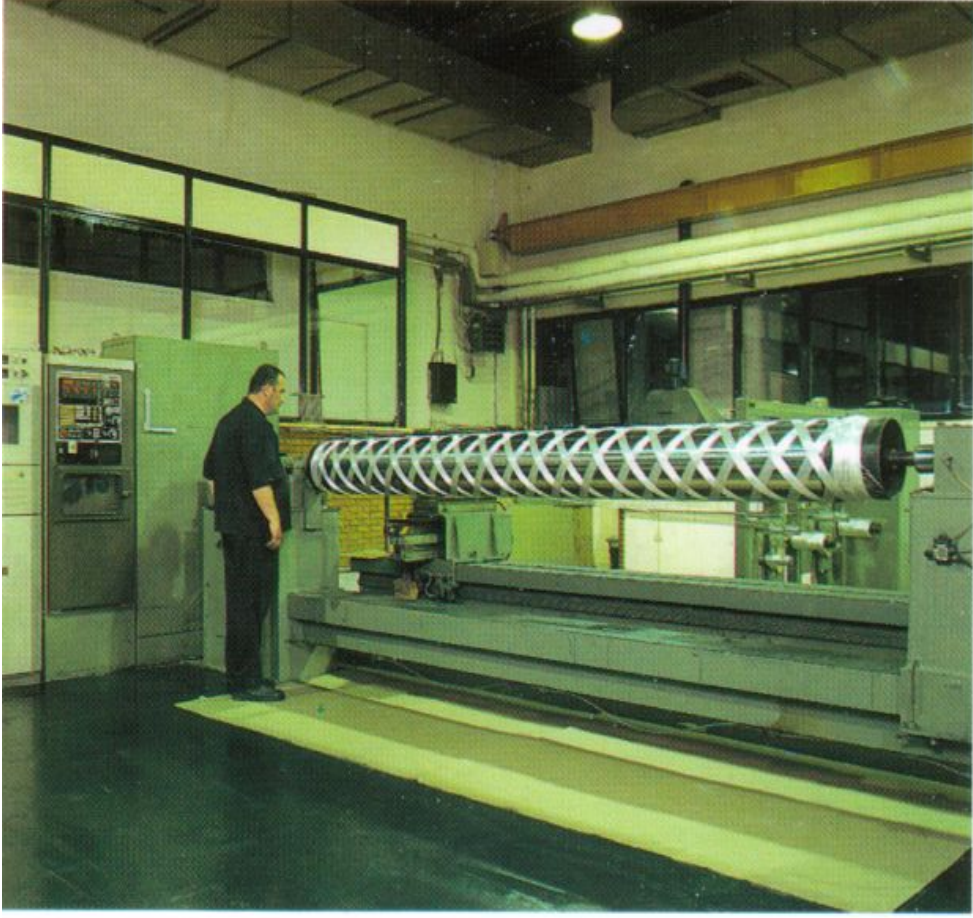
Filaman sarım için kullanılan epoksiler, levha için kullanılanların aynıdır. Ancak bazı özel uygulamalar için küçük düzeltmeler yapılır. Epoksi reçine tipleri istenen özel önceliklere göre seçilmelidir. Mesela, bromlu reçineler yüksek alevlenme direnci gereken yerlerde, esnek epoksi reçineler; darbe dayanımı ve yüksek uzama kabiliyeti gereken yerlerde tercih edilmektedir (Misag-39 2001).

3.2.4. Sarım Prosesi

Sarım işlemi, kutupsal ve helisel olmak üzere iki temel guruba ayrılır. Her yöntem değişik bir sargı ortaya çıkarır. Kutupsal sarımda; mandrel sabit kalır ve bu sırada besleme kolu mandrel eksenini etrafında önceden belirlenmiş bir açıda hareket eder. Mandrel üzerinde her harekette bir bant genişliğinde sarım olacak şekilde işlem sürdürülür. Bu tek devre kutupsal sarım olarak tarif edilir. Elyaf bantları birbirine bitişik olarak sarılır ve bir katman artı ve eksi iki ayrı kattan meydana gelir. Helis sarımda ise; mandrel dönerken elyaf besleme kafası ileri geri hareket eder. Mandrel dönüş hızı ile kafa hızı ayarlanarak istenilen sarım açısı elde edilir. En yaygın sarım çeşidi çok devreli sarımdır. İlk sarımdan sonra bantlar yan yana değildir. Bu işlemi defalarca tekrarlayarak ilk katmanın elde edilmesi gerekir. Bir katman iç içe geçmiş iki kattan oluşur. Sarım paternleri basit makinalarda deneme yanılma yöntemi ile ayarlanır. Bilgisayar destekli makinalarda ise paternler hesaplanarak bilgisayara girilir. Diğer sarım çeşitleri ise, teğetsel sarım, boyuna sarım ve bileşik sarım olarak adlandırılır. Teğetsel sarım veya çevresel sarımda, sarım açısı 90° ye çok yakın olduğundan mandrel her devri sonunda araba bir bant genişliği kadar ilerler. Araba hareketini tamamladığında mandrel yüzeyi elyafı kaplanarak tek kat meydana gelir. Bu sarımda elde edilen silindirik parçada kritik bölgeler ilave sarımlarla veya özel takviye parçalarıyla desteklenirler. Boyuna sarım ise, çok düşük açılı, açının mandrel eksenine yakın olduğu sarımlar için kullanılır. Kapalı uçlu basınçlı kaplarda minimum sarım açısı uçlardaki delik çaplarıyla sınırlandırılmıştır. Bileşik sarım ise boyuna sarımın teğetsel sarımla takviye edilmesi olarak açıklanabilir.

3.2.5. Helisel Sarım Makinaları

Helisel sarım makinalarının temel hareketleri mandrelin dönmesi ve kafanın ileri geri hareket etmesidir. Bunlara ek olarak, mandrel eksenine dik bir kızak kullanımıyla veya elyafı yönlendiren kılavuz halkanın düşey eksen etrafında sarım yönüne göre değişen dönme hareketi yani besleme deliğinin döndürülmesi ile dördüncü eksen yaratılmış olur (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4).



Şekil 3.3 CNC Helisel filaman sargı makinesi



Şekil 3.4 4-Eksenli CNC filaman sargı makinesi

Dördüncü eksenin eklenmesi ile fiberlerin uç kısımlara daha düzgün bir şekilde yerleştirilmeleri mümkün olur. Helis sargı makinalarının kontrolü mekanik veya sayısal olarak sağlanabilir. Mekanik kontrol genellikle sürücü sistem, bağlantı zinciri ve tahrik vidalarıyla sağlanır. Sayısal kontrollü sarımda her eksenin kendi hidrolik servo motoru bulunur. Bu servo motorlar bilgisayar tarafından kontrol edilirler. Bu tür makinalarda, sarım sırasındaki, elyaf gerginliği, reçine banyo sıcaklığı, elyaf hızı, elyaf uzunluğu, oda sıcaklığı, nem v.b. gibi parametreler sürekli izlenir ve kaydedilir. Mekanik kontroller sınırlı sarım açısına sahiptirler. Sayısal kontrolde ise istenilen her açıda sarım mümkündür. Bu iki tip sargı makinasına ek olarak farklı yapılar için özel olarak tasarlanmış makinalarda kullanılabilir.

3.2.6. Mandreller

Açık uçlu silindirik konik şekilli yapılar için kullanılan, çoğunlukla çelik ve alüminyum alaşımlarından üretilen mandrellerin tasarımları oldukça basittir. Uçların kapalı olması gereken hallerde, örneğin basınçlı kaplarda, mandrel tasarımı ve uygun malzemenin seçimi çok dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Yapılan tasarım parçanın mandrelden çıkarılması sırasında meydana gelebilecek hasarları ve kalıntı gerilmeleri asgariye indirebilecek şekilde olmalıdır. Mandrel kendi ağırlığından ve sarım gerilmelerinden etkilenerek deforme olmamalıdır. Ayrıca mandrel in yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen fırınlama sırasında yeterli dayanıma sahip olması ve fırınlama işleminden sonra kolayca çıkarılabilmesi çok önemlidir. Genel olarak mandreller iki ana grupta incelenebilir. Bunlar; metal alaşımlarından yapılan ve çıkartıldıktan sonra defalarca kullanılabilen mandreller, diğer grup ise, köpük, mum gibi malzemelerden yapılan, tahrip edilerek çıkarılıp atılan, her bir kullanım için yeniden üretilmesi gerekli olan mandrellerdir.

3.2.7. Sarım Kontrol Parametreleri

Sarım işleminin esası bobin şeklindeki elyafın malafa üzerine istenen özellikleri verecek şekilde sarılmasıdır. Başarılı bir sarım için, elyaf gerilimi, reçine yüzdesi, bant genişliği ve kat kalınlığının dikkatli kontrolü gerekir. Ayrıca optimum mekanik özelliklerin, mamulün üniformluğunun sağlanması ve elyaf hasarının önlenmesi için gereken özen gösterilmelidir.

Elyaf gerilimi; seramik, paslanmaz çelik veya teflon kılavuz halkalarla, kampana tipi frenlerle, çapraz pimlerle veya reçine viskozitesi ile sağlanır. Genellikle elyaf gerilimi, her bir uç için 1~ 4.4 N arasında değişir.

Aşınma ve hasarı önlemek için kuru elyaf demeti reçine içine girinceye kadar gerilme asgari düzeyde tutulmalıdır. Reçine banyosundan sonra gerilme değeri sarım düzeyine çıkarılır. İçten çözülen sabit bobinlerde, kılavuz halka ile yeterli elyaf gerginliği sağlanabildiği halde, makaralı bobinlerde fren tertibatı kullanılmalıdır. Daha gelişmiş tezgahlarda, her bir bobinin istenen elyaf gerginliği ile çözülmesini sağlayan adım motorlu elektronik kontrol sistemi mevcuttur. Tekstil elyafın kılavuzlanmasında seramik halkalar en iyi sonucu vermektedir.

Elyaf ıslatma tertibatının tasarımı yapılırken, elyaf uç sayısı, sarım hızı, reçine viskozitesi ve pelteleşme süresi gibi parametrelerin yanında, reçinenin veya elyafın ısıtılıp ısıtılmayacağı göz önüne alınmalıdır.

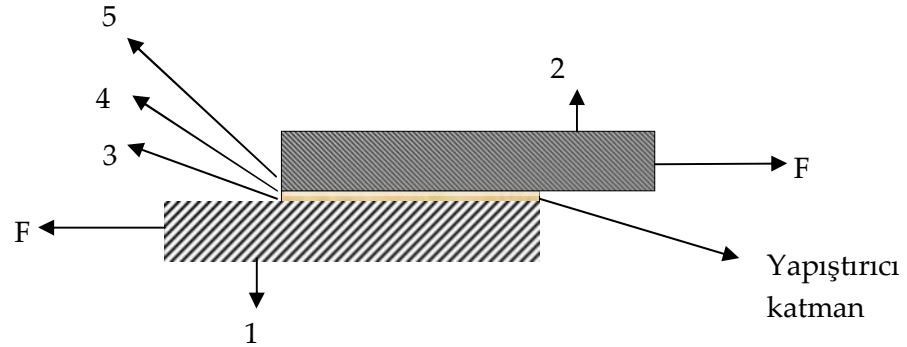
Hassas bir sarım için, düzgün bir sarımın yanında bant özelliklerinin iyi kontrolü yani bant kesitinin üniform ve istenen boyutlarda olması gerekir. Üniform bir bant ile sadece mukavemet artmaz ayrıca sabit bir kalınlıkta sağlanabilir.

Birim kat kalınlığı, belirli bir bant yoğunluğu (uç sayısı/genişlik) ve elyaf yüzdesi ile hesaplanır. Elyaf kat kalınlığı, genellikle üretici firmalarca hazırlanmış grafiklerden belirlenir. Bant yoğunluğu ve elyaf/reçine oranının dışında, boşluk miktarı ve malafa üzerindeki sıkışmada ortalama kat kalınlığını etkiler(Samancı 2004).

Sarım hızı, tezgah ve malzeme tipine göre büyük ölçüde değişmektedir. 100 m/dak kadar sarım hızı olumlu sonuç vermektedir. Hassas sarım için daha düşük hızlar (15~30 m/dak) kullanılmaktadır (Tarakçioğlu 1992).

4. YAMA VE YAPIŞTIRMA TEKNOLOJİSİ

Bir yama ile tamir prosesinde, yapısal dayanıklılık ve yamanın etkinliği büyük oranda iki malzemeyi birbirine bağlayan yapıştırıcının özelliklerine bağlıdır. Kompozit boru ve kompozit yama arasındaki yapıştırıcı katman kayma yükünü kenar etkisinden dolayı oluşan gerilme yoğunlaşmalarına, temiz olmayan bağlama şartlarına ve korozif çevre şartlarına direnç göstererek borudan yamaya en iyi şekilde iletebilmelidir. Şekil 4.1 de görüldüğü gibi ana malzeme ve yama malzeme arasında beş tip hasar söz konusudur. Ana malzemede hasar oluşabilir. Ana malzeme mukavemeti yama ve yapıştırıcı katmanın mukavemetinden daha düşük ise bu durum meydana gelebilir. İkinci olarak yama malzemede hasar oluşmasıdır. Üçüncü olarak ana malzeme ile yapıştırıcı katman arasındaki hasar (ayrılma) durumudur. Dördüncü hasar durumu yapıştırıcı katmanın hasarıdır.



Şekil 4.1. Hasar Oluşması Muhtemel Noktalar

4.1. Bağın Statik Mukavemeti

4.1.1. Yapıştırıcı Katmanın Yüklenmesi

Bir yama yapısı üç yapısal bileşene sahiptir:

- (1) Ana malzeme,
- (2) Yama,
- (3) Yapıştırıcı katman.

Yük yapıştırıcıdan yamaya, yapıştırıcı boyunca kayma yükü ile transfer edilir. Bu nedenle, yapıştırıcı katmanın kayma mukavemeti en güçlü yama tasarımı elde edebilmek için maksimize edilmelidir. Güçlü bir yapışma bağı ve güçlü yama, kırılmış yapıdan daha uzakta iletilen yük için tasarlanabilir. Yapıştırıcı katmandaki (yama kenarlarında) kabuk gerilmeler de bağı mukavemetini etkiler. Kabuk gerilmeler inceltmiş yama kullanılarak minimize edilir.

