KOMPOZİT YAMA İLE ONARILMIŞ
YÜZEY ÇENTİKLİ FİLAMAN SARIM BORULARDA
YORULMA DAVRANIŞLARI

Berrin GÜNAYDIN

DOKTORA TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ A.B.D.
KONYA, 2010

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOMPOZİT YAMA İLE ONARILMIŞ YÜZEY ÇENTİKLİ FİLAMAN SARIM BORULARDA YORULMA DAVRANIŞLARI

Berrin GÜNAYDIN

DOKTORA TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

KONYA, 2010

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOMPOZİT YAMA İLE ONARILMIŞ YÜZEY ÇENTİKLİ FİLAMAN SARIM BORULARDA YORULMA DAVRANIŞLARI

Berrin GÜNAYDIN

DOKTORA TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA, 2010

Bu tez 30 / 04 / 2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
oybirliği / ~~oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Yrd.Doç.Dr.Behçet DAĞHAN
(Danışman)

Prof.Dr.Necmettin TARAKÇIOĞLU
(Üye)

Prof.Dr.Ahmet AVCI
(Üye)

Prof.Dr.Ahmet AKDEMİR
(Üye)

Yrd.Doç.Dr.Ömer Sinan ŞAHİN
(Üye)

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KOMPOZİT YAMA İLE ONARILMIŞ YÜZEY ÇENTİKLİ FİLAMAN SARIM BORULARDA YORULMA DAVRANIŞLARI

Berrin GÜNAYDIN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Behcet DAĞHAN

2010, 104 sayfa

Petrol ve doğalgaz boru hatlarında kullanım sırasında korozyon ve mekanik yükleme gibi sebeplerle çeşitli hasarlar meydana gelir. Hasar onarılamayacak büyüklükte ise hasarlı elemanın yenisi ile değiştirilmesi gerekir. Hasar boyutu onarılabilecek kadar küçük ise onarım mümkün olur. Hasarlı boru hatlarının onarımı için civatalı kelepçe, kaynaklı kelepçe gibi pek çok onarım yöntemi kullanılmaktadır. Son yıllarda kompozit yamalar ile onarım yapılmaktadır. Kompozit yamalar geleneksel onarım yöntemlerine göre daha dayanıklı, daha hafif, korozyona karşı daha dirençli ve uygulaması daha kolaydır.

Bu çalışmada farklı kat sayılı kompozit yamalarla onarılmış, boyut oranları a/c=0.2 ve a/t=0.75 olan yüzey çentikli kompozit borular yorulma yüküne maruz bırakılmıştır ve yorulma davranışları araştırılmıştır. Farklı yama genişlikleri ve yama kat sayıları sonlu elemanlar metodu ile de analiz edilmiştir.

Yorulma deneyleri ASTM D-2992 standardına göre 25 çevrim/dak ve R=0.05 yük oranında yapılmıştır. Deneyler yapılırken iç basınç değeri çentiksiz borunun statik patlama basıncının %35, %40 ve %45'i kadar alınmıştır. Elde edilen sonuçlar grafikler, tablolar ve fotoğraflar ile verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit boru, kompozit yama, yüzey çentiği, yorulma, iç basınç.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

FATIGUE BEHAVIOR OF FILAMENT WOUND PIPES WITH SURFACE NOTCH REPAIRED BY COMPOSITE PATCHING

Berrin GÜNAYDIN

Selçuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Assist.Prof.Dr. Behcet DAĞHAN

2010, 104 page

Petroleum and gas pipelines have damaged during service because of several reasons such as corrosion, mechanical cyclic loading, etc.. If repairing of pipe is not possible because of wide damaged region then damaged region of pipe should be replaced with the new one. When damaged area is not wide then repairing of pipe is possible. Many repairing methods have been used to repair damaged pipelines such as welded sleeve, bolted sleeve, etc.. Recently pipelines have been repaired by using composite patches because of high strength, low weight, high resistance to corrosion and simple to apply compared traditional repairing methods.

In this study, composite pipes with a surface notch having a/c=0.2 a/t=0.75 ratios repaired by composite patches with different layer numbers were subjected to fatigue loading. Also pipes with different patch lengths and patch layer numbers have been analyzed by finite element method.

Experiments have been carried out in accordance with ASTM D-2992 at 25 cycle per minute and R=0.05 load ratio conditions. Fatigue tests have been performed at different three pressure levels which are 35%, 40% and 45% of pipe static ultimate pressure. Obtained results have been given in form of graphics, tables and photographs.

Key Words: Composite pipe, composite patch, surface notch, fatigue, internal pressure.

ÖNSÖZ

Bu tezi hazırlamamda yardımcı olan danışmanım Yrd.Doç.Dr. Behcet Dağhan'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Prof.Dr. Ahmet Avcı, Prof.Dr. Ahmet Akdemir, Doç.Dr. Mesut Uyaner, Yrd.Doç.Dr. Ahmet Samancı ve Öğr.Gör.Dr. Ahmet Can'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneyler için gerekli kompozit malzeme temini ve onarım işlemlerini sağlayan İZOREEL Ltd. Şti. ile deney cihazı ile ilgili her türlü teknik desteği sağlayan SİMYA HİDROLİK ve SAMUR ELEKTRİK'e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım boyunca bana yardımcı olan tüm öğrencilerime ve bana her zaman destek olan aileme teşekkür ederim.

Berrin GÜNAYDIN

İÇİNDEKİLER

ÖZET ……...…….i
ABSTRACT .……ii
ÖNSÖZ .…….iii
İÇİNDEKİLER ……iv
SEMBOLLER …..……vi

1. GİRİŞ ……..1

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI ……4

3. KOMPOZİT MALZEMELER
3.1. Giriş ……...10
3.2. Takviyeler ..……10
3.2.1. Cam fiberler ....……..12
3.3. Polimer Kompozitler .....……13
3.3.1. Termosetler ……..13
3.4. Kompozitlerin Üretimi ……...14
3.4.1. Filaman sarım yöntemi ..……..……14

4. KOMPOZİT YAMA İLE ONARIM
4.1. Giriş ……16
4.2. Kompozitlerde Hasar Mekanizması ……..……...17
4.3. Onarım Tipleri …….....19
4.3.1. Yamasız onarımlar ……20
4.3.2. Yamalı onarımlar ..……...20
4.4. Onarımı Etkileyen Faktörler …….……...24
4.4.1. Yama tasarımı ..……...24
4.4.1.1. Yama bindirme uzunluğu ……..…….28
4.4.1.2. Yama kalınlığı ..……..28

4.4.2. Yüzey hazırlama ……29
4.4.3. Yama malzemesinin seçimi ……...30
4.4.4. Yapıştırıcı seçimi ……..31
4.5. Onarılmış Boruya Etkiyen Gerilmeler ……..32
4.6. Yapıştırıcı Bağdaki Hasar Tipleri ……34

5. YORULMA
5.1.Yorulma Performansını Etkileyen Faktörler ……..36
5.2. Gerilme-Çevrim Sayısı Eğrisi ……..37
5.3. Yapıştırıcı ile Bağlanmış Birleşimlerde Yorulma ……40

6. SONLU ELEMANLARLA GERİLME ANALİZİ ……..……42

7. DENEYSEL ÇALIŞMA
7.1. Kompozit Boruların Üretimi ……...48
7.2. Yüzey Çentikli Boruların Onarımı ……50
7.3. Kompozit Yamanın Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ...……...51
7.4. Serbest Uçlu Statik İç Basınç Deneyleri ……54
7.5. Serbest Uçlu Yorulma İç Basınç Deneyleri ……56

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA
8.1. Kompozit Yamanın Mekanik Özellikleri ……58
8.2. Serbest Uçlu Statik İç Basınç Deney Sonuçları ……62
8.3. Yorulma İç Basınç Deney Sonuçları ……63
8.3.1. Çentiksiz boruların yorulması ……63
8.3.2. Yüzey çentikli onarılmamış boruların yorulması ……65
8.3.3. Yüzey çentikli onarılmış boruların yorulması ……67
8.4. Yüzey Çentikli Onarılmış Borularda Yorulma Hasar Davranışı ……..74

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ……....96

10. KAYNAKLAR ……98

SEMBOLLER

a : Çentik derinliği

$2c$: Çentik uzunluğu

t : Kalınlık

a/c : Çentik uzunluk oranı

a/t : Çentik derinlik oranı

L : Uzunluk

D : Dış çap

d : İç çap

r : Yarıçap

w_y : Yama genişliği

A : Hasar alanı

ρ : Yoğunluk

W : Ağırlık

V : Hacim oranı

f : Frekans

P : İç basınç

F : Kuvvet

σ : Normal gerilme

S : Maksimum gerilme (gerilme genliği)