Hali hazırda, yapıştırıcı bağlar için evrensel olarak kabul edilmiş bir hasar kriteri yoktur (JOHN S.J. 1994). İdeal olarak (Hart-Smith 1987) birleşimde mukavemetli elemanın yapıştırıcı katman olmasını ve diğer bileşenlerin mukavemetini en azından %50 geçmesi gerektiğini belirtmiştir. Kırılma mekaniğine dayanarak, yapıştırıcıların tabakalar halinde dizilimi yapıda bir kırık var gibi olmasına neden olur. Lineer elastik kırılma mekaniği yapıştırıcı katmandaki hasarı tahmin etmede uygun bir model değildir. Yapıştırıcının dayanımı çoğu zaman deneysel olarak ve sonlu elemanlar modellemesi ile tahmin edilir.

Yama tasarımında yapıştırıcı tabakanın yorulma ömrü boyunca esas malzemeye bağlı kalması önemlidir. Esas malzeme ve yama arasındaki yapıştırıcının hasara uğraması, yamayı etkisiz hale getirir.

4.1.2. Yapıştırıcı Katmanda Kayma Mukavemetini Etkileyen Faktörler

Belirli bir yapıştırıcı kombinasyonunda, kayma gerilmeleri dağılımı bir çok faktöre bağlıdır. Aşağıdaki dört faktör bağ yapısının mekanik davranışını etkiler ve araştırılması gerekir:

- (1) yamanın boruyu örtme boyu,
- (2) yama ve yapışkanın yüzey hazırlanması,
- (3) yama ve boru arasındaki şekil değişiminin uyumu,
- (4) yapıştırıcı kalınlığı.

Diğer faktörler de kayma mukavemetini etkiler. Kimyasal kohezyon kuvvetleri ve yapıştırıcı yüzeyinde oluşan oksidin kalitesi, yapıştırıcı kalınlığı, çevre, yapıştırıcı katmanın kayma modülü de etkili faktörlerdendir. Bu araştırmada

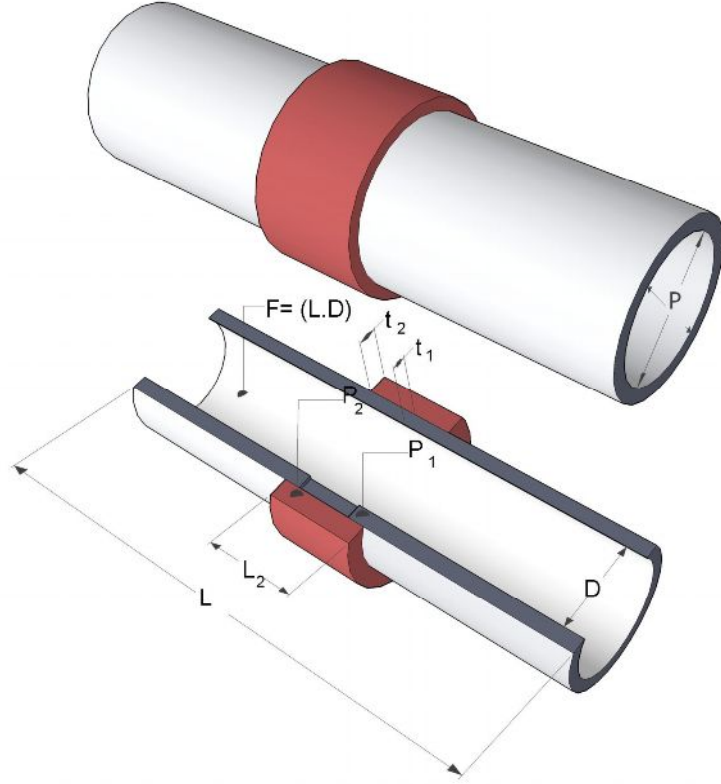
deneysel dağınlıklığı minimize etmek için bu faktörler araştırma boyunca sabit kabul edilmiştir.

4.2. Yama ve Yapıştırma Teorisi

4.2.1. Yamanın Ana Malzemeyi Örtme Boyu

Yapının kayma mukavemeti özelliklerini ve dizilimini etkileyen bağ mukavemeti, bağ boyu kritik bir parametredir. Kısa bir örtme boyu için yama ve ana malzeme arasındaki yapıştırıcı tabaka uygulanan yükün altında tamamen plastik olarak yüklenir. Daha uzun örtme boyu için, aynı yük altında, kayma yükü daha büyük bir alana etkir. Sonuç olarak bağlanmış alanın merkezindeki gerilmeler, yapışkanın elastik olarak yüklendiği bir alan oluşturularak azaltılır. Plastik kayma gerilmeleri bağın uçlarında toplanır. Örtünün boyu daha da arttıkça, plastik kayma gerilmelerinin arasındaki elastik rejim daha da uzar.

Yamanın ana malzemeyi örtme boyu hesaplanırken Şekil 4.2 den yola çıkarak yamanın boyutunun ne olacağı görülebilmektedir. Aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere; P : iç basınç, D : borunun iç çapı, L : boru uzunluğu, L_1 : yama uzunluğu, σ_1 : borunun teğetsel mukavemeti, σ_2 : yamanın mukavemeti, t_1 : borunun cidar kalınlığı, t_2 : yamanın et kalınlığını göstermektedir.



Şekil.4.2 Yamannın Boyutlandırılma Parametreleri

$$F = P(L.D) \quad (4.1)$$

$$F = 2P_1 + 2P_2 \quad (4.2)$$

$$P_1 = 2\sigma_1(t_1.L) \quad (4.3)$$

$$P_2 = 2\sigma_2(t_2.L_2) \quad (4.4)$$

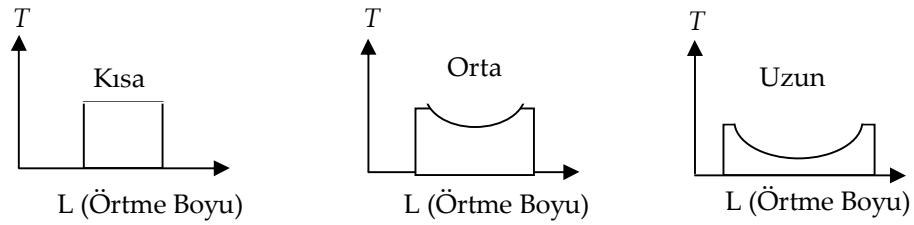
$$P(L.D) = 2\sigma_1(t_1.L) + 2\sigma_2(t_2.L_2) \quad (4.5)$$

Yukarıdaki formüllerden de anlaşılacağı gibi L_2 dışındakilerin tamamı bilinmektedir. Buradan L_2 çekildiği zaman yama boyutu bulunabilmektedir. Yama bu şekilde boyutlandırılmaktadır.

Kompozit numune üzerinde cam elyaf yamanın kullanılmasıyla, yüklenmiş numunedeki çatlak ucunda büyük yer değiştirme uyumsuzlukları sonucu, kompozit yamada bölgesel olarak tabakalar halinde dizim varsayımı yapılır. Genelde tabakalaşma çevresindeki çatlak uçlarının yapıştırıcı bağın mukavemetine bir etkisi olmadığı kabul edilir(D. Roberts 1995). Yapıştırırmalı birleşim teorisi bir ana

malzeme ve uygulanan yama arasındaki yapıştırıcı katmanda kayma gerilme dağılımının yama uzunluğu boyunca üniform olmadığını ileri sürer. Maksimum kayma gerilmeleri yapıştırıcı katmanda; yama ve yapı arasındaki geometri değişimleri ve yükleme değişiminden dolayı yer değiştirme farkının en geniş olduğu kenarlarında yerleşir.

Yapı ve yamanın yer değiştirmenin uyumlu olduğu yapışmanın merkezinde kayma gerilmeleri minimum, üniform ve elastiktir. Şekil 4.3 de farklı örtme uzunlukları için yapıştırıcı katmandaki kayma gerilmeleri dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Farklı Örtme Uzunlukları için Yapıştırıcı Katmandaki Kayma Gerilme Dağılımı

Birleştirme teorisi, yapıştırıcı katman ve ana malzeme arasındaki gerilme dağılımının yama boyunca üniform değildir. Maksimum kayma gerilmesi yapıştırıcı katmanın sonlandığı yerlerde meydana gelir. Ancak geometri değişimlerinden bu fark edebilir. Kayma gerilmeleri bağın merkezindeki yapıştırıcı ve yama arasındaki deplasman minimal, üniform ve elastiktir.

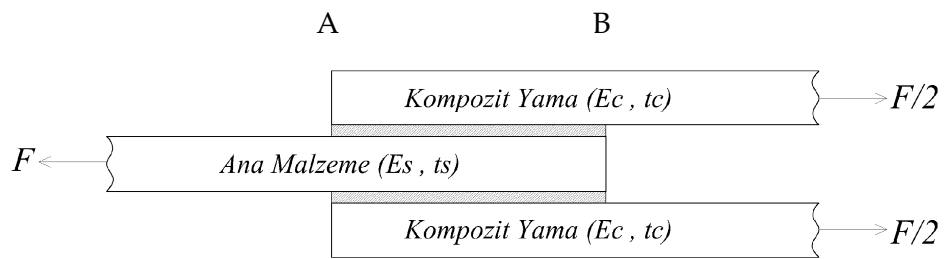
4.2.2. Kompozit Boru ve Kompozit Yamanın Yüzeyinin Hazırlanması

Boru ve yama yüzeyinin hazırlanması yama mukavemetini etkiler. Minford yapıştırılacak yüzey ve yapıştırıcı arasındaki yapışmaya hem kimyasal hem de mekanik katkılarının olduğunu belirtmiştir. Bu yüzden yama yapılacak boru yüzeyi ve yapıştırılacak yama malzemesi yüzeyi mekanik ve kimyasal olarak hazırlanması gerekmektedir. Mekanik olarak boru yüzeyi ince zımpara ile boruya

paralel olarak zımparalanması gerekmektedir. Zımparalamanın sebebi eski ve yapışmaya uygun olmayan yüzeyin kaldırılmasıdır. Ayrıca yüzey biraz daha pürüzlü hale gelerek yapışma yüzeyinin tutunmasını artırmaktır. Kimyasal olarak aseton ile zımparalanan bölgenin temizlenmesidir. Böylece yama yapılacak bölge yama tamiri için uygun hale getirilmiş olmaktadır. Yama malzemesinin de kimyasal ve mekaniksel olarak yüzeyinin hazırlanması gerekmektedir. Boru malzemesi ile yüzey hazırlama olaylarının aynısının yama malzemesine uygulanması gerekmektedir. Bağ mukavemetinin bir kısmı moleküller arası bağdan gelir. Kompozitlerde yüzeyin bağ oluşturma yeteneği büyük oranda yüzeydeki tabakaya bağlıdır (Mahoney 1990). Eski yüzeyin giderilmesi, yüzeyin bağ yapması için daha uygun bir yüzey oluşturma gerekmektedir. Mukavemetin başka bir bölümü pürüzlü iki yüzeyin mekanik bağlanmasından gelir. Yüzey pürüzlülüğü yapıştırıcı katmanların kayma direncini geliştirir. Kompozit yama için, yüzey hazırlamada, yapışkan bağla yüzeyin tekrar sertleştirilmesinden sakınmak gerekir(Baker 1988).

4.2.3. Kompozit Boru ve Kompozit Yamada Yer Değiştirme Uyumluluğu

Yük altındaki yama yapısına, kompozit yamanın çekme rijitliğinin etkisi vardır. Bağ boyunca yapıştırıcı katman ve boru arasındaki kayma gerilmesi üniform değildir. Şekil 4.4 de görüldüğü tamamen yapıştırılmış düz levha numune ele alınır.



☞

Şekil 4.4 Tamamen Yapıştırılmış Levha Numune

Gerilme gradyanları A ve B noktalarında maksimumdur. A noktasında, boru uygulanan yük tarafından boru gerinir ve henüz kompozit yama malzemesi şekil değiştirmemiştir. Bu iki yapıştırıcı yüzey arasında bir uyumsuzluk oluşturur. Böylece bu noktada bir gerilme yığılması oluşur. B noktasında, kompozit uygulanan yük ile

şekil değiştirir. Kompozit boru bu noktada hiç şekil değiştirmez. B noktasında şekil değiştirme, çift örtülü kayma numunesi için uygulanan yükle orantılıdır. Uygulanan yük F , kompozitin çekme rijitliği E_c , kompozit katmanın kalınlığı t_c , ve yamanın kalınlığı w ise:

$$\varepsilon_c \approx \frac{F}{2 E_c t_c w} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1, kompozit katmanın rijitliği E_c , artarsa ve diğer tüm değişkenler sabit tutulursa, bu noktadaki maksimum şekil değiştirmenin azaldığını gösterir (D. Roberts, 1995). Şekil değiştirmedeki bu azalma, kompozit ve çelik arasındaki yer değiştirmenin uyumsuzluğunu, gerilme konsantrasyonunu indirerek azaltır.

4.2.4. Yapıştırıcı Tabaka Kalınlığı

Yapıştırma olayının en zayıf halkası yapıştırıcı katmandır. Yapıştırıcı tabaka kalınlığı arttıkça bağ mukavemeti düşmektedir. Bunun sebebi ana malzemeden yama malzemesine kuvvetin aktarımı bir kuvvet çifti şeklinde olmaktadır. Kuvvet çiftinde her iki kuvvetin arasındaki mesafe ne kadar artarsa momentte o derece artacaktır. Dolayısıyla kalınlık arttıkça yapıştırıcı eğilmeyle zorlanacaktır. Ana malzeme ile yama malzemesi arasında en azından ince bir yapıştırıcı film kalınlığı olması gerektiği göz ardı edilmemelidir. Yapıştırıcı tabaka kalınlığının çok ince bir tabaka olmasının sakıncası rijitliğin fazla olmasına neden olması nedeniyle kırılma olmasıdır. Bu nedenle çok ince tabaka ideal yapıştırıcı tabaka kalınlığı değildir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Giriş

Deneyle; $\pm 55^\circ$ sarım açılı CTP boruların yamalı ve yamasız olarak serbest uçlu statik iç basınç değerlerini bulmak için yapılmıştır. Deneylede statik patlama mukavemeti bulunmuş ve yama şekli ve boyutuna göre yamanın mukavemeti tespit edilmiştir.