N : Çevrim sayısı

$\Delta\sigma$: Gerilme aralığı

R : Gerilme oranı

τ : Kayma gerilmesi

E : Elastisite modülü

G : Kayma modülü

ε : Birim şekil değiştirme

ν : Poisson oranı

P/P_o : Boyutsuz hasar başlangıç basıncı

SR : Rijitlik oranı

TWSI : Tsai-Wu Strength Index

1. GİRİŞ

Yapısal elemanlarda üretim ya da servis sırasında meydana gelen hatalar mevcuttur. Hata büyüklüğü kritik seviyeye ulaştığında, elemanın dayanımında önemli ölçüde azalma meydana gelir. Böylece yapısal eleman görevini eskisi gibi yerine getiremez. Hasar boyutu onarılması mümkün olmayacak kadar büyük ise, hasarlı bölgenin tamamen çıkarılıp yerine yenisi ile değiştirilmesi gerekmektedir. Hasar bölgesinin onarılabileceği durumlarda ise hasar tipi ve büyüklüğü, hasarlı elemanın maruz kaldığı yükleme ve çevre şartları gibi pek çok faktör dikkate alınarak belirlenen onarım yöntemi ile hasar bölgesi onarılır. Onarım işlemi ile hasarlı elemanın orijinal dayanımına ulaşması ve eski fonksiyonlarını yerine getirmesi sağlanır.

Çeşitli etkenlerden dolayı yapısal elemanlar onarılmaya veya iyileştirilmeye ihtiyaç duyarlar. Bu etkenlerden çatlak ve korozyon gibi hasarlar onarım prosesini, tasarım ve konstrüksiyon hataları ile yapısal değişim ihtiyaçları ise iyileştirme proseslerini gerektirir. (Schubbe 1997). Çatlaklı elemanların onarılmasındaki amaç, çatlak ucundaki gerilmeleri azaltmak, yorulma mekanizmalarını değiştirmek ve çatlak ilerlemesini yavaşlatmaktır (Kennedy 1998). Yama ile onarımla ya da hasarlı bölge üzerine yapılan takviyeler ile yapısal elemanların ömrünün uzaması mümkün olur (Hosseini-Toudeshky ve ark. 2006).

İleri kompozit teknolojisi, uzay ve havacılık uygulamalarında hasarlı metalik elemanların takviyesi için kullanılmaktadır. Yapıştırıcı ile bağlanan yamalı onarımlar, onarımda kullanılan malzemeler ve yamanın onarılacak elemana bağlantı metodu açısından diğer geleneksel onarım yöntemlerine göre avantajlıdır (Renaud 2003).

Mekanik elemanlar ile bağlantısı yapılan yamalı onarımlarda ek hasarlar meydana geldiğinden, yapıştırarak yapılan yamalı onarımlar mekanik bağlantılı onarımlardan daha etkilidir. Ayrıca yapıştırmalı onarımlarda hasarlı bölge ile yama temas alanının daha büyük olması, hasarlı bölgeden yamaya aktarılacak yükün daha üniform ve daha etkili olmasını sağlar (Renaud 2003).

Yapıştırmalı onarımlarda yama malzemesi olarak kompozitler metalik malzemelere göre daha fazla tercih edilmektedir. Çünkü kompozitler metalik

malzemelere göre daha dayanıklıdır, rijittir, hafiftir, yorulma performansı, korozyon direnci daha yüksektir, onarılacak malzemeye birleştirilmesi daha kolaydır ve daha ucuzdur (Renaud 2003).

Yapısal elemanlardaki çatlakların kompozit yama ile onarılması uçak endüstrisinde önemli bir uygulamadır (Baker 1987). Ong ve ark. (1990) uçak yapılarındaki çatlakları karbon/epoksi ve boron/epoksi yama ile Ong ve Shen (1991) ise boron/epoksi yama ile onarmıştır.

Hasarlı uçak elemanlar için yama tasarımının basit bir şekilde yapılması mümkün değildir Yamaya transfer edilen yük ile çatlak ucundaki gerilmeyi belirleyen basit bir analiz mevcut olmadığından, sonlu elemanlar analizi gibi bir nümerik analize ihtiyaç duyulmuştur (Ong ve ark. 1990, Jones ve Callinan 1981). Bu analizler ile çatlak ucundaki gerilme, fiberlerin çatlak bölgesindeki gerilme konsantrasyonu ve yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmesi konsantrasyonu gibi büyüklüklerin belirlenmesi mümkün olmuştur (Roberts 1995).

Yama tasarımı için yapılan analitik çalışmalar, yama ile onarılmış hasarlı elemanın modellenmesindeki zorluklardan dolayı sınırlı miktarda olmuştur (Roberts 1995). Rose (1988) yama ile onarılmış çatlaklı elemanın analitik modelini geliştirmiştir. Baker (1988) ise yama tasarımı üzerine çalışmıştır.

Yapılan deneysel, analitik ve nümerik çalışmalar ile onarımın hasarlı elemanın ömrünü arttırmada etkili olduğu görülmüştür.

Fiber takviyeli kompozitlerin uzay, otomotiv, petrol ve doğalgaz endüstrisi gibi pek çok kullanım alanı vardır. Fiber takviyeli kompozitler son zamanlarda doğalgaz ve petrol boru hatlarının onarımı için de kullanılmaktadır. ABD'de korozyona uğramış veya hasarlanmış boru hatlarının onarımı için her yıl milyarlarca dolar harcanılmaktadır (Jacobson 2003). Borunun hasarlı kısmının çıkarılıp yerine yenisi ile değiştirilmesi sistemin devre dışı bırakılmasını gerektirmektedir, bu durum da mali kayba sebep olmaktadır (Goertzen ve Kessler 2007).

Yüksek basınçlı boru hatlarının onarımı için kaynaklı kelepçe, civatalı kelepçe, kaynaklı manşon ve kompozit sargı gibi pek çok onarım yöntemi kullanılmaktadır. Kompozit sargı ile onarım genellikle korozyona uğramış çelik borular için kullanılmaktadır ve 1990 yılından beri bu onarım yöntemi üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır (Wilson 2006).

Yapılan araştırmalar sonucunda kompozit yama ile yapılan onarımların, kaynaklı çelik kelepçeli onarımlardan %24, hasarlı çelik borunun yerine yenisi ile değiştirmeden ise %73 daha ucuz olduğu görülmüştür (Koch ve ark. 2001).

Kompozit yama ile yapılan onarımlar geleneksel kaynaklı onarımlara göre daha ucuzdur, onarım işlemi kısa sürede gerçekleşir ve bu esnada boru hattının akışının kesilmesi gerekmez, boru kesme ve kaynak gibi işlemlere de ihtiyaç duyulmaz (Duell ve ark. 2008).

Bu çalışmada kompozit boru yüzeyine boyut oranları a/c=0.2 ve a/t=0.75 olan çentikler açılmıştır. Yüzey çentik bölgesi düz dokuma ($0/90^o$) cam/epoksi kompozit yama ile onarılmıştır. Onarılan borular, çentiksiz borunun statik patlama basıncının %35, %40 ve %45'i kadar iç basınçla yorulmaya maruz bırakılmıştır. Farklı katlı yama ile yapılan onarımların boruların yorulma hasar davranışına etkileri incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile farklı katlı ve farklı genişlikli yamalı boruların gerilme analizi de yapılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Hasarlı elemanları onarmak hasarlı elemanın ömrünü ve dayanımını arttırmada etkili bir prosestir. Tabi ki onarımın etkinliği doğru prosesi uygulamaya bağlıdır. Onarımda kullandığımız onarım malzemesinin türü, bu malzemenin geometri ve boyutları ile malzemenin hasarlı elemana bağlanma metodu gibi pek çok faktörün uygun seçilmesi, daha başarılı bir onarımla sonuçlanmamızı sağlar. Bu yüzden farklı hasar tiplerine sahip farklı malzemelerin onarım işlemleri üzerine pek çok araştırma yapılmıştır.

Onarımla ilgili araştırmaların büyük çoğunluğu uçak elemanlarının hasarları dikkate alınarak alüminyum malzemeler üzerine olmuştur. Hava araçlarında dayanım ve düşük ağırlık önemli olduğu için, hasarlı alüminyum malzemelerin onarılmasında onarım malzemesi olarak kompozit yama kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak da daha çok karbon, boron ve cam fiber kullanılmıştır. Alüminyum malzemelerin kompozitle onarılması ile ilgili ilk çalışma Baker (1988) tarafından 1970'li yıllarda yapılmıştır. Bundan sonra farklı araştırmacılar tarafından günümüze kadar yapılan pek çok çalışma mevcuttur.

Hosseini-Toudeshky (2006), farklı kalınlıklardaki merkezi çatlaklı 2024-T3 alaşımlı alüminyum levhaları dört, sekiz ve on altı katlı cam/epoksi kompozit yama ile tek taraflı olarak onarmıştır. Yorulma testi sonucunda 2.29 mm kalınlıklı alüminyum levhanın ömrü dört kat yama ile %65-69, sekiz kat yama ile %85-91 ve on altı kat yama ile %218-236 oranında artmıştır. 6.35 mm kalınlıklı levhanın yorulma ömrü dört katlı yama ile %21-35 oranında artarken sekiz ve on altı katlı yama ile yapılan onarımlarda dört katlı onarıma göre önemli bir değişim görülmemiştir. Bu çalışma ile yorulma ömrünü arttırmada, ince levhaları onarmanın kalın levhaları onarmadan daha etkili olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Hosseini-Toudeshky ve Mohammadi (2007), merkezi çatlaklı 2024-T3 alüminyum levhaları tek taraflı olarak cam/epoksi, boron/epoksi ve grafit/epoksi kompozit yama ile onarmışlardır. Onarılmış levhaların üç boyutlu sonlu eleman analizini yaparak, gerilme ve şekil değiştirme dağılımlarını belirlemişlerdir.

Schubbe (1997), merkezi çatlaklı 2024-T3 alüminyum levhaların onarılmasını deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Tek yönlü boron/epoksi kompozit yama ile

tek taraflı onarım yapmıştır. Yama genişliği, yama uzunluğu ve yama/levha rijitlik oranı gibi farklı yama parametrelerinin yorulma çatlak ilerleme davranışı üzerine etkisini araştırmıştır. Analizler sonucunda onarılmamış ve onarılmış levhalarda, levha kalınlığı arttıkça çatlak ilerleme hızının arttığı, yama/levha rijitlik oranı arttıkça çatlak ilerleme hızının azaldığı ve çatlak ilerleme hızına yama genişliği etkisinin az olduğu görülmüştür.

Hosseini-Toudeshky ve ark. (2005), tek tarafı cam/epoksi kompozit yama ile onarılmış merkezi çatlaklı alüminyum levhaların yorulma çatlak ilerleme davranışını deneysel incelemişlerdir. Farklı levha ve yama kalınlıkları için onarılmış levhaların çatlak ilerleme davranışı araştırılmıştır. İnce levhaların ömrü, on altı kat yama ile onarılması durumunda %236 oranında artarken, kalın levhaların ömrü dört kat yama ile %21-35 oranında artmıştır. Sekiz ve on altı katlı yamanın ise hasarlı levhanın ömrünün uzamasına önemli bir etkisi olmamıştır. Bu sonuçlara göre ömrün uzaması açısından ince levhaların onarılmasının kalın levhalara göre daha fazla etkili olduğu görülmüştür.

Rao ve ark. (1999), cam/epoksi kompozit yama kullanarak kenar çatlaklı alüminyum levhaları onarmışlardır. Onarılmış levhaların kalıcı dayanımındaki azalımı ve çatlak ilerleme ömrünü yorulma deneyi ile belirlemişlerdir. Deneyde 14000 çevrimden sonra yamanın dayanımının azalması sonucu, onarılmış levhalar yamadan hasarlanmamıştır. Yama levhadan ayrılmış ve levha yırtılmıştır.

Lee ve Lee (2004), grafit/epoksi kompozit yama ile onarılmış çatlaklı alüminyum levhaların yorulma çatlak ilerleme davranışını sonlu eleman analizi ile incelemişlerdir. Çatlak ucu gelişimi ve yorulma ömrünün belirlenmesinde analitik ve deneysel sonuçlar uyumlu çıkmıştır. Böylece tek taraflı onarımlar için çatlak ucu gelişimi ve yorulma ömrünün, sonlu eleman analizi ile belirlenebileceği sonucuna varılmıştır.

Chung ve Yang (2003), tek kenar çatlaklı 6061-T6 alaşımlı alüminyum levhaları tek taraflı olarak fiber takviyeli kompozit yama ile onarmışlardır. Dört farklı genişlikteki yama ile onarılmış levhaların ve yamasız levhanın yorulma testleri yapılmıştır. Sonlu eleman yöntemi ile gerilme şiddet faktörleri hesaplanmıştır. Bu analiz ile maksimum gerilmenin yamasız, minimum gerilmenin ise yamalı bölgede olduğu görülmüştür. Deney sonucunda ise, yamalı levhanın ömrünün yamasız

levhadan 4-6 kat fazla olduğu ve yama uzunluğu çatlak uzunluğunun 1.5 katı olduğunda en uzun yorulma ömrünün elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Wang ve Pidaparti (2002), tek kenar çatlaklı 7075-T6 alüminyum levhaları tek taraflı olarak bir, iki ve dört katlı boron/epoksi prepreg ile onarmışlardır. Hasarsız ve çatlaklı levhalar ile yama ile onarılmış levhaların statik çekme ve yorulma deneyleri yapılmıştır. Deneyde bir ve iki katlı yamanın çatlaklı levhanın dayanımını az oranda arttırdığı, hasar ilerlemesini önlemede ve yorulma ömrünü arttırmada dört katlı yamanın en etkili olduğu görülmüştür.

Ouinas ve ark. (2007), yarı dairesel çentikli alüminyum levhaları alüminyum, grafit ve boron/epoksi yama ile tek ve çift taraflı olarak onarmışlardır. Yama kalınlığının, yama malzemesinin, yapıştırıcı kalınlığının ve yapıştırıcı kayma modülünün gerilme şiddet faktörü üzerine etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Yamanın çatlak ilerlemesini yavaşlatmada etkili olduğu görülmüştür. Alüminyum yama ile yapılan onarımda gerilme şiddetindeki azalım %40 iken grafit yamada %46 ve boron yamada %52 oranında olmuştur. Yama kalınlığının yaklaşık %55 artması ile çatlak ucundaki gerilme şiddeti bu oranda azalmıştır.

Kumar ve Hakeem (2000), merkezi çatlaklı alaşımlı alüminyum levhaları farklı tasarım parametrelerine sahip karbon/epoksi yamalar ile onarmışlardır. Kare, dikdörtgen, daire, eliptik ve yamuk şekilli yamaların ve farklı yama kalınlıklarının gerilme şiddet faktörü üzerine etkisi sonlu elemanlar ile analiz edilmiştir. Analiz ile gerilme şiddet faktörünü azaltmada, yama kalınlığını arttırmanın yama yüzey alanını arttırmadan daha etkili olduğu görülmüştür. Optimum yama şekli sırasıyla yamuk, dikdörtgen ve eliptik olarak belirlenmiştir.

Wang ve ark. (2006), tek kenar çatlaklı 6061 ve 7075 alaşımlı alüminyum levhaları tek taraflı olarak onarmışlardır. Onarımda bir, iki ve dört katlı boron/epoksi kompozit yama kullanılmıştır. Yamasız ve yamalı levhaların yorulma testleri yapılmıştır. Deney sonucu yamanın çatlak ilerlemesini geciktirdiği ve yorulma ömrünü arttırdığı görülmüştür. Ayrıca yama ile onarımın, 6061 alaşımlı alüminyum levhada daha etkili sonuçlar verdiği görülmüştür.

Çatlaklı alüminyum levhaların onarımı üzerine yapılan çalışmalar analiz edildiğinde, kompozit yama ile yapılan onarımın çatlaklı alüminyum levhaların

ömrünü arttırmada etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Alüminyum dışında çelik ve kompozit levhaların yama ile onarımı da incelenmiştir.

Alawi ve Saleh (1992), çatlaklı çelik levhayı çelik yama ile onarmışlardır. Yamalı durumda, çatlağın ilerleme hızının azaldığını gözlemişlerdir.

Kennedy (1998), kalınlık boyunca çatlaklı çelik levhanın kompozit yama ile onarımının etkilerini araştırmak için deneysel ve nümerik analiz yapmıştır. Yama uzunluğu ve genişliği, yama rijitliği, yama kenarlarının konikleştirilmesi ve yama geometrik şeklini tasarım parametreleri olarak almıştır. Tek taraflı onarım ile yamalı yüzeyde çatlak ucu şekil değişimlerinin azaldığı ve yamasız yüzeyde bir miktar arttığı görülmüştür. Yama kenarlarını konikleştirmenin yama kenarındaki gerilmeleri önemli ölçüde azalttığı, düşük rijitlikli yamanın yama kenarındaki gerilmeleri, yüksek rijitlikli yamanın ise çatlak ucundaki gerilmeleri azalttığı görülmüştür.