5.2. Numunelerin Hazırlanması

5.2.1. CTP boru numunelerinin hazırlanması

Deneylede kullanılan $\pm 55^\circ$ filaman sarım CTP borular, İZOREEL Kompozit İzole Malzemeler San. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından sipariş üzerine İzmir’ de üretilmiştir. Filaman sarım CTP boruların imalatında elyaf olarak; 17 μm çapında, Vetrotex 1200 teks, E camı ve matriks malzemesi olarak; Ciba Geigy Bisphonel A Epoksi CY 225 kullanılmıştır. Tablo 5.1’ de kullanılan elyaf ve matriks malzemenin özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.1 Kullanılan elyaf ve matriks malzemenin özellikleri

	E (GPa)	ν	$\sigma_{\text{çek}}$ (MPa)	ρ (gr/cm ³)	ϵ_{kop} (%)
Vetrotex 1200 teks	73.0	0.25	2400	2.6	1.5-2
E-camı					
Ciba Geigy CY 225 Epoksi Reçine	3.4	0.38	50-60	1.2	4-5

Üretimde yaş sargı (wet winding) metodu kullanılmıştır. Sıcaklığı 60°C de kontrol altında tutulan bir reçine banyosundan geçirilen elyaflar, yine sıcaklığı 60°C ye getirilen ve üzerine QZ-13 kalıp ayırıcı malzeme sürülen, malafa çapı 72 mm ve boyu bir metre uzunluğunda olan mandreller üzerine, toplam 6 tabaka (ortalama et

kalınlığı 2.15 mm) olmak üzere sarılarak imal edilmiştir. Her bir boru için baştan sona $\pm 55^\circ$ sarım açısı kullanılmıştır.

Sarım işlemi bittikten sonra, 2 saat 135°C ve daha sonra tekrar 2 saat süreyle 150°C sıcaklığında fırında tutarak numunelerin kür işlemi tamamlanmıştır. Şekil 5.1 de İzoreel firmasında kür işleminin yapıldığı döner fırın ve döndürme mekanizması görülmektedir. Boruların döner fırında çevrim yapmasının amacı, kür sıcaklığının borunun her tarafına eşit uygulanmasının sağlanması ve eşit cidar kalınlıklı boru elde etmektir.



Şekil 5.1 Kür İşlemi Yapılan Döner Fırın ve Döndürme Mekanizması

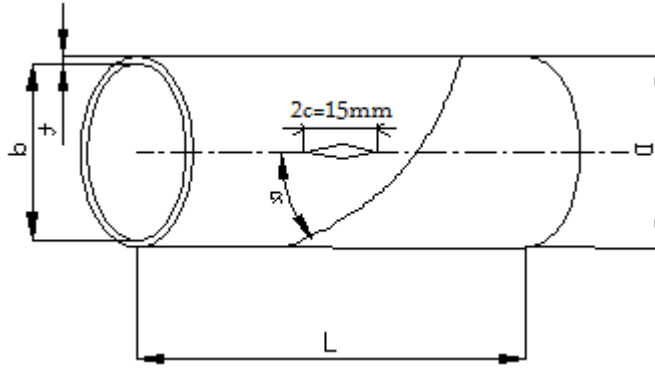
A. Samancı(2004) yapmış olduğu deneylerde cam elyaf ve reçine oranını belirlemek için yakma deneyleri yapmıştır. Bu deneylerde ASTM-D 2584' e uygun olarak yakma deneyleri yapıldı. $\pm 55^\circ$ sarım açlarına sahip deney numunelerinden, 50 mm genişliğinde, 3'er adet halka numune kesildi. Kesilen bu halka numuneler hassas terazide tartılarak ağırlıkları kaydedildi. Daha sonra bu numuneler, 600°C sıcaklığında bir fırında, hiç reçine kalmayınca kadar reçineleri tamamen yakıldı. Kalan reçinesiz cam elyaflar yeniden tartıldı (Şekil 5.2). Böylece cam elyaf ve reçine ağırlıkları tespit edildi. Cam elyafın yoğunluğu $\rho=2.6\text{ g/cm}^3$ olduğuna göre elyaf hacimsel oranı;



Şekil 5.2 $\pm 55^\circ$ CTP boru yakma deneyi sonrası kalan elyafların görünümü

$$V_f = (W_f / \rho_f) / (W_c / \rho_c) \quad (5.1)$$

Bağıntısı ile hesaplandı. Burada W_f ve W_c , sırasıyla elyaf ve kompozitin ağırlıklarıdır. ρ_f ve ρ_c , ise sırasıyla elyaf ve kompozitin yoğunluklarıdır. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin yakma deneyi sonucunda elyaf hacimsel oranı V_f , $\pm 55^\circ$ numuneler için 0.51 olarak bulunmuştur. CTP boruyu ürettirdiğimiz İzoreel Firması elyaf hacimsel oranı V_f değerini 0,55 olarak vermiştir. Daha sonra borular, 300 mm uzunluğunda kesilerek standart deney numuneleri haline getirilmiştir. Şekil 5.3 de numune geometrisi görülmektedir.



$$L = 300 \text{ mm}$$

$$D = 76.3 \text{ mm}$$

$$d = 72 \text{ mm}$$

$$t = 2.15 \text{ mm}$$

Şekil 5.3 Numune geometrisi

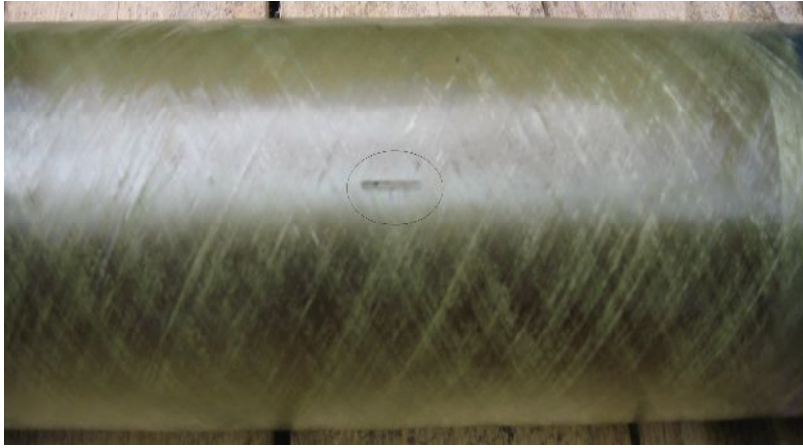
Borunun hasar davranışını incelemek amacıyla $\phi 72 \times 300 \text{ mm}$ boyutlarında $\pm 55^\circ$ sarım açılı filaman sarım CTP borulara freze tezgahında aksenel yönde özel bir aparat geliştirilerek, CTP borular üzerine 15 mm uzunluğunda kalınlık boyunca çatlak açılmıştır. Şekil 5.4 de kalınlık boyunca çatlak freze tezgahında açılışı gösterilmektedir.



Şekil 5.4 Boru Üzerine Kalınlık Boyunca Çatlağın Freze Tezgahında Açılması

Kalınlık boyunca çatlak genişliği $2c=15mm$ mesafeleri dijital kumpas ile kontrol edilmiştir. Daha sonra açılan çatlak uçları bistüri ile keskinleştirilmiştir. Şekil 5.5 de boydan boya çatlak hasarı gösterilmiştir. Daha önce A. Samancı(2004) tarafından yapılan çalışmada çatlak boyu 15 mm olarak alınmıştır. Deneyleerde çıkan sonuçların A. Samancı (2004) 'nın deney sonuçları ile kıyaslamak amacıyla 15 mm çatlak boyu alınmıştır. Her ne kadar A. Samancı'nın (2004) çatlağı yüzey çatlağı olsa da çatlak uzunluğunun aynı olmasına dikkat edilmiştir.

Deneyleerde kalınlık boyunca çatlak uygulama yerlerinde yapısal hata veya ani sivri uçların aniden dalmasıyla oluşabilir. Ayrıca oluşabilecek hasarın modellenebilme kolaylığı açısından bu şekilde seçilmiştir.



Şekil 5.5. CTP Boru Üzerine Açılan $2c=15mm$ Kalınlık Boyunca Çatlak

5.2.2. Hasarlı Boruların Tamir İşlemlerinin Yapılması

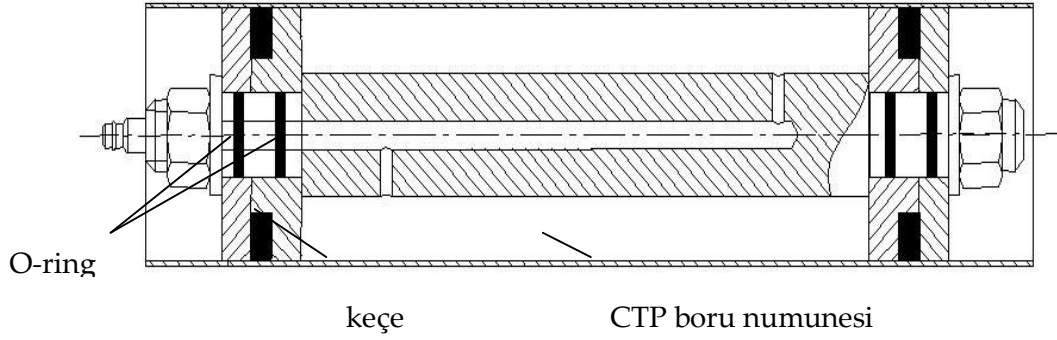
Hasarlı boruların tamir edilmesinin iki sebebi vardır. Bunlardan ilki boru içerisindeki akışkan nedeni ile hasarlı bölgedeki sızıntıyı durdurmak için kor uygulaması, diğeri ise hasarlı bölgedeki mukavemet kaybını gidermek için boruların hasarlı bölgesinin yamalar ile takviye edilmesidir.

Borunun hasarlı bölgesindeki sızıntıyı durdurmak için boydan boya çatlak bölgesine epoksi reçine uygulanmıştır. Çatlaklı veya hasarlı bölgenin temizlenerek, bu bölgeye yapılan takviye olayına kor ismi verilmektedir. Kor uygulanan bölgenin

çatlak öncesi durumuna en yakın hale gelmesini sağlamak amacıyla yapılır. Yapılan deneylerde kor malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Epoksi reçine kalınlık boyunca çatlak içerisine tam olarak nüfuz edecek şekilde doldurulmuştur. Doldurma işleminden önce CTP borunun üzerine açılmış kalınlık boyunca çatlağın dış tarafı bant ile kapatılmıştır. Yapıştırılan bantın sebebi uygulanan reçine malzemesinin çatlak içinden sızmasını engellemektir. Yapılan kor borunun iç tarafından uygulanmıştır ince fırça ile uygulanmıştır. Üzerine baskı uygulanarak iç tarafında boşluk kalmaması sağlanmıştır. Epoksi reçinenin sertleşmesini sağlamak maksadıyla kür işlemi uygulanmıştır. Kür işlemi 135°C sıcaklık altında 3 saat boyunca yapılmıştır. Reçinenin akmasını engellemek için kür sırasında kalınlık boyunca açılan çatlak alt tarafa gelmesine özen gösterilmiştir. Hasarlı borulara ve kabuk yama yüzeyleri yama ile tamir uygulamasından önce mekanik ve kimyasal olarak yüzey hazırlama işlemine tabi tutulmuştur. Mekanik yüzey hazırlamada, yama ve tamir edilecek bölge sıfır su zımparası ile zımparalanmıştır. Zımparalama işleminin yönü boruya paralel olarak yapılmıştır. Zımparalama işleminin amacı yama bölgesindeki dış etkilerden kaynaklanan kirlenmelerin giderilmesidir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü artırılarak tutunma için daha elverişli bir yüzey elde edilmiştir. Kimyasal yüzey hazırlamada ise mekanik yüzey hazırlama uygulanan bölge alkol ile temizlenmiştir. Bu işlemler boru ile yama arasında daha mukavim bir bağ oluşmasını sağlamıştır.

5.3. Serbest Uçlu İç Basınç Test Aparatının Hazırlanması

Serbest uçlu iç basınç temini için, Şekil 5.6 da görülen test aparatı imal edildi. Keçeler arası mesafesi $l=220\text{mm}$ olan, $\phi 60 \times \phi 72 \times 10\text{mm}$ boyutlarında, yüksek basınca dayanıklı iki adet V keçesi, eksenel yönde oluşan yükü taşıyacak olan iki ucuna vida açılmış ve bu iki ucu vidalı çelik mil üzerine karşılıklı olarak oturtulan çelik flanşlar üzerine takıldı. Bu sayede; serbest uçlu yada tek eksenli teğetsel gerilme hali dediğimiz, boru numunesi üzerinde, eksenel doğrultuda hiçbir gerilme oluşmaksızın, sadece ve sadece boru çevresince teğetsel doğrultuda gerilmenin oluşması temin edildi. Roketatar silahı namılı borusu ve buna benzer sistemlerde boru iki ucu serbest olarak iç basınç etkisi ile zorlanmaktadır.



Şekil 5.6 Serbest uçlu iç basınç test aparatı

5.4. Deney Setinin Hazırlanması ve Deneylerin Yapılışı

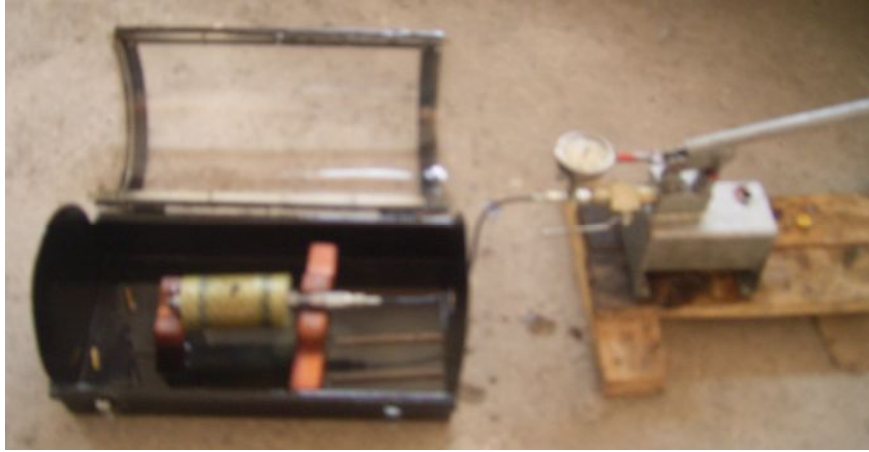
Statik iç basınç deneyleri, Selçuk Üniversitesi Cihanbeyli Meslek Yüksekokulu Makine Atölyesinde ve Konlazer firmasının fabrikasında yapılmıştır. Bu iş için; Şekil 5.7 de gösterilen $P = 60$ MPa basınç kapasiteli manuel el pompası kullanılmıştır.

Hidrolik el pompası düzeneğinde üzerinde kaç MPa basınç yüklediğimizi gösteren 60 MPa ölçebilen bir manometre ilave edilmiştir. Akışkanın geri tepmesini önleyen bir çek valf düzeneğe eklenmiş ve deney aparatı ile bağlantıyı sağlayan diğer fittings malzemeler kullanılmıştır.



Şekil 5.7. Deneyde Kullanılan El Pompası Düzeneği

Deneyde yüksek basınçlarda çalışılması nedeni ile patlama anındaki yağdan korunma maksatlı korunma kabini hazırlanmıştır. 3 mm lik saçtan imal edilen kabinin saç kısımları siyah boru ile boyanmıştır. Görüntü almak için kabinin üst kısmında 10 mm kalınlığında mika malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan mika malzemesi Ema Mika firmasında yaptırılmıştır. Şekil 5.8 te kabin ve mika korumanın bir fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 5.8 Deneyde Kullanılan Kabin ve Mika Koruması

Deneyler statik hasar mekanizmasının oluşumu ve gelişiminin incelenmesi ve statik patlama mukavemetinin tespiti için yapılmıştır. Deneyler 1 MPa basınç artışları ve her basınç artışında 1 dakika bekleme ile yapılmıştır. Deney boyunca hasar gelişimi takip edilmiş, meydana gelen hasarlar fotoğraflanmıştır.

5.5. Yama Numunelerinin Hazırlanması

5.5.1. Kabuk Yama Numunelerinin Hazırlanması

Yama numunelerinin ilk hazırlanması esnasında iki türlü yama tekniğinin uygulanması düşünülmüştür. Bunlardan ilki kabuk şeklinde yamadır. Kabuk yamalar CTP borularla aynı malzemedan, $\pm 55^\circ$ sarım açılı olarak, 2,15 mm kalınlığında üretilmiştir. Bu çapın seçilmesinin nedeni ana borunun içerisine tam olarak girebilecek bir boru üretmektir. Bu şekilde üretilen yama için kullanılacak boru ana boru malzemeyle uyumlu olması açısından ana boruyla aynı kalınlıkta üretilmiştir.

İçten uygulanan yamalar 69,85mm iç çapında bir metre boyunda yaş sarım olarak üretilmiştir. Yama malzemesi olarak kullanılacak borular ana boru malzemesinde olduğu gibi kütleme işlemine tabii tutuldu. 2 saat 135°C ve daha sonra tekrar 2 saat süreyle 150°C sıcaklığında fırında tutarak numunelerin kür işlemi tamamlanmıştır.

İç çapı 69,85 mm olarak üretilen borular, 50X50mm, 75X75mm, 100X100mm yamalar olacak şekilde kesilmiştir. Kesme işlemi el testeresi ile yapılmıştır. Kesme işleminde yama genişliği doğrusal olarak alınmışken, yama uzunluğu çevresel olarak alınmıştır. Kesilen yamalar kenar etkisinin azaltılması amacıyla uç kısımları pahlanmıştır. Yüzeyler yeterince pahlandıktan sonra yüzey temizleme işlemi mekaniksel ve kimyasal olarak uygulanmıştır. Sıfır su zımparası yamaya yatay olarak uygulanmış, yüzey yeterince pürüzlü hale gelmesiyle aseton ile kimyasal temizlik yapılmıştır.

Dıştan uygulanacak kabuk yama malzemesi 74,15 mm iç çapında ve 2,15 mm cidar kalınlığında üretilmiştir. Bu çap ana boru numunesi üzerine tam olarak geçmesini sağlamak amacıyla bu çapta üretilmiştir. Böylece yama için kullanılacak olan borudan kesilen yama malzemesi ana boru üzerine tam olarak oturacak ve çaptan dolayı bir uyumsuzluk meydana gelmemiştir. Sarım olarak yaş sargı metodu kullanılmıştır. Sarım $\pm 55^\circ$ sarım açılı olarak yapılmıştır. Çapı 74,15 mm olan mandrel kullanılmıştır. Bir metre boyunda üretilen dış yama için kullanılacak boru yine 50X50 mm, 75X75mm ve 100X100 mm olarak el testeresi ile kesilmiştir. Kesme işleminde yama genişliği doğrusal olarak alınmışken, yama uzunluğu çevresel olarak alınmıştır. Kesilen yamalar kenar etkisinin azaltılması amacıyla uç kısımları pahlanmıştır. Dış yamada kullanılacak yamalar boru üzerine alıştırılmıştır. Yüzeyler yeterince pahlandıktan sonra yüzey temizleme işlemi mekaniksel ve kimyasal olarak uygulanmıştır. Sıfır su zımparası yamaya yatay olarak uygulanmış, yüzey yeterince pürüzlü hale gelmesiyle aseton ile kimyasal temizlik yapılmıştır.

Hazır hale getirilen yamalar epoksi yapıştırıcı ile ana malzemeye içten, dıştan ve hem içten hem dıştan olmak üzere üç türlü yapıştırılmıştır. Yapıştırıcı kalınlığını tespit edebilmek amacıyla borunun yamalı halde et kalınlığı ölçülmüş ve yapıştırıcı kalınlığı 0,2 mm olarak tespit edilmiştir. Kabuk yamanın boruya tutunmasını sağlamak amacıyla özel bir mengene ile boru ile yama sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma ile

yapışma yüzey alanından çıkan epoksi yapıştırıcı bezle silinerek temizlenmiştir. Bu tür yama uygulama şekline kabuk yama adı verilmiştir. Şekil 5.9 da kabuk yama görülmektedir. Yapıştırıcı olarak boru imalinde kullanılan Ciba Geigy Bisphenol A Epoksi CY 225 reçinenin aynısı kullanılmıştır. Kabuk yama uygulaması yapıldıktan sonra 2 saat 135°C de kür edilmiştir. Kür işlemi sonrası özel mengene borudan ayrılmış ve yamalı boru test için uygun hale gelmiştir.



Şekil 5.9 Kabuk Yama Görünümü

5.5.2. Sargı Yama Numunelerinin Hazırlanması

5.5.2.1. Prepreg Malzemedan Yapılan Yama

Sargı yama olarak iki farklı yama malzemesi kullanılmıştır. Bunlar prepreg ve cam elyaf kumaştır. Kuvvetlendirici elyafların önceden reçine ile ıslatılarak tatbiki hazır hale getirilmesi yöntemine “prepreg” denir. Prepreg’lerde genelde epoksi reçineler kullanılır. elyaf /reçine oranının sıkı bir şekilde kontrol edilebildiği bu yöntem uçak sanayinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Prepregler vakum hatta basınç (7 bar) altında piştiklerinden katlar arası yapışma çok başarılıdır ve boşluk muhteviyatı asgariye indirilmiştir. Yüksek ısı zorlanmalara uygun olan, içinde oda sıcaklığında değil termik etki üzerine harekete geçen gizli bir aktivatörün bulunduğu Blendur® VP.PU 90IK01 tipi reçine kullanılmıştır. Özel bir kalınlaştırma metoduyla

emdirilen elyaf tabakaları 100°C'nin üstündeki sıcaklıklarda preslenmiş ve aktivatör etkinleştirilmiştir.

Tablo 5.2. Kullanılan cam kumaş/epoksi Prepreg Özellikleri

	E_l (GPa)	ν	σ_l (MPa)	E_l (GPa)	σ_l (MPa)
Mukavemet değerleri	20.0	0.13	600	19	550

Tablo 5.2 de deneylerde kullanılan cam kumaş/epoksi prepreg malzeme özellikleri görülmektedir. Prepreg uygulamasından önce ana boru yüzey hazırlama işlemi ilk olarak yapılmaktadır. Yüzey hazırlama işlemi ilk olarak sıfır zımpara ile boruya paralel olarak zımparalama işleminin yapılmasıyla başlamaktadır. Yama gelecek yüzey tamamen zımparalandıktan sonra bu yüzey aseton ile iyice temizlenmektedir. Kimyasal ve mekanik olarak hazır hale getirilen yüzeye prepreg üzerindeki film kaldırılarak yapıştırma işlemi uygulanmaktadır. Prepreg sarılmasından sonra naylon film yamalı bölgeyi saracak şekilde sarılmaktadır.

Prepreg yamalar 0,2 mm. kalınlığında, 100 mm genişliğinde olup borular üzerine 1 kat, 2 kat, 3 kat, 4 kat, 5 kat olacak şekilde uygulanmıştır. Deneylerde 1 kat yama her bir yama katının kaç MPa basınca dayanacağını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Açılan çatlakın çatlak uçlarındaki hasarı belirlemek ve yama tasarımını oluşturabilmek için farklı katlarda yama uygulaması yapılmıştır. 1 katlı yamadaki hasarın diğerlerinden farkını görmek için 1 kat yama uygulaması yapıldı. Prepreg malzemeler boydan boya kanalın tam tersi yönde karşısından başlamak suretiyle sarılmaya başlanmıştır. Böylece uç noktalar en uzak noktada kalmıştır. Her katın sarma işleminde bitiş noktası da başlangıç noktası olacak şekilde sonlandırılmıştır. Prepreglerin üzeri stres film ile sarılmıştır. Bu stres filmler ısı ile beraber büzülmüş ve prepregleri sıkarak boruya tam olarak tutunmasını ve sıkıştırma görevini üstlenmiştir. Prepreg yama uygulaması yapıldıktan sonra 2 saat 135°C de kür edilmiştir. Şekil 5.10 da sargı yama uygulaması görülmektedir.



Şekil 5.10. Sargı Yama Uygulaması

Prepreg uygulaması 100mm genişliğinde hazır haldeki yama numuneleri 1 kat, 2 kat, 3 kat, 4 kat, 5 kat olarak uygulanmıştır. 0,2 mm kalınlığındaki prepregler ve depolanmış şekli Şekil 5.11 de görülmektedir.



Şekil 5.11. Prepreg Malzemesinin Depolanmış Şekli ve Prepreg Örneği

5.5.2.2 Cam Kumaş Malzemedan Yapılan Yama

Dokunmuş veya dokunmamış halde, farklı elyaf türlerinden elde edilebilen, uluslararası tanımlarda, yassı veya rulo haline getirilmiş, tüm takviye malzemelerinin genel adı Kumaş anlamında “Fabric veya Cloth” olarak geçmektedir. Kumaş ürünlerini, cam elyafı, aramid, karbon elyafı gibi takviye malzemelerinin, tek yada birbirleriyle hibrid olarak biraraya getirilmesi ile oluşturmak mümkündür.

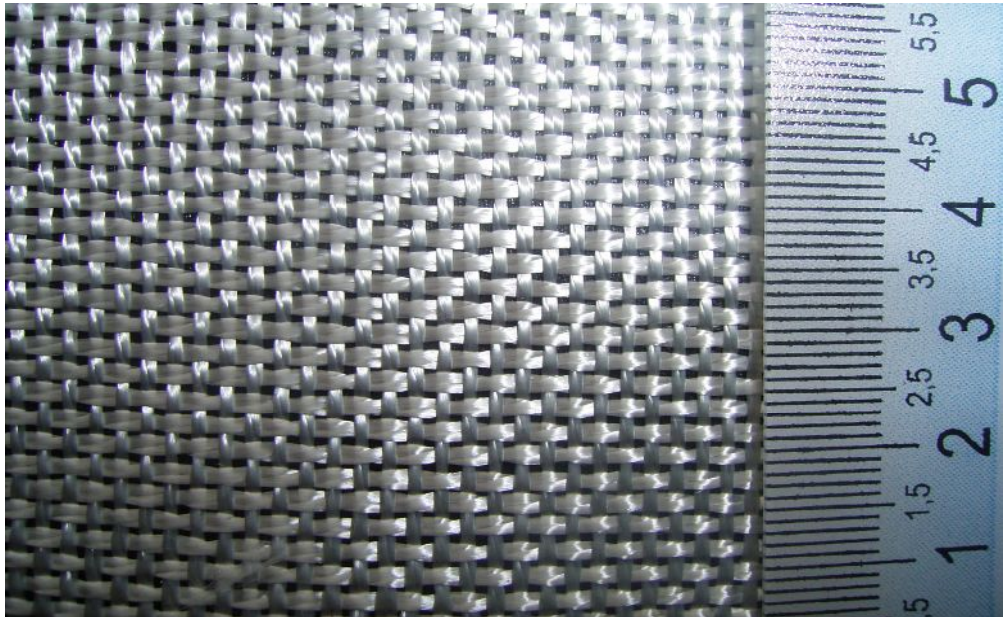
Deneyleerde kullanmış olduğumuz kumaş cam elyaf malzemedir. Kullanılmış olan cam elyaf kumaşın özelliği Tablo 5.3 de görölmektedir.

Tablo 5.3. Kullanılan Cam Elyaf Kumaşın Özellikleri

	E_l (GPa)	ν	σ_l (MPa)	E_t (GPa)	σ_t (MPa)
Mukavemet değerleri	22.0	0.15	640	20	600

Cam elyaf kumaş ile yama uygulamasından önce ana boru yüzey hazırlama işlemleri yapılmaktadır. Yüzey hazırlama işlemleri ilk olarak sıfır zımpara ile boruya paralel olarak zımparalama işleminin yapılmasıyla başlamaktadır. Yama gelecek yüzey tamamen zımparalandıktan sonra bu yüzey aseton ile iyice temizlenmektedir. Kimyasal ve mekanik olarak hazır hale getirilen yüzeye yama yapılmaktadır.

Cam elyaf kumaş yamalar 0° ve 90° sarım açılı 100mm genişliğinde 0,2 mm kalınlığında olup, borular üzerine 1 kat, 2 kat, 3 kat, 4 kat ve 5 kat olacak şekilde uygulanmıştır. Şekil 5.13 da hazır cam elyaf kumaş örneği görölmektedir. Şekil 5.14 de ise dört katlı cam elyaf kumaş sargı yama ile tamir edilmiş boru görölmektedir.



Şekil 5.13. Cam Elyaf Kumaş

Cam elyaf kumaşlar boru yapımında kullanılan reçine ile ıslatılmaktadır. Islatılan cam elyaf kumaş daha sonra bir sıyırma mekanizmasından geçirilmekte ve üzerine fazladan emilmiş olan reçineler sıyırılmaktadır. Bu sıyırma olayından hemen sonra kumaş ıslak iken boruya sarma uygulaması hemen yapılmaktadır. Sarma işlemi açılmış olan kalınlık boyu çatlağın tam tersi yönünde başlamaktadır. En uzak nokta olan bu noktada her kat yama sonlandırılmaktadır.

Islatma ve sarım işlemi uygulanmış cam elyaf kumaşın üzeri stres film ile sarılmıştır. Bu stres filmler kür işlemi ile sırasında büzüşmüş ve cam elyaf kumaş yamayı sıkarak boruya tam olarak tutunmasını ve sıkıştırma görevini üstlenmiştir. Cam elyaf kumaş yama uygulaması yapıldıktan sonra 2 saat 135°C de kür edilmiştir.