Soutis ve ark. (1999), kompozit yama ile onarılmış karbon/epoksi levhaların basma yükü altındaki hasar davranışını incelemişlerdir. 10 mm çapındaki delikli levhalar iki tarafından karbon/epoksi prepreg dairesel yamalar ile onarılmıştır. Hasar mekanizması X-ışını radyografi ve tarayıcı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Deney boyunca yapıştırılan-yapıştırıcı malzemelerin ara yüzey hasarı, matriks çatlakları, tabaka ayrılması ve 0^{o}'deki fiberlerin burkulması şeklinde hasarlar gözlenmiştir. Onarılmış bölgedeki gerilme dağılımı üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. 10 mm çaplı deliğin, levhanın dayanımını yaklaşık %50 oranda azalttığı ve yapılan onarım ile hasarsız levhanın dayanımının yaklaşık %80'nine ulaşıldığı görülmüştür.

Liu ve Wang (2007), kompozit yama ile onarılmış delikli kompozit levhaların çekme davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı onarım parametrelerinin dayanım ve hasar mekanizmasına olan etkilerini araştırmak için deneysel ve nümerik çalışma yapılmıştır. Çekme yükü ile üç tip son hasar meydana gelmiştir. Farklı yamalar ile onarılan levhalar aynı dayanıma sahip olmalarına rağmen hasar mekanizmaları ve son hasarları farklı olmuştur.

Reis ve ark. (2005), cam fiber takviyeli polipropilen tek bindirmeli birleşim numunelerinin çekme yükü etkisindeki davranışını incelemişlerdir.15, 30, 45 ve 60 mm olmak üzere farklı yama bindirme uzunluklarının etkisi incelenmiştir. 30 mm yama bindirme uzunluklu onarımın en yüksek rijitliğe ve kayma dayanımına sahip

olduğu görülmüştür. Yama bindirme uzunluğunun 30 mm'den 60 mm'ye çıkarılması durumunda, hasardaki şekil değişimi çok değişmemiş ancak kayma dayanımı %41 oranında azalmıştır. Hasar yapıştırıcı-yapıştırılan malzemelerin ara yüzeyine yakın bölgelerde meydana gelmiştir.

Hasarlı basınçlı kap ve boruların onarımında da genellikle kompozit yama ile onarım tercih edilmiştir.

Roberts (1995), çatlaklı çelik basınçlı kabın karbon fiber kompozit yama ile onarılmasını deneysel olarak incelemiştir. Onarımın etkisini ölçmek için standart çekme numuneleri kullanmıştır. Çatlaklı çekme numuneleri kompozit yama ile onarıldıktan sonra çevrimsel yüke maruz bırakılmıştır. Kompozit yama ile onarılmış çatlaklı çelik borulara statik ve çevrimsel yük uygulanarak hasar davranışı incelenmiştir. Onarımın çatlaklı çelik numunelerde çatlak ilerlemesini geciktirdiği ve numunelerin ömrününü arttırdığı görülmüştür.

Hu ve ark. (1990), çatlaklı çelik basınçlı kabı çelik yama ile epoksi yapıştırıcı kullanarak onarmıştır.

Wilson (2006), hasarlı çelik boruyu karbon/epoksi sargı ile onarmıştır. Karbon/epoksi yama ile onarılmış boruların, onarılmamış borulardan daha yüksek statik basınçlara dayandığı ve daha iyi yorulma karakteristikleri sergilediği görülmüştür. Kompozit sargı ile boru ara yüzeyinin şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı belirlenmiştir.

Goertzen ve Kessler (2007), boru onarımında kullandıkları karbon/epoksi yama malzemesinin mekanik ve termal özelliklerini belirlemek için dinamik ve mekanik analiz yapmışlardır. Bunun için üç nokta eğilme testi uygulanmıştır. Camlaşma sıcaklığı üzerine ısıtma hızı, frekans ve ölçüm metotlarının etkileri incelenmiştir.

Duell ve ark. (2008), çelik boruları takviye etmek ve dış yüzey korozyonunu durdurmak için onarım yapmışlardır. Onarım malzemesi olarak karbon/epoksi kompozit kullanılmıştır. Üç boyutlu sonlu elemanlar metodu ile farklı geometrilere sahip hasarlı boruların gerilme analizi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her durum için maksimum gerilmenin hasar bölgesinin merkezinde olduğu görülmüştür.

Kompozit yamalar yalnızca takviye ve onarım amaçlı değil aynı zamanda kompozit boruların uç uca birleştirilmesinde de kullanılmıştır.

Pang ve ark. (2004), iki 54^o sarım açılı cam/epoksi kompozit boruyu fiber takviyeli kompozit malzeme ile sararak uç uca birleştirmişlerdir. Birleştirmede epoksi vinil ester ve UV ışınla kürlenen vinil ester olmak üzere iki farklı reçine kullanılmıştır. Uç uca birleştirilen kompozit borular reçine türüne göre ortam sıcaklığı ve güneş ışığı ile kürlenmiştir. Birleştirilmiş boruların statik iç basınç ve dört noktadan eğilme testleri yapılmıştır. Eğilme testi ile güneş ışığı ile kürlenen boruların ortam sıcaklığıyla kürlenen borularla benzer eğilme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. İç basınç deneyinde ise güneş ışığı ile kürlenen boruların iç basınç dayanımlarının, ortam sıcaklığı ile kürlenenlere oranla daha az olduğu görülmüştür. Deney sonuçları sonlu elemanlar analizi ile mukayese edilmiştir. Bu araştırmadan güneş ışığı ile kürlenen boruların sıvı ve gaz taşımacılığı için uygun olmadığı sonucu çıkarılmıştır.

Peck ve ark. 2007, iki kompozit boruyu farklı kalınlıklardaki cam kumaş ve farklı genişliklerdeki kırpılmış cam fiber ile UV ışınla kürlenen vinil ester reçine kullanarak uç uca birleştirmişlerdir. Birleştirilen borular UV lambalarla kür edilmiştir. Boruların mekanik özellikleri statik iç basınç ve dört noktadan eğilme testleri ile belirlenmiştir. Deney sonucunda üç ve beş katlı cam kumaşla birleştirilen boruların sekiz katlı cam kumaşla birleştirilenlerden daha yüksek patlama basıncına sahip olduğu görülmüştür. Çünkü sekiz katlıda yeterli kürleme yapılamamıştır. Birleşimin eğilme dayanımını ve rijitliğini belirlemek için ise eğilme testi yapılmıştır.

Li ve ark. (2003), 54^o sarım açılı cam/epoksi kompozit boruları dört farklı yapıştırıcı ve bir çapraz katlı cam prepreg kullanarak uç uca birleştirmişlerdir. Birleşim metodunun etkinliğini belirlemek için statik iç basınç deneyleri ile sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. İç basınç deneyi sonucunda birleştirme malzemesi prepregin kat sayısının artması ile patlama basıncının arttığı görülmüştür.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Giriş

Kompozitlerin ana bileşenleri takviyeler ve matrikstir. Daha dayanıklı ve rijit olan takviyeler, daha az dayanıklı ve daha az rijit olan matriks içerisinde dağılırlar. Takviyeler, karbon/epoksi kompozitte olduğu gibi zayıf matriks içerisinde yer alırlarsa, hemen hemen tüm yükü taşırlar. Bu durumda kompozitlerin dayanım ve rijitliği takviyelerin dayanım ve rijitliği ile kontrol edilir. SiC/titanyum kompozitte olduğu gibi takviye ve matriksin dayanım ve rijitliğinde çok fark olmadığı zaman ise matrikste yükü taşır. Ancak matriksin esas görevi takviyeler arası yük transferini sağlamak ve takviyeleri bir arada tutmaktır.

Kompozitlerin sınıflandırılmasında kompoziti meydana getiren bileşenlerin biçimleri dikkate alınır. Takviyelerin fiber ve partikül olmak üzere iki çeşidi vardır. Takviye elemanına göre kompozitler, fiber takviyeli kompozitler ve partikül takviyeli kompozitler şeklinde sınıflandırılabilir. Matrikslerin ise polimer, metal ve seramik olmak üzere üç çeşidi vardır. Matriks çeşidine göre ise kompozitler polimer matriks kompozitler, metal matriks kompozitler ve seramik matriks kompozitler şeklinde gruplandırılabilir. Kompozitlerin bir diğer önemli çeşidi ise tabakalı kompozitlerdir. Bir tabaka, her katta aynı ya da farklı malzemenin olabileceği iki veya daha fazla kattan meydana gelir (Sinha 2006).