Şekil 5.14. Dört Katlı Cam Elyaf Kumaş Sargı Yama İle Tamir Edilmiş Boru

6. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

6.1. Hasarsız CTP Borunun İç Basınç Test Sonuçları

($\pm 55^\circ$) sarım açılı altı tabakalı hasarsız CTP boruların statik iç basınç deneyleri ile hasar oluşumu ve gelişimi incelenmiştir. Çatlak açmadan yapılan iç basınç deneyinde ortalama 2,15 mm et kalınlığındaki boru 39,5 MPa basınçta sıvı jetinden şiddetli bir patlama olmuştur. Deneylerde kullanılan CTP borunun mekanik özellikleri ve patlama gerilme değerleri Tablo 6.1 de verilmiştir.

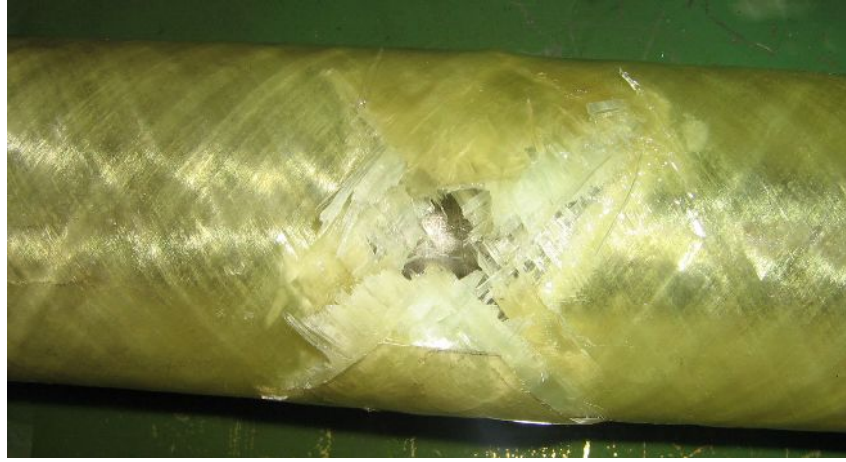
Tablo 6.1 Serbest uçlu CTP boruların statik iç basınç deney sonuçları

Sarım Açısı, (ϕ)	$\pm 55^\circ$
Teğetsel patlama gerilmesi, $\sigma_{\theta\theta_{statik}}$ (MPa)	39,5
Lineersizliğin başladığı teğetsel gerilme, $\sigma_{\theta\theta}$ (MPa)	9,0
Elastisite modülü, $E_{\theta\theta}$ (GPa)	23,1
Poisson oranı, $\nu = -\varepsilon_{zz} / \varepsilon_{\theta\theta}$	0,81

$\pm 55^\circ$ Sarım açılı CTP boruların statik iç basınç deneyinde, hasarın ilk belirtisi; numune üzerinde görülen ince beyaz çizgilerin oluşumudur. Bu çizgiler, 9,5 MPa teğetsel gerilme değerinde görülmeye başlandı. Gerilme değeri artırıldıkça beyaz çizgilerin yoğunlaştığı gözlemlendi. Beyaz çizgilerin artması yani beyazlaşma olmasının nedeni elyaflar iç basınç nedeniyle gerilmekte ve reçine ile elyaf liflerinin yavaş yavaş ayrıldığını göstermektedir. Meydana gelen ve gerilen elyaflar kendini beyaz olarak göstermektedir. Hasar gözlenmesi olmadan önce 6,0 MPa değerinde borudan çıtırtı seslerinin geldiği duyulmaya başlanmıştır. Basınç artışları artışı çıtırtı seslerinin yoğunlaşmasına neden olmuştur. Çıtırtı sesleri elyafların üzerine yük binmesinin arttığı ve elyaflarda kopmaların meydana geldiğini göstermektedir.

Kompozit borunun patlama basıncı 39,5 MPA değerine gelene kadar 1 MPa basınç aralıkları ile artırılmış, her basınç artışı arası bir dakikalık bir bekleme süresi

kullanılmıştır. Şekil 6.1. de görülen fotoğraf patlama sonrası çekilmiş ve hasarın büyüklüğünü göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi elyaf yönü rahat bir şekilde seçilebilmektedir. ($\pm 55^\circ$) elyaf açıları patlamanın yönünü ve şeklini belirlemiştir. Hasarsız kompozit boruda basınçlı akışkan tabakalar arası sızarak borunun en zayıf noktasını bulmuş ve bu bölgede terleme ve damlacık şeklinde görüntü vermiştir. Nihai olarak ise ani basınç boşalması ile yırtılma veya patlama gerçekleşmiştir.



Şekil 6.1 Hasarsız $\pm 55^\circ$ Flaman Sarım CTP borunun Serbest uçlu statik iç basınç test sonucu oluşan nihai hasar

Tabakalar arası bağ kuvveti tabakaları birbirine bağlayan epoksi reçine ile sağlanmaktadır. Statik iç basıncın artması ile beraber tabakalar arası bağ kuvveti zayıflamakta ve tabakalar arası açılmaktadır. İç basınç etkisi ile akışkan bu tabakalar arasına sızmakta ve borunun en zayıf noktasını aramaktadır. En yüksek patlama basınç değerini bu test vermiştir.

6.2. Kompozit Kabuk Yama İle Tamir Edilmiş CTP Borunun İç Basınç Test Sonuçları

Günlük kullanımda hasar herhangi bir sebeple oluşabilmektedir. Bunların yama ile tamir edilmesi, malzemenin kullanım ömrünü uzatmakta ve ekonomik kullanımı sağlamaktır. Deneylerde hasarlı boruların yama ile tamir edilerek, yamanın

etkinliğini saptamak amacıyla içten, dıştan, hem içten hem de dıştan kabuk yamalar uygulanmış ve bunlarla ilgili değerlendirmeler yapılmıştır.

6.2.1. İçten Kabuk Yama Yapılmış CTP Boruların İç Basınç Test Sonuçları

Boru üzerine 15mm uzunluğunda açılan kalınlık boyunca çatlak içten kabuk yama ile tamir edilmiştir. İçten yapılan kabuk yamalarda 50X50mm, 75X75 mm, 100X100 mm olmak üzere üç farklı boyut kullanılmıştır.

İçten yapılan 100x100mm boyutundaki yamada 6 MPa basınçta çıtırtı seslerinin oluşması başlamıştır. 7 MPa basınçta boru üzerinde akışkanın sızmaya başladığı, sıvının ilerlemesi boru yüzeyinden görülmeye başlanmıştır. 9 MPa basınçta sızıntı çok az olarak başlamış ve 1 dakikalık bekleme süresi içerisinde sızıntının çok rahat görülebilecek şekilde arttığı görülmüştür. Boru üzerinde herhangi bir beyazlaşma ve terleme görülmemiştir. Bu durum yamanın mukavemet değerlerinin, yapıştırıcının mukavemet değerlerinden daha iyi olduğunu göstermektedir. Kalınlık boyunca çatlak patlama sonrası dijital kumpas ile ölçülmüş ve kalınlık boyunca çatlakta ilerlemenin olmadığı tespit edilmiştir.

İçten yapılan 75x75mm boyutundaki yamada ise 6 MPa basınçta çıtırtı seslerinin oluşması başlamıştır. 8 MPa basınçta sızıntı çok az olarak başlamış ve 1 dakikalık bekleme süresi içerisinde sızıntının çok rahat görülebilecek şekilde arttığı görülmüştür. Boru üzerinde 100X100 mm testinde olduğu gibi herhangi bir beyazlaşma ve terleme görülmemiştir. Bu durum yamanın mukavemet değerlerinin, yapıştırıcının mukavemet değerlerinden daha iyi olduğunu göstermektedir. Kalınlık boyunca çatlak patlama sonrası dijital kumpas ile ölçülmüş ve kalınlık boyunca çatlakta ilerlemenin olmadığı tespit edilmiştir. Beklenen durumda budur. Çünkü mukavemet değeri oldukça düşüktür.

İçten yapılan 50x50mm boyutundaki yamada ise herhangi bir çıtırtı sesi duyulmadan yama sızıntı vermeye başlamıştır. 6 MPa basınçta sızıntı hat safhaya ulaşmış ve yama etkinliğini yitirmiştir. Boru üzerinde 100X100 mm testinde olduğu gibi herhangi bir beyazlaşma ve terleme görülmemiştir.

Yama boyutunun küçülmesi yamanın etkinliğinin azalmasına neden olmuştur. Yüksek iç basınç değerlerine ulaşılammıştır. Ayrıca çalışmaya devam eden durumlarda içten yama yapma uygulaması zor bir durumdur. Şekil 6.5 te içten yama yapılmış CTP borunun görülmektedir. İçten yapılan yama boru malzemesiyle aynı malzeme olması nedeni ile kabuk yamanın yeterince esnek olmadığı gözlenmiştir. Yeterince esnek olmadığı için tabaka ayrılması şeklinde ayrılmalar meydana gelmiştir ve sızıntılar vermeye başlamıştır. İçten yama testinde artan yama büyüklüğü patlama basıncını ve sızıntıyı azaltmıştır. Dıştan yamaya göre daha olumlu sonuç vermiştir.



Şekil 6.5 İçten Kabuk Yama Yapılmış CTP Boru

6.2.2 Dıştan Kabuk Yama Yapılmış CTP Borunun İç Basınç Test Sonuçları

Dıştan yama yapılan boruda 50x50 mm ebadındaki yama 4,2 MPa' da borudan kabuk halinde kalkarak etkisini kaybetmiştir. Dıştan yapılan 50x50mm

boyutundaki yamada ise herhangi bir çıtırtı sesi duyulmadan yama borudan fırlama şeklinde ayrılmıştır. Deney sonrası hasarda herhangi bir ilerleme gözlenmemiştir. Dijital kumpas ile ölçülen kalınlık boyunca çatlak aynen durumunu korumaktadır.

Dıştan yama yapılan boruda 75x75 mm ebadındaki yama 5,5 MPa' da borudan kabuk halinde kalkarak etkisini kaybetmiştir. Dıştan yapılan 75x75mm boyutundaki yamada ise herhangi bir çıtırtı sesi duyulmadan yama borudan fırlama şeklinde ayrılmıştır. Deney sonrası hasarda herhangi bir ilerleme gözlenmemiştir. Dijital kumpas ile ölçülen kalınlık boyunca çatlak aynen durumunu korumaktadır. Ancak 50X50 mm boyutundan daha iyi sonuç vermiştir.

Dıştan yama yapılan boruda 100x100 mm ebadındaki yama 8,5 MPa' da borudan kabuk halinde kalkarak etkisini kaybetmiştir. Dıştan yapılan 100x100mm boyutundaki yama da herhangi bir çıtırtı sesi duyulmadan yama borudan fırlama şeklinde ayrılmıştır. Deney sonrası hasarda herhangi bir ilerleme gözlenmemiştir. Dijital kumpas ile ölçülen kalınlık boyunca çatlak aynen durumunu korumaktadır.

Dıştan kabuk yamada elde edilen en yüksek basınç değeri 8,3 MPa dır. Elyafıara çok fazla yük binememesinden dolayı boruda beyazlaşma meydana gelmemiştir. Herhangi bir elyaf kopması olmamıştır. Yapılan kor işlemi sızıntıyı azda olsa yavaşlatmıştır. Ancak epoksi reçine tam olarak kor görevini yerine getirememiştir. Şekil 6.6 da dıştan kabuk yama yapılmış boru örneği görülmektedir.



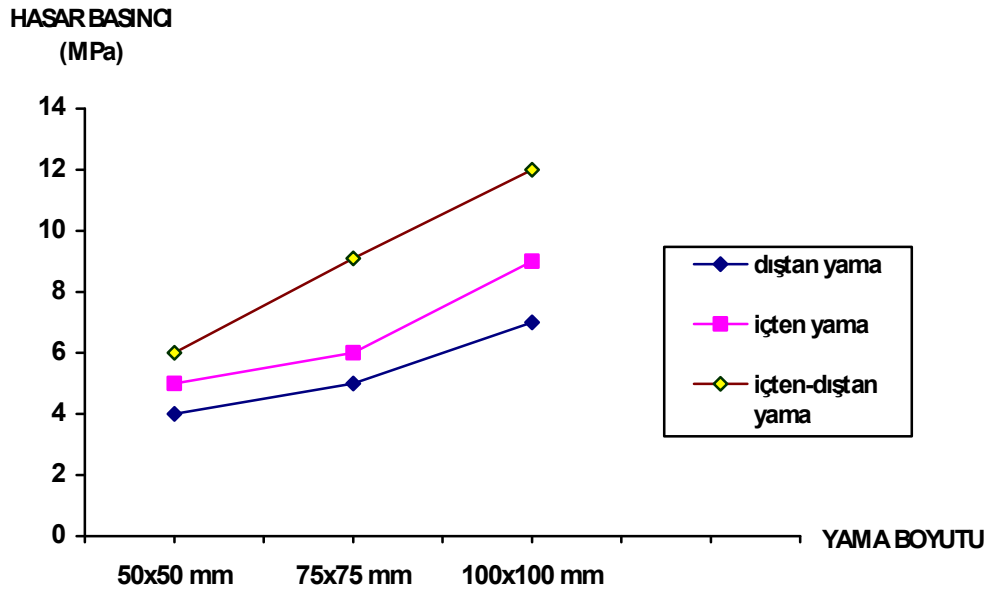
Şekil 6.6 Dıştan Kabuk Yama Yapılmış CTP Boru

6.2.3 İçten-Dıştan Kabuk Yama Yapılmış CTP Boruların İç Basınç Test Sonuçları

CTP kompozit boru yine üç farklı boyuttaki kabuk yamalar ile içten-dıştan olarak yamanmıştır. Diğer deneylerde de olduğu gibi aynı yamama metodu kullanılmıştır. 50x50 mm yama boyutlu boruda hasar oluşumu 6,5 MPa' da meydana gelmiştir. 75x75 mm yanma boyutlu boruda nihai hasar 9,5 MPa' basınçta hasar vermiştir. 100x100 mm yama boyutlu boru ise 12 MPa' basınçta hasar vermiştir. İçten ve dıştan yapılan yamadan her iki taraftan yapılan yama daha mukavemetli olmuştur. Hasar oluşumu içten ve dıştan yapılan yama ile benzerlik taşımaktadır. İçten –dıştan yama beklenildiği üzere tek taraflı yamalardan daha etkili olmuştur. İki yama arasında kalan kalınlık boyunca çatlak epoksi reçine ile doldurulmuş ve epoksi kor görevi üstlenmiştir.