3.2. Takviyeler

Fiberler kompozitlerin yapımında kullanılan takviye malzemeleridir. Bir fiber *l/d* oranı (fiber uzunluğu/fiber çapı) 10/1'e eşit malzeme olarak tanımlanır. Fiber kesitinin dairesel olması durumunda *d* çaptır ve 254 μm'den daha az olduğu kabul edilir. Kompozitlerde çapı 5 μm'den 140 μm'ye kadar değişen fiberler kullanılmaktadır.

Bir fiberin kesiti cam, boron ve kevlar fiberlerde olduğu gibi dairesel olabileceği gibi, viskerlerdeki gibi düzgün prizmatik veya PAN, rayon esaslı karbon fiberlerdeki gibi gelişigüzel olabilir.

Fiberler ya cam gibi amorf ya karbon, boron ve alümina gibi çok kristalli ya da silikon karbid, alümina, berilyum ve diğer viskerler gibi tek kristalli olabilir. Elemanda mevcut olabilecek hata, fiber çapından çok daha küçük olduğu için hatanın kritikliği azalır ve çekme dayanımı artar. Bundan dolayı sıradan bir camın çekme dayanımı 100-200 MPa iken, S-camı fiberinki 5000 MPa'dır. Fiber yönü boyunca kristallerin konumu da dayanım özellikleri üzerine etkiye sahiptir. Tek kristalli viskerler çok kristalli fiberlere göre kristal hatalarına eğilimli olmadığından yüksek dayanım ve rijitlik özelliklerine sahiptir. Çizelge 3.1'de çeşitli fiberlerin mekanik özellikleri verilmiştir.

Kompozit malzemelerde inorganik ve organik fiberler kullanılır. Cam, boron, karbon, silikon karbid, silika ve alümina gibi fiberler inorganik fiberlerdir. En bilinen organik fiber çeşidi aramid fiberlerdir. Polietilen fiberler ise düşük yoğunluğa ve mükemmel darbe direncine sahip organik fiberlerdir. İnorganik fiberler dayanıklı, rijit, ısıl olarak kararlı, nemden etkilenmeyen, yorulma direnci iyi olan ve düşük enerji emme özelliklerine sahiptir. Organik fiberler ise daha ucuz, daha hafif ve daha esnek olup yüksek dayanım ve darbe direnç özellikleri gösterirler (Sinha 2006).

Çizelge 3.1. Çeşitli fiberlerin mekanik özellikleri (Sinha 2006)

Fiber malzemesi	Yoğunluk (kg/m^3)	Çekme dayanımı (MPa)	Çekme modülü (GPa)	Çap (μm)
Cam	2550	3450-5000	69-84	7-14
Boron	2200-2700	2750-3600	400	50-200
Karbon	1500-2000	2000-5600	180-500	6-8
Kevlar	1390	2750-3000	80-130	10-12
Polietilen	970	2590	117	38
Silika (SiO_2)	2200	5800	72	35
Boron karbid (B_4C)	2350	2690	425	102
Boron nitrit	1910	1380	90	6.9
Silikon karbid (SiC)	2800	4500	480	10-12
Alümina (Al_2O_3)	3150	2070	210	17
Alümina FP	3710	1380	345	15-25
Çelik	7800	4140	210	127
Tungsten	19300	3170	390	361
Berilyum	1830	1300	240	127
Molibden	1020	660	320	127

3.2.1. Cam fiberler

Cam fiberleri elde etmede, A-camı (yüksek alkali), C-camı (kimyasal), D-camı (düşük dielektrik sabiti), E-camı (elektriksel) ve S-camı (yüksek dayanım) olmak üzere beş cam tipi kullanılır.

E-camı bir düşük alkali, alüminyum borosilikat camdır ve alümina, borik asit, kalsiyum karbonat ve magnezyum oksitin karışımıdır. Cam fiberin kesiti dairesel olup çapı genellikle 7-14 μm aralığındadır. Bir cam fiber izotropik davranış gösterir. Cam fiberler ucuzdur, manyetik değildir, X-ışınını geçirir, neme ve sıcaklığa duyarsızdır, yüksek spesifik dayanıma sahiptir (Sinha 2006).

3.3. Polimer Kompozitler

Polimerler, plastikler veya reçineler olarak bilinirler. Metal ve seramik matriks malzemelerine göre daha çok kullanılır. Hemen hemen tüm takviyeler, polimer kompozitleri oluşturmak için polimerler ile kullanılabilirler. Polimerlerin yoğunlukları çok düşüktür, işlenmeleri kolaydır, işleme ve kür sıcaklıkları düşük aralıktadır ve bazen ortam sıcaklığı bile yeterli olur. Takviyeli plastikleri oluşturmada termoplastikler ve termosetler kullanılır. Epoksi, fenolik, polyester, silikon, poliamid v.s. termoset polimerler iken polietilen, polistiren, poliamidler, naylon, polikarbonatlar, polisülfonlar v.s. ise termoplastiklerdir (Sinha 2006).

3.3.1. Termosetler

Termoset polimerler, düşük moleküler ağırlıklı moleküllerden oluşur. Termoset reçinedeki polimerizasyon prosesi geri dönüşsüzdür. Kür yapıldığı zaman yumuşamazlar. Ancak bunlar ilave ısıtma ile yumuşamadan önce ayrışırlar. Yüksek sıcaklıkta kovalent bağlar koparak polimerin ayrışmasına sebep olur.

En çok kullanılan termosetler epoksi, polyester ve fenolik reçinelerdir. Polyester reçineler farklı mühendislik malzemeleri ve kompozit uygulamalarında kullanılırlar. Epoksi reçineler ise daha dayanıklı ve daha rijit olduğu için kompozit yapılar ve yapıştırıcılarda kullanılır. Epoksi reçineler genellikle iyi termomekanik, elektriksel ve kimyasal direnç özelliklerine sahiptir (Sinha 2006).

Çizelge 3.2.'de bazı termoset reçinelerin tipik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. Bazı termoset reçinelerin tipik özellikleri (Sinha 2006)

	Epoksiler	Polyesterler	Fenolikler	Poliamidler
Yoğunluk (kg/m^3)	1100-1400	1200	1200-1300	1400
Çekme dayanımı (MPa)	35-100	50-60	50-60	100-130
Çekme modülü (GPa)	1.5-3.5	2-3	5-11	3-4
Poisson oranı	0.35	0.35	0.35	0.35
Termal genleşme katsayısı $x10^{-6}$ (m/mK)	50-70	40-60	40-80	30-40
Çalışma sıcaklığı (K)	300-370	330-350	440-470	550-750

3.4. Kompozitlerin Üretimi

Bir kompozit parçanın üretim yöntemi kullanılacak matriks ve takviyelerin özelliklerine, ürünlerin biçimleri, boyutları ve mühendislik detaylarına ve son kullanımlarına bağlı olarak seçilir. Kompozitlerin motor supabı, baskılı devre kartı, tekne gövdesi ve uçak kanadı gibi pek çok uygulama alanı vardır.

Üretim tekniği bir üründen diğerine değişim gösterir. Üretimde kullanılacak matriks tipleri, üretim prosesinin seçiminde önemli bir etkendir. Fiber takviyeli plastik ve metal matriks kompozitler ile yapılan bir motor pervane kanadını üretmek için farklı yöntemler kullanılır. Aynı matriks malzemesi kullanılsa bile proses parametreleri değişim gösterir. (Sinha 2006).

3.4.1. Filaman sarım yöntemi

Filaman sarım yöntemi, dönme eksenine sahip sürekli fiber takviyeli kompozit yapıların üretiminde kullanılır. Bu yöntemle üretilen ürünlere tüpler, borular, silindirik tanklar, basınçlı kaplar, roket motor kasaları gibi örnekler verilebilir. Helisel sarım ve iki eksenli sarım olmak üzere iki tip filaman sarım modeli vardır. Helisel sarımda helisel açı, mandrelin dönel ve eksenel hareketlerinin

kontrol edilmesi ile korunur. Filamanlar 90^{o}'de sarıldığı zaman sarıma teğetsel sarım, 0^{o}'de sarıldığı zaman ise eksenel sarım denir. Motor kasaları ve basınçlı tanklar gibi silindirik kapalı uçlu kapların filaman sarımı için kullanılan çift eksenli sarım modelinde, teğetsel sarım ve eksenel sarım birlikte kullanılır, bu sarım modeline polar sarım denir.

Bu yöntemde, sürekli fiber iplikler önce reçine banyosundan geçirilerek reçine ile kaplanır. Silindirler ile fazla reçine dışarı atılır ve ardından fiberler bir mandrelin çevresine sarılır. Sarım işlemi tamamlandıktan sonra mandrel çıkarılır ve ihtiyaç duyulması durumunda kürleme için fırına konur. Kürlemeden sonra mandrel sökülür ve bitmiş ürün çıkarılır. Filaman sarım yöntemi ile yüksek fiber hacim oranına sahip bir kompozit ürün meydana gelir (Sinha 2006).

4. KOMPOZİT YAMA İLE ONARIM

4.1. Giriş

Uzay endüstrisinde düşük ağırlıklı yapılara olan ihtiyaç fiber esaslı kompozit malzemelerin kullanılmasına sebep olmuştur. Özellikle askeri uygulamalarda kompozitlerin yüksek spesifik dayanımı önemlidir (Clarke 2002). Geleneksel metal alaşımlarına göre çok farklı hasar biçimlerine ve hasar davranışına sahip olan kompozit malzemelerin yaygın kullanımı, kompozit yapılara uygulanan onarım metotlarını geliştirme ihtiyacını doğurmuştur (Sennet 1989).

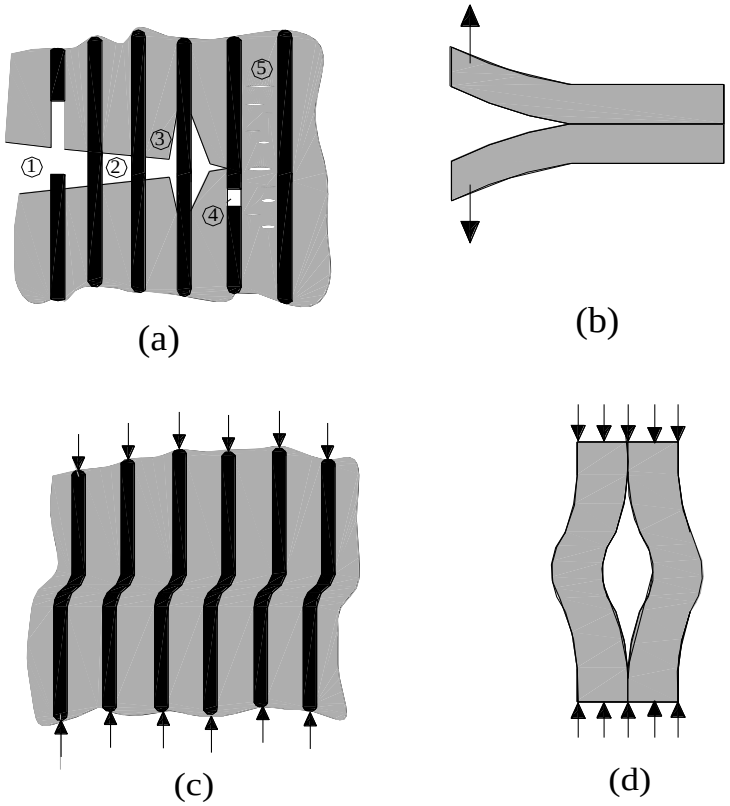
Bir hasarın meydana gelmesi ve yapının kalıcı özelliklerine etki etmesi durumunda hasarlı kompozit eleman ya onarılmalıdır ya da yenisi ile değiştirilmelidir. Hasarın onarılamadığı durumlar da mevcuttur. Örneğin, yüksek derecede gerilmeli elemanlar onarımdan sonra yeterli dayanıma sahip olamazlar. Hasar alanının büyüklüğüne göre üç onarım tipi mevcuttur (Abrate 1998).

1. Nihai yük altında elemanın yük taşıma kabiliyetini azaltan büyük hasarlar hemen onarılmalıdır.
2. Parçanın nihai yüke dayanabildiği küçük hasarlar belirlenmiş periyot içinde onarılmalıdır.
3. İhmal edilebilir derecedeki çok küçük hasarlar ise kozmetik iyileştirmeye ihtiyaç duyarlar.

Kompozit onarımlar korozyondan dolayı zayıflamış boruların takviyesi ve onarımı için 20 yıldır boru hattı endüstrisinde kullanılmaktadır**.** ASME B31.4 ve B31.8 gibi uluslararası onarım standartları, boru hattı onarımlarında kompozitlerin kullanılabileceğini onaylamıştır (Patrick 2004).

4.2. Kompozitlerde Hasar Mekanizması

Tabakalı kompozit malzemeler, metalik malzemelere göre farklı hasar tiplerine sahiptir. Hasar bölgesi onarılmadan önce hasar değerlendirmesi yapılmalıdır (Clarke 2002).



Şekil 4.1. Kompozitlerde hasar tipleri (Anderson 2005)
a) Düzlem içi hasar, b) Tabaka ayrılması, c) Mikro burkulma, d) Tabaka ayrılma burkulması

Şekil 4.1 fiber takviyeli kompozitlerde meydana gelebilecek hasarları göstermektedir. Çekme yükü etkisiyle kompozit tabakada Şekil 4.1.a'da gösterildiği gibi matriks çatlağı, fiber köprüsü, fiber kopması, fiber sıyrılması ve fiber-matriks ayrılması meydana gelebilir. Fiber takviyeli kompozitlerin çekme yüklemesi sonrası nihai hasarında, bu hasarların birkaçı meydana gelebilir. Düzlem dışı gerilmeler Şekil 4.1.b'de görüldüğü gibi tabaka ayrılmasına sebep olabilir. Şekil 4.1.c'de ise basma yüklemesiyle oluşan fiberlerin mikro burkulması gösterilmiştir. Kompozit

malzemede tabaka ayrılması olmuş bölge veya boşluk mevcutsa, Şekil 4.1.d'de gösterildiği gibi basma yükü etkisiyle makroskobik tabaka ayrılması burkulması meydana gelebilir (Chadegani 2008).

Metal alaşımlarında meydana gelen yorulma çatlakları gerilme yoğunluğunun artmasıyla ilerler ve malzemeye zarar verir. Matriks çatlağı daha karmaşık olup bu mekanizmada ilerlemez (Mall 1997). Tabaka içinde meydana gelen çatlakların kendi başlarına tabakanın dayanımını azaltmaya etkisi yoktur. Ancak bu çatlakların yoğunlaşması durumunda dayanımda önemli ölçüde azalma meydana gelir. Tabaka içindeki çatlakların gözle görülebilmesi zordur fakat yüzey çatlakları gözle görülebilir ve gerekli olması durumunda onarılabilir.

Kompozit-alüminyum gibi temas halinde olan malzemelerde, termal genleşme katsayılarının farklılığından dolayı meydana gelen farklı büzülme ve farklı genleşme etkileriyle ya da malzemeye etki eden darbe yüklemeleriyle matriks çatlakları oluşabilir (Clarke 2002).

Tabakalı kompozit malzemenin tabaka bileşeninin birbirinden ayrılması tabaka ayrılmasıdır. Tabaka ayrılması farklı tabakalar arasında olabileceği gibi tek ara yüzeyin ayrılması şeklinde de olabilir. Tabaka ayrılması rijitliğin azalması ile malzemenin dayanımını etkileyebilir (Clarke 2002).

Tabaka ayrılması üretim kaynaklı hatalardan ya da kullanım sırasında oluşan hasarlardan meydana gelebilir (Armstrong ve Barrett 1998).

Düzlem dışı çekme gerilmeleri katlar arası hasara sebep olabilir. Katlar arası poisson oranlarındaki uyumsuzluk kat ara yüzeyinde kayma gerilmesinin oluşumuna sebep olur. Kat ara yüzeyindeki bu kayma gerilmeleri, yüzeyin normali yönündeki gerilme ile dengelenen bir eğilme momenti meydana getirir (Chadegani 2008).

Fiber-matriks ayrılması reçine ile birleşmiş malzemelerde gözlenen bir hasardır. Yapıştırıcı ile bağlanmış yamalar ile hasarlı tabakalı yapılar arasında da meydana gelebilir. Tabaka ayrılması iki farklı tabaka arasında meydana gelirken fiber-matriks ayrılması fiber yapı ile matriks yapı arasında meydana gelir. Fiber-matriks ayrılmaları üretim hataları, darbe hasarları ya da malzeme ara yüzeyine akışkan nüfuz etmesi sonucu meydana gelebilir (Armstrong ve Barrett 1998).