6.2.4 Kabuk Yamanın Sonuçlarının Karşılaştırılması

Kabuk yama metodu uygulama olarak literatürde uygulanmamış bir methodur. Uygulama süresince yüzey hazırlama hataları ve yama malzemesinin yeterince esnek olmaması nedeniyle boruda meydana gelen esnemeyi yama malzemesi yeterince karşılayamamıştır. Basınç artışı sonunda yama borudan bir kabuk gibi ayrılmıştır. Kabuk yamanın iç basınç etkisi gözlenirken basınç etkisinin yama doğrultusunda saptanmıştır. İlk sızıntı vermesi yama boyu yönünde olduğu için yama boyutunun hesaplanmasının uygun olacağı düşünülmüştür. Yama genişliği etkisi yok denecek kadar azdır. Kabuk yama metodunda yama boyutu büyüdükçe yamanın basınç dayanımı artmıştır. Şekil 6.7 de farklı konumlu ve farklı boyutlu kabuk yama ile bu yamaların boruya vermiş olduğu basınç dayanımı görülmektedir.



Şekil 6.7 Yamanın Konumu ve Boyutuna Bağlı Basınç Dayanım Değerleri

Grafikten de görüldüğü gibi iç basınç dayanımı 100X100mm yama boyutunda her iki taraftan yama ile sağlanmıştır. Dıştan yama en zayıf yama modelini oluşturmuştur. İçten yama dıştan yamadan daha mukavemetli olmuştur. Bunun sebebi iç basınç etkisi ile yamanın boruya basınç yaparak sızıntıya bir miktarda engel olmasıdır. İçten yama daha etkili olmasına rağmen uygulanabilirliğinin zor olması

bilinmektedir. Çünkü çalışan borularda veya roketatar namlusunda içte işlem oldukça zordur. Ayrıca içten yapılan yama çalışma yerini olumsuz etkileyeceğinden tercih sebebi olmamalıdır. Dıştan yama uygulanabilirliği en kolay olan uygulama olmuştur.

6.3. Sargı Yama Yapılmış CTP Borunun İç Basınç Test Sonuçları

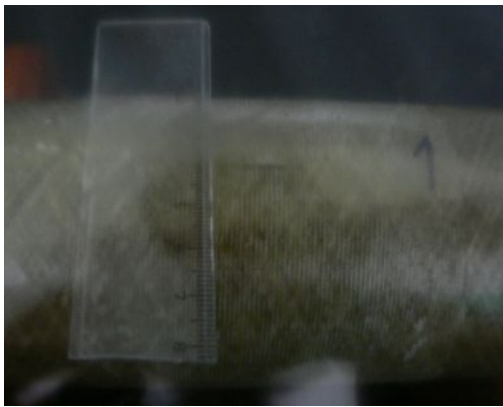
Kabuk yamanın istenen sonucu vermemesi ve yama boyutlarının araştırılması ile beraber yamanın sargı yama yapılarak daha iyi sonuçlar vereceği görülmüştür. Literatür araştırmasında gözlemlenmiş olan yama uygulamalarının sargı yama olarak uygulanmasıdır. Literatür araştırmalarında kompozit malzemelerde yama modeli sargı yama modelidir.

Sargı yama modeli deneyde iki türlü uygulanmıştır. İlki 100 mm genişliğinde prepreg malzemesinin 1 kattan 5 kata kadar sarılarak yama malzemesinin iç basınç dayanımı ölçülmüş kalınlık boyunca çatlakta, meydana gelmiş hasar ilerlemesi gözlenmiştir.. Her kat numune için üç deney yapılmıştır.

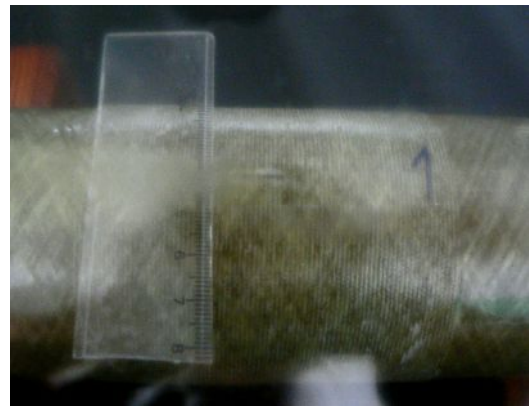
İkinci sargı yama modelinde 0°-90°açılı epoksi emdirilmiş 100 mm genişliğinde cam elyaf kumaş yama uygulanmıştır. Cam elyaf kumaş yamada 1 kattan 5 kata kadar uygulama yapılmıştır.

6.3.1. Prepreg İle Sargı Yama Yapılmış CTP Borunun İç Basınç Test Sonuçları

Prepreg sargı yamanın ilki tek kat olarak yapılmıştır. Şekil 6.8 de tek kat prepreg yama ile tamir edilmiş sarılmış numunenin resmi görülmektedir.



a) 1MPa Basınç Altında



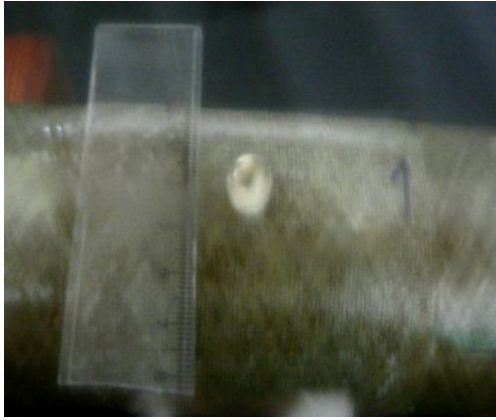
(b) 1,1 MPa Basınç Altında



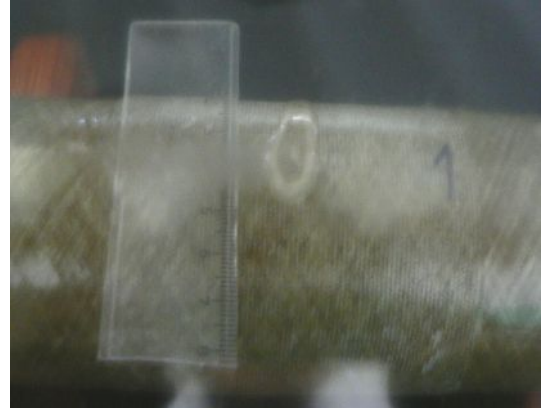
(c) 1,3 MPa Basınç Altında



(d) 1,5 MPa Basınç Altında



(e) 1,6 MPa Basınç Altında



(f) 1,7 MPa Basınç Altında



h) 1,9 MPa Basınç Altında Nihai Patlama

Şekil 6.8 Bir Kat Prepreg Yama İle Tamir Edilmiş Boru Numunesinin Artan İç Basınç Değerlerine Karşılık Gelen Hasar İlerlemesi

Şekil 6.8.a da görülen numuneye ilk olarak 0,5 MPa basınç verilmiştir. İlk 0,5 MPa basınçta kalınlık boyunca çatlak olan bölgede hafif bir beyazlaşma meydana gelmiştir. Beyazlaşma meydana gelmesinin nedeni iç basınç etkisiyle reçine malzemesi ve elyaf malzemesinin ayrışmalarının başlamasıdır. Yama tek katlı olması nedeni ile basınç değerleri 0,1 MPa aralıklarla artırılmıştır. Bir dakika beklendikten sonra basınç 1,1 MPa basınca çıkartılmıştır. Beyazlaşma daha da belirginleşmiş ve noktasal şekilde damlacık oluşumu görülmeye başlanmıştır. Damlacık oluşumu veya terleme denen olay reçinenin patlama öncesi kendi yapısında çatlakların oluşmaya başladığını göstermektedir. Terleme olayı patlamanın olacağı zayıf bölgede oluşmaktadır. 1,3 MPa basınç değerinde yamadan çok küçük sızıntı vermeye başlamıştır. 1,5 MPa, 1,6 MPa ve 1,7 MPa basınç değerlerinde sızıntı artışı gözlenmiş ve 1,9 MPa basınç altında nihai patlama olayı gerçekleşmiştir. Patlama jet sıvı şeklinde olmamış, sızıntı şeklinde olmuştur.

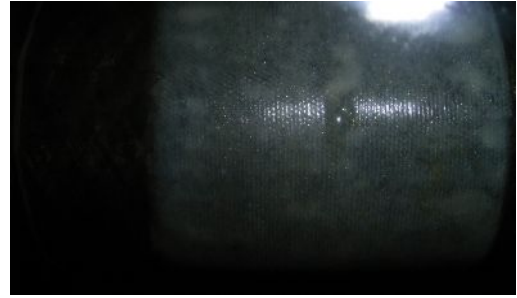
Tek katlı prepreg uygulaması çok fazla bir basınç değerine ulaşmadan nihai patlama meydana gelmiştir. Bu uygulamada cam elyaf çok az miktarda yük karşılamış ancak epoksi reçine çok zayıf mukavemete sahip olması nedeniyle akışkan zayıf noktayı çok çabuk bulmuş ve sızıntı vermiştir. Deneyleerde 1 kat yama her bir yama katının kaç MPa basınca dayanacağını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Deneyle sonrası yama kaldırılmış ve kalınlık boyunca çatlakta ilerleme gözlenmemiştir.

İki katlı prepreg yama ile tamir edilmiş borulara 1 MPa arayla ve 1 dakika bekleme süresi ile basınç uygulaması uygulanmıştır. İki kat prepreg uygulamasında 4 MPa basınçta prepregte beyazlaşmalar artmaya başlamıştır. Beyazlaşma oluşumu bu basınçta reçine ile elyaflar arasında iç basıncın etkisiyle ayılmaya başlamış ve gerilmeye başlayan cam elyaf prepreglerin tel tel olarak ayrışmasıdır. Beyazlaşmanın akabinde terleme olayı meydana gelmiştir. Terleme reçinenin kendi içinde çatlak oluşumunu göstermektedir. Giderek artan terleme daha sonra nihai patlamaya dönüşmektedir. 6 MPa basınç altında yama malzemesinden çıtırtı sesleri gelmeye başlamıştır. Bu çıtırtı sesleri cam elyafların iç basınç ile kopmalarını bize göstermektedir. 8 MPa basınçta sızıntı olmuş ve hemen akabinde nihai patlama meydana gelmiştir. Kat sayısının artması patlama basıncını hemen hemen dört kat artırmıştır. Bu da kat sayısının yama performansını artırdığı görülmüştür. Deneyle

sonrası yama kaldırılmış ve kalınlık boyunca çatlakta ilerleme gözlenmemiştir. Şekil 6.9a' da hasarsız 2 katlı prepreg yama görülmektedir. Şekil 6.9b' da görülmüş olduğu gibi beyazlaşma ve elyafların seçilebilirliği artmıştır. Şekil 6.9c' de görüldüğü gibi iki katlı prepreg yama ile tamir edilmiş boruda terleme olayı net bir şekilde görülmektedir.



a) 2 Katlı Prepreg Uygulaması



b) Beyazlaşma ve elyafların seçilmeye başlanması

c) Damlacık Oluşumu

Şekil 6.9 İki Kat Prepreg Yama İle Tamir Edilmiş Yapılan Boru Numunesinin Hasar Oluşum Süreci

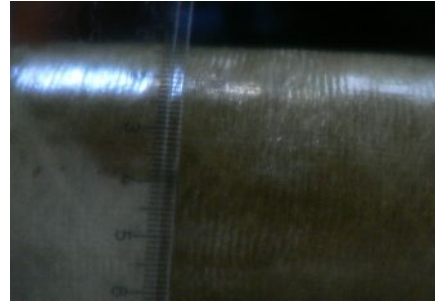
Üç katlı prepreg yama ile tamir edilmiş borulara yama 1 MPa basınç aralıklarıyla ve yine bir dakika beklemek suretiyle uygulanmıştır. Üç katlı yama uygulaması iki katlı prepreg uygulaması ile aynı şartlarda yapılmıştır. 3 katlı prepreg yama kalınlığı 0,6 mm kalınlığında yapılmıştır. Üç katlı prepreg yama 9 MPa basınçta nihai patlama vermiştir. Hasar oluşum sürecinde 6 MPa basınç yüklenmesi ile yamadan çıtırtı sesleri duyulmuştur. Çıtırtı sesleri elyaf kopma olayını göstermektedir. Beyazlaşma olayı 5 MPa basınçta gözlenmeye başlanmıştır. Bu da elyaf ayrılmasını anlatmaktadır. Terleme olayı da diğer katlarda olduğu gibi reçine

içinde meydana gelmiş çatlaklarını bize göstermektedir. Deney sonrası yama kaldırılmış ve kalınlık boyunca çatlakta ilerleme gözlenmemiştir.