Tabakalı yapı üzerine etki eden yükün tabakalı yapının dayanımına ulaşması ya da malzemeye darbe yüklemeleri etki etmesi durumunda fiber kopmaları oluşur. Fiber kopmaları ile aynı anda tabaka ve fiber-matriks ayrılmaları meydana gelebilir. Fiber-matriks ayrılmaları neticesinde fiber sürekliliğinin kaybından dolayı, tabakalı yapının dayanımında önemli ölçüde azalma meydana gelir. Dayanımın tasarım seviyelerinin aşağısına düşmesi durumunda, belirlenen yöntem ile daha dayanıklı bir onarım yapılmalıdır (Clarke 2002).

4.3. Onarım Tipleri

Malzemede mevcut olan hasar değerlendirildikten sonra uygun bir onarım metodu seçilmelidir. Küçük çatlaklar veya kozmetik hasarlar, hasar bölgesi içine reçine enjeksiyonu ile onarılabilirken, yama ile yapılan onarımlar büyük hasarlar için uygulanmalıdır. Yamalar hasara uğramış tabakalı yapıyı iyileştirmeye çalışırlar (Hoskin ve Baker 1986).

Yamanın hasarlı elemana bağlantı metodunun ve yamanın malzemesinin seçimi aşağıdaki faktörlere bağlıdır (Clarke 2002).

- Statik dayanım
- Parçanın ömrü
- Rijitlik
- Aerodinamik düzlük
- Ağırlık ve denge
- İşlem sıcaklığı
- Çevre şartları
- Maliyet ve zaman
- Çoklu hasar
- Gizlilik

Kompozit yapıda meydana gelen hasarın önemine bağlı olarak iki onarım tipi mevcuttur. Çok küçük hasarlar yapıştırıcı veya reçinenin hasarlı bölgeye uygulanmasıyla onarılabilir. Oysaki tabaka ayrılması gibi büyük hasarlar alternatif yük yolu sağlayan yamalar ile onarılmalıdır (Clarke 2002).

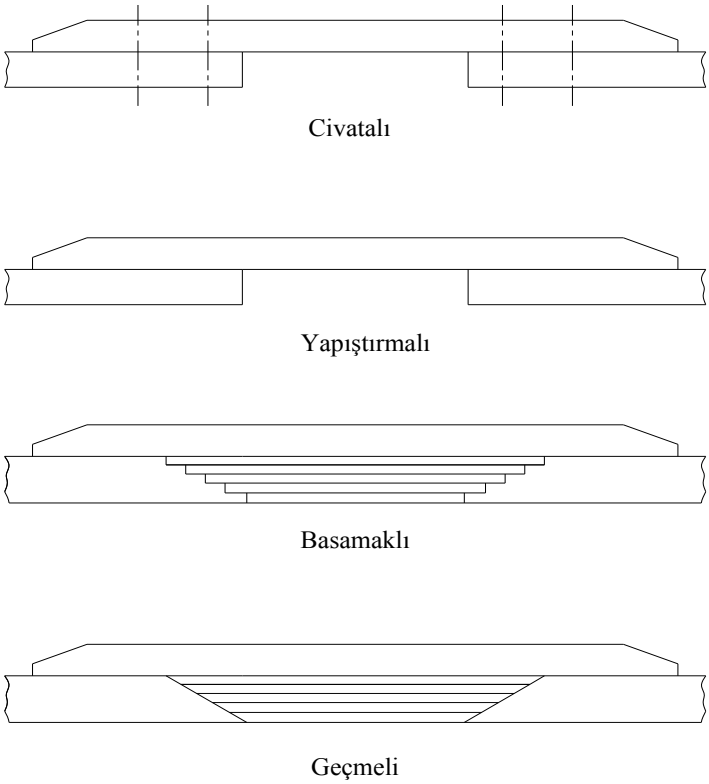
4.3.1. Yamasız onarımlar

Kompozit yapıda büyük boyutta iç tabaka ayrılması veya çatlak yok ise o zaman küçük boşluklar reçine ile doldurularak kür edilebilir (Baker 1997). Tabaka içinde ayrılmalar olması durumunda da bu ayrılan bölgelere reçine enjekte edilir, böylece tabakalar arası dayanım iyileştirilir. Bu işlem, tabaka ayrılmasının kullanım esnasında ortaya çıkması halinde geçerlidir. Tabaka ayrılması olmuş bölgenin kenarına delik açılarak buradan hasarlı bölgeye reçine uygulanır (Armstrong ve Barrett 1998).

4.3.2. Yamalı onarımlar

Kompozit yapılar için mekanik bağlantılı ve yapıştırmalı olmak üzere iki tip birleştirme metodu vardır. Mekanik bağlantılı birleştirmelerde kompozit elemanlara bağlantı deliklerinin açılması gerekmektedir. Bu deliklerin gerilme konsantrasyonunu ve eleman ağırlığını arttırıcı yönde olumsuz etkileri vardır. Yapıştırıcı kullanılarak yapılan birleştirmelerde ise kompozit elemanlar arasındaki temas alanının daha büyük olması, yük transferinin daha etkili olmasını sağlar (Kim ve ark. 2006).

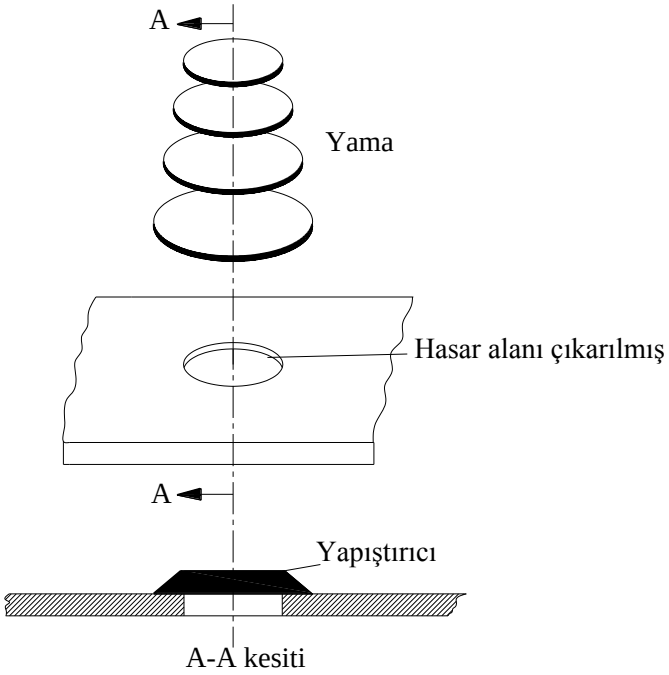
Büyük boyutlu hasarlar yama ile onarılmalıdır. Şekil 4.2'de gösterildiği üzere yamanın hasarlı bölge üzerindeki bağlantısı mekanik bağlantı elemanları ya da yapıştırıcı ile sağlanır (Clarke 2002).



Şekil 4.2. Yamalı onarım tipleri (Niu 1992)

Yapıştırmalı onarımlarda mekanik bağlantı elemanları olmadığı için ek hasar kaynakları mevcut değildir. Ancak onarım işleminin uygulanması için tecrübe, daha uzun zaman ve raf ömrü sınırlı yama malzemesi gereklidir.

Yapıştırmalı onarım yöntemlerinden en etkilisi geçmeli onarımdır. Bu onarım tipinde 1/30 oranlı onarım yüzeyinin oluşturulması için hasarlı bölge delinerek boşaltılır. Boşaltılan yüzey, içerisine üst üste prepreg katlar konularak doldurulur. Onarılmış eleman vakum çantaları ve sıcak hava tabancaları gibi ısı uygulama metotlarıyla yerinde kür edilir. Onarım işleminin karmaşıklığı, depo yüzeyi gibi bölgelere bu onarım prosesinin uygulanmasını sınırlar. Malzemeye dıştan uygulanan yapıştırmalı onarım yöntemi daha çok kullanılmaktadır. Şekil 4.3'te yapıştırmalı onarıma bir örnek verilmiştir (Clarke 2002).