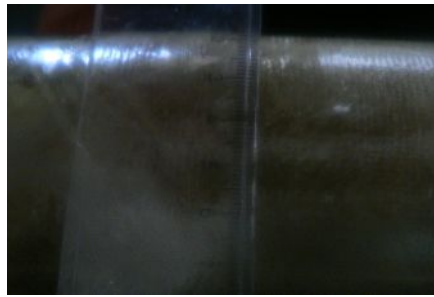
Dört katlı prepreg uygulaması diğer uygulamalar ile aynı şartlarda yapılmıştır. 4 kat prepreg kalınlığı 0,8 mm et kalınlığında uygulanmıştır. 7 MPa değerinde çıtırtı sesleri duyulmuş, 6 MPa değerinde beyazlaşmalar artmıştır. Nihai patlama hasarı 11MPa değerinde gerçekleşmiştir. 3 katlı uygulamada da olduğu gibi 6 MPa basınçta basınç kayıpları oluşmaya başlamıştır. Prepreg yamaların kat sayısının artmasıyla beraber rijitliği artmakta ve boru genişlemesi ile beraber tabaka ayrılmalarının daha da fazlaştığı görülmektedir. Çıtırtı ses duyulması, beyazlaşma görülmesi ve terleme olayı diğer katlarla benzerlik göstermektedir. Şekil 6.10 da dört kat prepreg yama ile tamir edilmiş CTP borunun hasar oluşum süreci verilmiştir. Şekil 6.10.a da henüz iç basınç uygulanmamıştır. Şekil 6.10.b de ise 4 MPa basınç uygulanmış ve beyazlaşmaların oluşumu görülmeye başlanmıştır. Şekil 6.10.c de 6 MPa basınç altında beyazlaşmaların daha net görüldüğü bir resim verilmiştir. Şekil 6.10. d 10 MPa basınç altında sızıntının ve elyaf kopmalarının meydana geldiği durum görülmektedir. Şekil 6.10. d ise 11 MPa basınç altında nihai patlamanın oluşumu verilmiştir.



a) Dört Katlı Prepreg



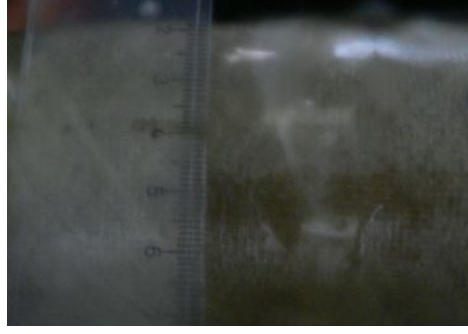
b) 4 MPa Basınçta Beyazlaşma Oluşumu



c) 6 MPa Basınçta Beyazlaşma artması



d) 10 MPa Basınçta Patlama Öncesi

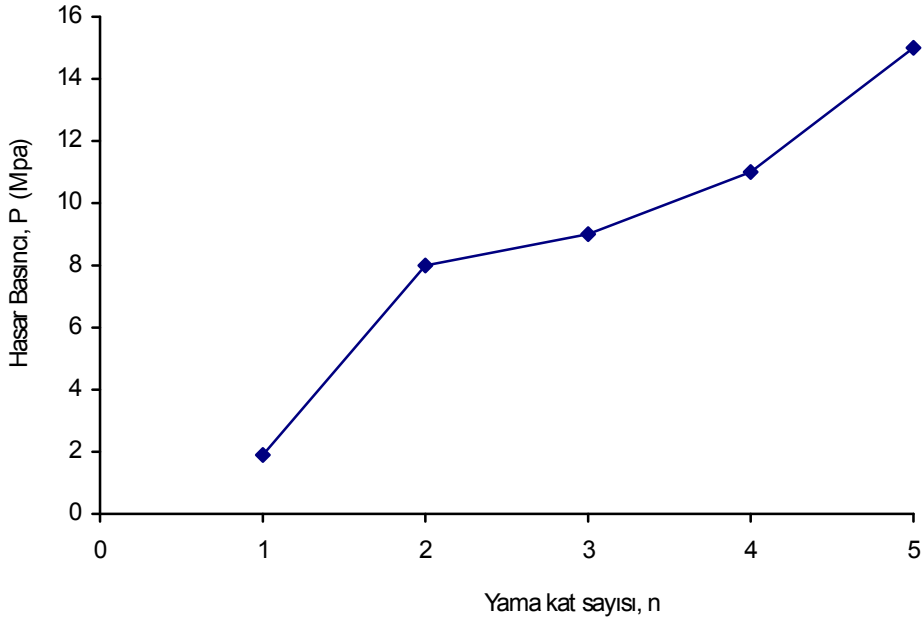


e) 11 MPa Nihai Patlama oluşu

Şekil 6.10. Dört Kat Prepreg Yama İle Tamir Edilmiş Yapılan Boru Numunesinin Hasar Oluşum Süreci

Beş katlı prepreg yama uygulaması 4MPa basınçta çıtırtı sesleri vermeye başlamıştır. 6 MPa basınçta beyazlaşmaların yoğunlaştığı görülmüştür. Kat sayısının artması boruyu saran prepregden dolayı borunun şekil değişimini engellemiştir. Bu nedenle diğer kat numunelere göre basınç kaybı daha yüksek basınç değerlerinde meydana gelmiştir. 15 MPa basınçta nihai patlama meydana gelmiştir. Bu değer kompozit malzemelerde çalışma basıncı için oldukça iyi bir değerdir. Deney sonrası yama kaldırılmış ve kalınlık boyunca çatlakta ilerleme gözlenmemiştir.

Şekil 6.11 da prepreg yama katsayısına bağlı olarak patlama hasarının meydana gelme değerleri görülmektedir.



Şekil 6.11. Prepreg Yamada Kat Sayısına Bağlı Patlama Basıncı Grafiği

Şekil 6.11 den anlaşılacağı üzere yama kat sayısının artması patlama basıncını artırmıştır. Tek kat yamada çok fazla sonuç edilememesine rağmen iki katlı prepreg yamada elde edilen sonuç oldukça iyidir. En yüksek patlama basıncına 5 katlı prepreg yamada elde edilmiştir.

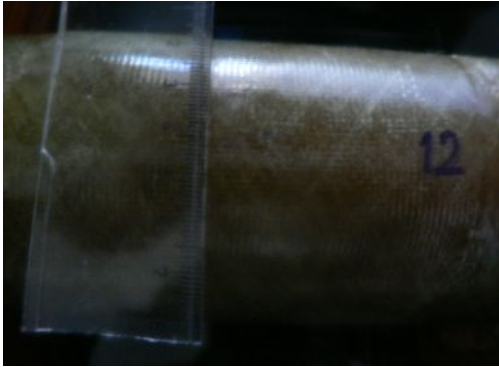
6.3.2. Cam Elyaf Kumaş İle Sargı Yama Yapılmış CTP Borunun İç Basınç Test Sonuçları

Tek kat cam elyaf kumaş yamaya 0,5 MPa basınç verilmiştir. İlk 0,5 MPa basınçta kalınlık boyunca çatlak olan bölgede beyazlaşma meydana gelmiştir. Yama tek katlı olması nedeni ile basınç değerleri 0,1 MPa aralıklarla artırılmıştır. Bir dakika beklendikten sonra basınç 1,1 MPa basınca çıkartılmıştır. Beyazlaşma daha da belirginleşmiş ve noktasal şekilde damlacık oluşumu görülmeye başlanmıştır. Beyazlaşmanın nedeni cam elyafların reçineden ve kendi lifli yapısından ayrılmaya başlamasıdır. Terleme olayı ise reçinenin kendi içerisinde iç basınç dolayısıyla

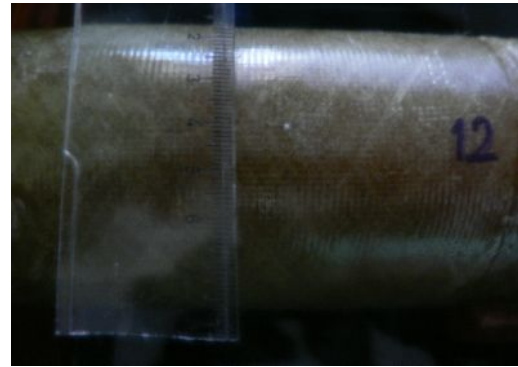
oluşan çatlaklardır. 1,4 MPa basınç değerinde yamadan çok küçük sızıntı vermeye başlamıştır. 2 MPa basınç altında nihai patlama olayı gerçekleşmiştir.

Tek katlı cam elyaf kumaş uygulaması çok fazla bir basınç değerine ulaşmadan nihai patlama meydana gelmiştir. Bu uygulamada cam elyaf çok az miktarda yük karşılamış ancak epoksi reçine çok zayıf mukavemete sahip olması nedeniyle akışkan zayıf noktayı çok çabuk bulmuş ve sızıntı vermiştir. Deneyleerde 1 kat yama her bir yama katının kaç MPa basınca dayanacağını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Deneyle sonrası yama kaldırılmış ve kalınlık boyunca çatlakta ilerleme gözlenmemiştir.

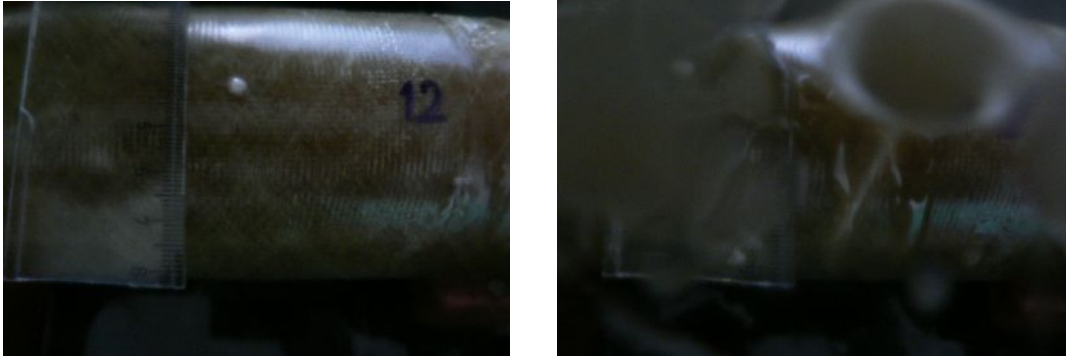
İki katlı cam elyaf kumaş yama ile tamir edilmiş borulara 1 MPa arayla ve 1 dakika bekleme süresi ile basınç uygulaması uygulanmıştır. İki kat cam elyaf kumaş uygulamasında 6 MPa basınçta beyazlaşmalar artmaya başlamış, çıtırtı sesleri duyulmaya başlanmıştır. Beyazlaşma elyaf ayrışmasını gösterirken, çıtırtı iç basınç ile elyafların gerilmeye başladığı ve kopmaya zorlandığını göstermektedir. 8,6 MPa basınçta sızıntı olmuş ve hemen akabinde nihai patlama meydana gelmiştir. Deneyle sonrası yama kaldırılmış ve kalınlık boyunca çatlakta ilerleme gözlenmemiştir. Şekil 6.12 de iki katlı cam elyaf kumaş yamanın iç basınç altında hasar oluşumu süreci verilmiştir.



a) Basınç Uygulanmamış Yama



b) 6 MPa Basınçta Beyazlaşma Oluşumu



c) 8 MPa Basınçta Beyazlaşma Oluşumu d) 8,6 MPa Basınçta Nihai Patlama

Şekil 6.12. İki Katlı Cam Elyaf Kumaş Yamada Hasar Oluşumu

Üç katlı cam elyaf kumaş yama ile tamir edilmiş borulara yama 1 MPa basınç aralıklarıyla ve yine bir dakika beklemek suretiyle uygulanmıştır. Üç katlı yama uygulaması iki katlı yama uygulaması ile aynı şartlarda yapılmıştır. Üç katlı cam elyaf yama 11 MPa basınçta nihai patlama vermiştir. 7 MPa basınç yüklenmesi esnasında yamadan çıtırtı sesleri duyulmuştur. Beyazlaşma olayı 6 MPa basınçta gözlenmeye başlanmıştır. Üç katta da beyazlaşma, terleme ve çıtırtı seslerinin sebebi aynıdır. Deney sonrası yama kaldırılmış ve kalınlık boyunca çatlakta ilerleme gözlenmemiştir.

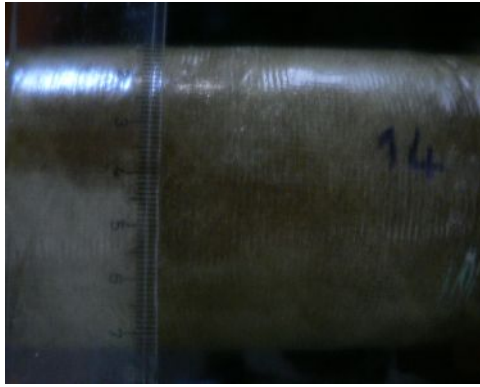
Dört katlı cam elyaf kumaş uygulaması diğer uygulamalar ile aynı şartlarda yapılmıştır. 7 MPa değerinde çıtırtı sesleri duyulmuş, 8 MPa değerinde beyazlaşmalar artmıştır. Nihai patlama hasarı 14 MPa değerinde gerçekleşmiştir. 3 katlı uygulamada da olduğu gibi 6 MPa basınçta basınç kayıpları oluşmaya başlamıştır. Cam elyaf kumaş yamaların kat sayısının artmasıyla beraber rijitliği artmakta ve boru genişlemesi ile beraber tabaka ayrılmalarının daha da fazlaştığı görülmektedir. Şekil 6.13 de dört katlı cam elyaf kumaş yamada meydana gelen hasar oluşumu verilmiştir.



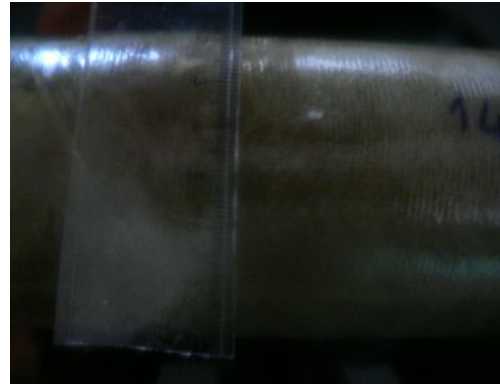
a) 4 Katlı Kumaş Yama Basınçsız



b) 7 MPa Basınçta Beyazlaşma



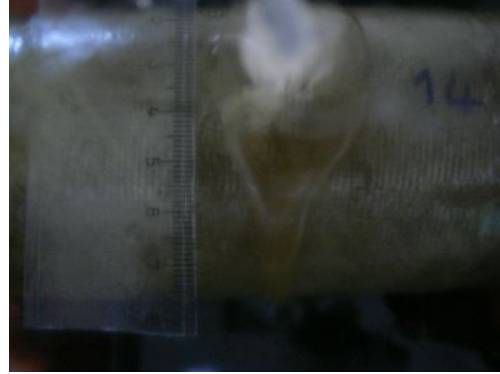
c) 8 MPa Basınçta Beyazlaşmaların artması



d) 9 MPa Basınçta Beyazlaşma Artması



e) 10 MPa Elyaf Kopmasının Başlaması



d) 11 MPa Basınçta Nihai Patlama

Şekil 6.13. Dört Katlı Cam Elyaf Kumaş Yamada Hasar Oluşumu

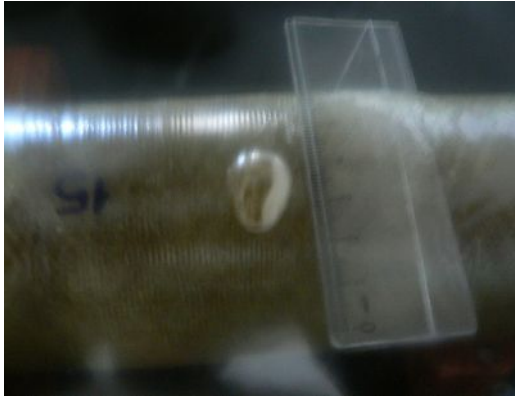
Beş katlı cam elyaf kumaş yama uygulaması 6 MPa basınçta çıtırtı sesleri vermeye başlamıştır. 9 MPa basınçta beyazlaşmaların yoğunlaştığı görülmüştür. meydana gelmiştir. 18 MPa basınçta nihai patlama meydana gelmiştir. Bu değer kompozit malzemelerde çalışma basıncı için oldukça iyi bir değerdir. Şekil 6.14 te beş katlı cam elyaf kumaş yamada meydana gelen hasar oluşumu verilmiştir.



a) 5 Katlı Cam Elyaf Kumaş

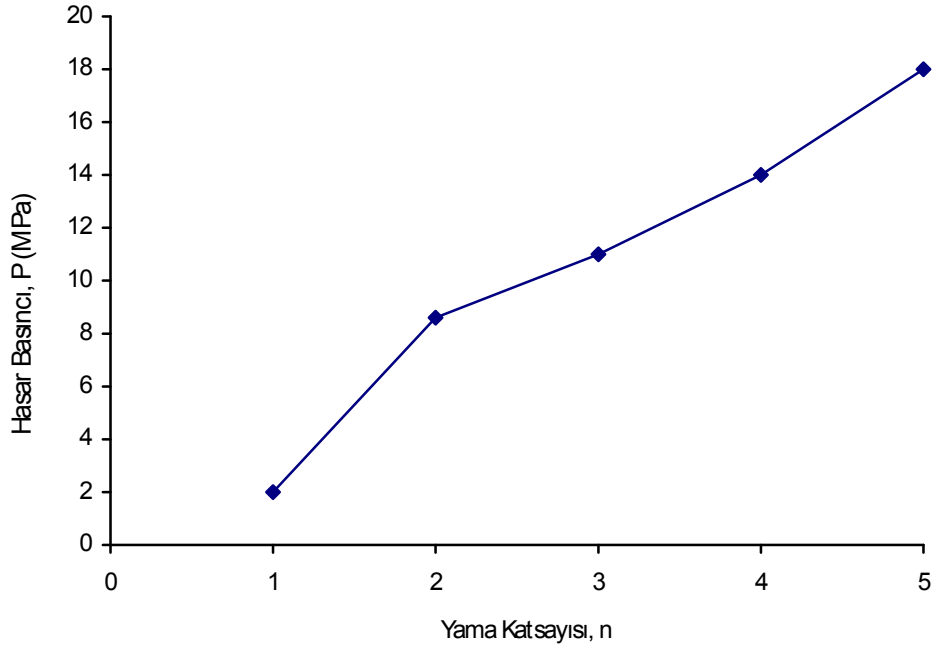


b) 6 MPa Çıtırtı Sesleri Oluşumu



c) 18 MPa Basınçta Nihai Patlama

Şekil 6.14. Beş Katlı Cam Elyaf Kumaş Yamada Hasar Oluşumu



Şekil 6.15. Cam Elyaf Kumaş Yamada Kat Sayısına Bağlı Patlama Basıncı Grafiği

Şekil 5.15 ten anlaşılacağı üzere yama kat sayısının artması patlama basıncını artırmıştır. Tek kat yamada çok fazla sonuç edilememesine rağmen iki katlı cam elyaf kumaş yamada elde edilen sonuç oldukça iyidir. En yüksek patlama basıncına 5 katlı cam elyaf kumaş yamada elde edilmiştir. Sargı yama uygulamasında en fazla statik iç basınç altında dayanım gösteren 18 MPa değerinde cam elyaf kumaş 5 katlı yamadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; kompozit yama ile onarılmış ($\pm 55^\circ$)₃ filaman sarım açılı hasarlı CTP boruların, serbest uçlu statik iç basınç deneyleri yapılarak hasar davranışı gözlenmiştir. Yama olarak; 50X50 mm, 75X75 mm ve 100X100mm boyutlarında kompozit kabuk yama ve 1 kattan 5 kata kadar cam elyaf dokuma kumaş ve cam elyaf prepreg kompozit sargı yama tekniği uygulanmıştır. Bu çalışmada, elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur;

1. Hasarsız $\pm 55^\circ$ sarım açılı CTP borunun serbest uçlu statik iç basınç deneyi sonucunda patlama basıncı 39,5 MPa olarak bulunmuştur. Hasar mekanizmasının oluşumu ve gelişimi; sırasıyla elyaf matriks ayrılması, matriks çatlaması, tabaka ayrılması ve elyaf kopması şeklinde gözlenmiştir.
2. İçten yapılan kabuk yamanın pratik açıdan uygulanabilirliğinin çok zor olmasına rağmen, dıştan yapılan kabuk yamaya göre yaklaşık %20 daha mukavim olduğu gözlenmiştir. İçten yapılan yamada boru içerisine yapıştırma zorluğu nedeniyle sağlıklı bir yapıştırma sağlanamamıştır. Elde edilen değerlerden
3. İçten kabuk yamada; yama boyutunun % 50 artışına karşılık yama mukavemetinde % 25 lik, yama boyutunun % 100 lük artışına karşılık ise yama mukavemetinde % 50 lik bir artış sağlanarak sırasıyla 6, 8 ve 9 MPa iç basınç değerlerine ulaşılmıştır.
4. Dıştan kabuk yamada; yama boyutunun % 50 artışına karşılık yama mukavemetinde % 25 lik, yama boyutunun % 100 lük artışına karşılık ise yama mukavemetinde % 75 lik bir artış sağlanarak sırasıyla 4, 5 ve 7 MPa iç basınç değerlerine ulaşılmıştır.
5. Hem içten hem dıştan kabuk yamada; yama boyutunun % 50 artışına karşılık yama mukavemetinde % 50 lik, yama boyutunun % 100 lük artışına karşılık ise yama mukavemetinde % 100 lük bir artış sağlanarak sırasıyla 6, 9 ve 12 MPa iç basınç değerlerine ulaşılmıştır.

6. Dıştan kabuk yamada hasar; kalınlık boyunca çatlaktan sızan akışkanın, kabuk yamaya uyguladığı iç basınç etkisiyle, kabuk yama ile boru yüzeyi arasında delaminasyonun başlaması, ilerlemesi ve çevresel yönde yamanın bittiği noktaya kadar ulaşması şeklinde olmuştur. Bu noktada öncelikle terleme, damlacık oluşumu, daha sonra sıvı jeti ve en sonunda kabuk yamanın fırlayarak boru yüzeyinden ayrılması gerçekleşmiştir.

7. Yapılan yama çeşitleri içerisinde en ideal sargı yama olduğu, sargı yama içerisinde de cam elyaf dokuma yamanın en yüksek mukavemeti verdiği tespit edilmiştir.

Sargı yama uygulaması imkanların kısıtlı olması nedeniyle 5 tabakaya kadar yapılabildiğinden, daha fazla kat sayısı diğer çalışmalarda yapılabilir. Uygun olan boru kalınlığına yakın yama kalınlığını sağlamak uygun olacaktır. Kabuk yama uygun bir uygulama modeli değildir.

8. KAYNAKLAR

- Akkus, N., Kawahara, N., 2000, Bending behaviours of thin composites pipes with reinforced nodes, *Mater. Sci. Res.Int*, 6:131-5
- Arıkan, H., 2002, Çelik Tel Takviyeli Polimer Kompozitlerin Kırılma Davranışı, Doktora Tezi, S.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- Bax, J., 1970, Deformation behaviour and failure of glass fibre reinforced resin material, *Plastic and Polymers*, 2: 27-30
- Cherry, B. W., and Harrison, N. L., 1971, The stress and fracture toughness of glass fiber reinforced plastics, *Applied Polymer Science*, 17: 73-94
- Devrajsinh, R., A., 1997, Development of a new fatigue damage growth model for polymer matrix composites, Ph.D. Thesis, University of Wayne State, USA
- Dieter, G.E., 1976, *Mechanical Metallurgy*, 2nd Ed., Mc Graw Hill, 403-447 Tokyo
- Eldeniz, İ., 1992, Yüzey Çatlaklı Kompozit Malzemelerde Yorulma Çatlak Büyümesi ve Tabaka Ayrılması, Yüksek Lisans Tezi, S.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- Ellyin, F., and Martens, M., 2000, Biaxial fatigue behaviour of a multidirectional filament-wound glass-fiber/epoxy pipe, *Composite Science and Technology*, 61: 491-502
- Farley, G. L., 1985, Effect of fiber and matrix maximum strain on the energy absorption of composite materials, *J. of Materials Science*, 20: 323-333
- Ferry, L., Perreux, D., Rousseau, J., and Richard, F., 1998, Interaction between plasticity and damage in the behaviour of $[+\Phi,-\Phi]_n$ fibre reinforced

composite pipes in biaxial loading (internal pressure and tension),
Composites Part B, 29B: 715-723

Gemi, L., 2003, Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Etkisi Altında Yorulma Davranışı, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya

Günaydın, B., 2003, Yüzey Çatlaklı Cam/Polyester Kompozit Malzemelerde Yorulma Çatlak İlerlemesi, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya

Harel, H., Marom, G., Fischer, S. and Roman, I., 1980, Effect of reinforcement geometry on stress intensity factor calibrations in composites, Composites, 24: 69-72

Hosseini-Toudeshky, H., Sadeghi, G., Daghyani, H.R., 2005, Experimental Fatigue Crack Growth and Crack-Front Shape Analysis of Asymmetric Repaired Aluminium Panels with Glass/Epoxy Composite Patches, Composite Structures, Vol. 71, pp. 401-406.

Hine, P. J., Brew, B., Duckett, R. A. And Ward, I. M., 1988, The fracture behaviour of carbon fibre reinforced polyetheretherketone, Composite Science and Technology, 33: 55-71

Hwang, W., Han, K.S., 1986, Fatigue of composites—fatigue modulus concept and life prediction, J. of Composite Materials, 20:154-65

Irwin, G.R., 1962, The crack extension force for a part through crack in a plate, ASME, J. of Applied Mechanics, 84: 651-654

Kaynak, C., ve Mat, O., 2001, Uniaxial fatigue behaviour of filament-wound glass-fiber/epoxy tubes, Composite Science and Technology, 61: 1833-1840

- Lubin, G., 1982, Handbook of Composites, Van Nastrand Reinhold Co
- Martens, M., and Ellyin, F., 2000, Biaxial monotonic behaviour of a multidirectional filament-wound glass-fiber/epoxy pipe, Composites Part A, 31: 1001-1014
- Martin, R. H. And Murri, G. B., 1990, Characterization of Mode I and Mode II delamination growth and thresholds in composites, Composite Materials Testing and Design, 11: 251-270
- Mieras, H. J. M. A., 1973, Irreversible creep of filament wound GRP pipes, Plastics and Polymers, 84-89
- Misag-39, 2001, Flaman sargı tekniği ile kompozit malzeme kullanılarak yüksek basınca dayanıklı optimum boru tasarımı, Tübitak, Ankara
- Pagano, N.J., Halpin, J.C., and Whitney, J.M., 1968, Tension buckling of anisotropic cylinder, J. of Composite Materials, 2: 154-167
- Pagano, N.J., Whitney, J.M., 1970, Geometric design of composite cylindrical characterisation specimens, , J. of Composite Materials, 4: 360-379
- Pegoretti, A., and Ricco, T., 2002, Crack growth in discontinuous glass fibre reinforced polypropylene under dynamic and static loading conditions, Composites Part A, 33: 1539-1547
- Perreux, D. and Joseph, E., 1996, The effect of frequency on the fatigue performance of filament wound pipes under biaxial loading: experimental results and damage model, Composite Science and Technology, 57: 353-364
- Peters, P. W. M., 1983, On the increasing fracture toughness at increasing notch length of 0/90 0/45/0 graphite/epoxy composites, , J. of Materials Science, 14: 365-369

- Philippidis, T. P., Anastasios, P., 2001, Complex stress state effect on fatigue life of GRP laminates. Part I, *J. of Fatigue*, 24: 813–823
- Poursartip, A. and Chinatombi, N., 1990, Fatigue growth deflections and crack opened displacements in cracked lap shear specimens, *Composite Materials Testing and Design*, 11: 301-323
- Rebierre, J. L., Maatallah, M. N., Gamby, D., 2001, Initiation and growth of longitudinal and transverse cracks in composite cross ply laminates, *Composites Structures*, 53: 173-187
- Richard, F., and Perreux, D., 2000, A reliability method for optimization of ϕ fiber reinforced composite pipes, *Reliability Engineering and System Safety*, 68: 53-59
- Shan, Y., Liao, K., 2002, Environmental fatigue behavior and life prediction of unidirectional glass–carbon/epoxy hybrid composites, *J. of Fatigue*, 24: 847–859
- Smerdov, A.A., 2000, A computational study in optimum formulations optimization problems on laminated cylindrical shells for buckling : I Shells under axial compression, *Composite Science and Technology*, 60: 2057-60
- Soutis, C., Duan, D-M., Goutas, P., 1999, Compressive Behaviour of CFRP Laminates Repaired with Adhesively Bonded External Patches, *Composite Structures*, Vol. 45, pp. 289-301.
- Smiley, A. J. and Pipes, R. B., 1987, Rate effects on Mode I interlaminar fracture toughness in composite materials, *J. of Composite Materials*, 21: 671-687

- Spencer, B. and Hull, D., 1978, Effect of winding angle and the failure of filament wound pipe, *Composites*, 9: 263-270
- Şahin, Y., 2000, *Kompozit Malzemelere Giriş*, Gazi Kitabevi, Ankara
- Tarakçıoğlu, N., 1992, *Yüzey Çatlaklı ve Çatlaksız Filaman Sarma Cam-Epoksi Borularda Sarım Açısının Malzeme Özelliklerine Etkisi*, Doktora Tezi, S.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- Tarakçıoğlu, N., Akdemir, A., Avcı, A., 2001, Strength of filament wound GRP pipes with surface crack, *Composites Part B*, 32: 131-138
- Tong, J., 2002, Characteristics of fatigue crack growth in GFRP laminates, *Int. J. of Fatigue*, 24: 291–297
- 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 Composite Materials for Offshore Operations CMOO-2*, University of Houston, Houston TX
- Wang, Q.Y., Sriraman, M.R., Kawagoishi, N., Chen, Q., 2006, Fatigue Crack Growth of Bonded Composite Repairs in Gigacycle Regime, *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, pp.1197-1201.
- Wang, Q.Y., Pidaparti, R.M., 2002, Static Characteristics and Fatigue Behaviour of Composite-Repaired Aluminum Plates, *Composite Structures*, Vol. 56, pp. 151-155.
- Vanpaeppegem, W., Degrieck, J., 2001, Fatigue degradation modelling of plane woven glass/epoxy composites, *Composites Part A*, 32: 1433-1441

Whitney, J. M. and Halpin, J. C., 1968, Analysis of laminated anisotropic tubes under combined loading, *J. of Composite Materials*, : 360-367

Wolodgo, J., 1999, Biaxial fatigue and leakage characteristics of fiber reinforced composite tubes, Ph.D. Thesis, University of Alberta

Xia, M., Takayanagi, H., Kemmochi, K., 2001, Analysis of multilayered filament wound composite pipes under internal pressure, *Composite Structures* 53: 483-491