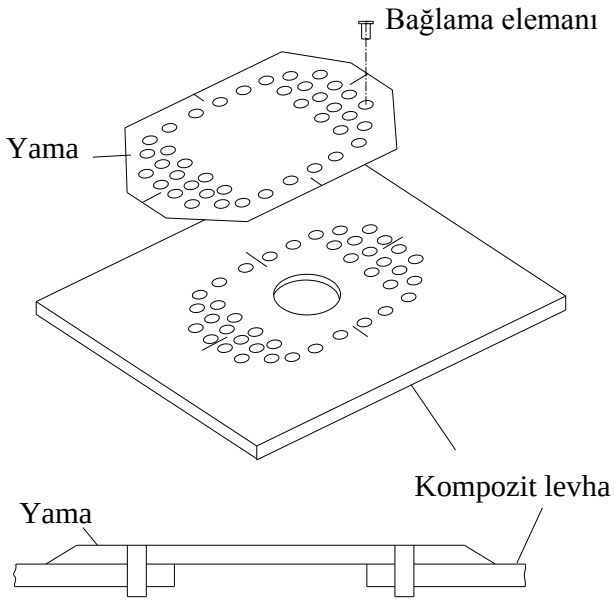
Şekil 4.3. Yapıştırmalı yama ile onarım (Armstrong ve Barrett 1998)

Yapıştırmalı onarımda yama kenarları, yama kenarlarında daha düşük soyulma gerilmesi, kayma gerilmesi ve daha geniş yük transfer bölgesi sağlamak için konikleştirilir. 16 katlı yamaya kadar yama kenarlarına 20/1 oranında koniklik verilir. Birkaç katlı yamalarda yama kenarlarının konikleştirilmesine gerek duyulmaz (Abrate 1998).

Hosseini-Toudeshky ve Mohammadi (2007) merkezi çatlaklı 2024-T3 alüminyum alaşımı panellerin tek taraflı onarımını boron/epoksi, grafit/epoksi ve cam/epoksi kompozit yamalar ile Rao ve ark. (1999) tek kenar çatlaklı alüminyum numunelerini cam/epoksi kompozit yama ile Soutis ve ark. (1999) ise delikli karbon fiber/epoksi prepreg kompozitlerin iki taraflı onarımını karbon/epoksi prepreg yamalar ile yapıştırarak yapmıştır.

Hasarlı yapıya uygulanan mekanik bağlantılı yama ile onarım, kısa sürede gerçekleştirilerek yapının dayanımını iyileştirir. Bu onarım tipinde hasarlı elemana dairesel veya eliptik delik açılarak hasarlı bölge çıkarılır. Yama hazırlanır ve hasarlı elemanın bağlantı deliklerinin oluşturulması için model olarak kullanılır.

Şekil 4.4‘te mekanik bağlantılı yama ile onarım gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Mekanik bağlantılı yama ile onarım (Chicken ve ark.1997)

Kompozit elemanların onarımı için pek çok durumda mekanik bağlantılı yamalı onarım kullanılabilir. Bu onarım yöntemi yapıştırıcı ve kürleme gerektirmez. Bu yüzden mekanik bağlantılı yamalı onarımlarda, yapıştırmalı yamalı onarımlarda kritik olan nem ve sıcaklık problemleri görülmez. Yama malzemesi seçiminde termal genleşme katsayısı önemli bir etkendir. Çünkü yama ve hasarlı elemanın eşit olmayan genleşme veya büzülmesi kalıcı şekil değişimine sebep olur.

Aynı zamanda mekanik bağlantılı yamalı onarım, yapıştırmalı onarımda önemli olan kimyasallarla yüzey hazırlama işlemini de gerektirmez. Bu onarım yöntemi basit olup düşük derecede işçilik ve ekipman ile gerçekleştirilebilir. Mekanik bağlantılı onarım genellikle ince veya bal peteği yapılarından daha çok kalın tabakalar için uygundur.

Mekanik bağlantılı onarımlarda, hasarlı eleman üzerine bağlantı delikleri açılır. Bu durum parçanın ömrünü sınırlayabilir. Tabaka ayrılmasının ve fiber hasarının oluşumunu önlemek için, kompozit elemana delik açarken ve yama malzemesini imal ederken dikkatli olunmalıdır. (Clarke 2002).

4.4. Onarımı Etkileyen Faktörler

4.4.1. Yama tasarımı

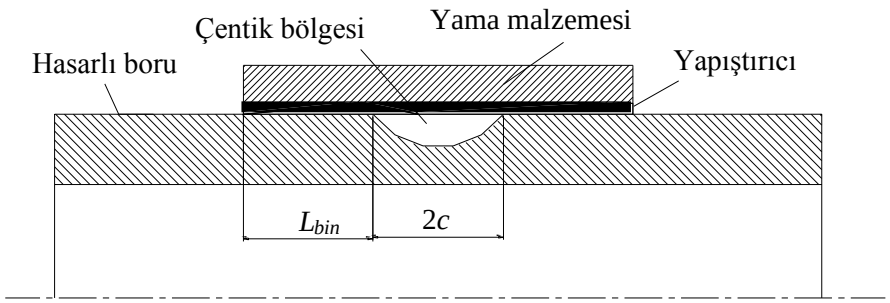
Yapısal birleşimlerle bir elemandan diğerine yük transferi gerçekleşir. Yapıştırıcılar kayma yüküne karşı dirençli olduklarından, birleşim tasarımı yapılırken yükün kayma etkisiyle aktarımına dikkat edilir. Soyulma ve çekme gerilmelerine karşı dirençli olmadıklarından bu türlü yük aktarımlarından kaçınılır. Birleşim kenarlarında eğilme etkili olduğunda soyulma gerilmeleri meydana gelir. Birleşen elemanlar elastik olduğunda ve birleşime etkiyen yükler aynı eksenli ya da paralel olmadığında, çekme ve kayma yükleri soyulma gerilmelerine dönüşür. Yapıştırıcı ile yapılan birleşimlerde dikkat edilecek faktörler aşağıda verilmiştir.

- Birleşim tasarımı, birleşen elemanlar arasındaki yük aktarımı kayma veya basma biçiminde olacak şekilde yapılmalıdır.
- Sıcaklık direnci, kimyasal direnci, dayanım gibi ihtiyaçları karşılayan yapıştırıcı malzemesi seçilmelidir.
- Yapıştırma alanına kolaylıkla ulaşılabilmeli, ayrıca yüzey hazırlama ve yapıştırma işlemleri kolayca yapılabilmelidir.
- Yapıştırma alanı büyük tutularak birleşimde meydana gelecek gerilme en aza indirilmelidir.
- Benzer olmayan elemanların birleştirilmesinde termal genleşme katsayısının farklılığından kaynaklanan kalıcı gerilmeler dikkate alınmalıdır.
- Birleşim dayanımının iyi olması için optimum yapıştırıcı kalınlığı uygulanmalıdır. Çok ince ya da çok kalın yapıştırıcı kullanmak birleşim dayanımının azalmasına sebep olur.

Yapıştırarak yapılan birleştirmede iki malzeme yapıştırıcı kullanılarak birleştirilir. En çok uygulanan birleşim tipi tek bindirmeli birleşimdir. Bu birleşimde yapıştırıcıdaki kayma gerilmeleri aracılığıyla, onarılan elemandan onaran elemana yük transferi gerçekleşir. Ancak, tek bindirmeli birleşimde yüklerin merkez dışı olmasından dolayı, eğilme etkili olur ve yapıştırıcı kalınlığı yönünde normal gerilmeler oluşur. Yapıştırıcının bindirme uçlarında meydana gelen normal ve kayma gerilmeleri birleşim dayanımının azalmasına sebep olur. Eğilme kuvveti ve normal

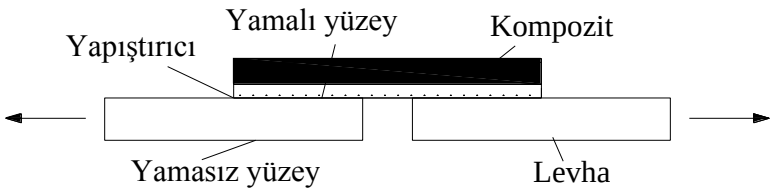
kuvvetleri gidermek için çift bindirmeli birleşim uygulanır. Normal gerilmelerin mevcut olmamasından dolayı çift bindirmeli birleşimin dayanımı tek bindirmeliden daha büyüktür. Yapıştırıcı seçimi ve özelliklerinin tespitinde tek bindirmeli birleşim testleri uygulanır (Mazumdar 2002).

Şekil 4.5'te yama ile onarılmış bir borunun şematik resmi gösterilmiştir.

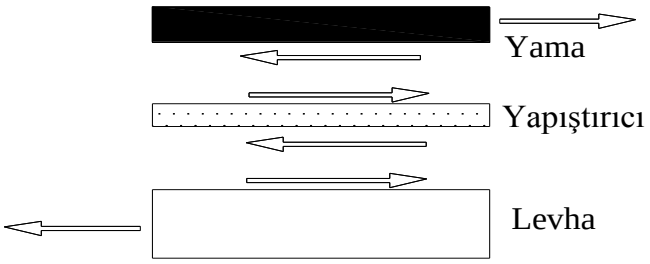


Şekil 4.5. Yama ile onarılmış boru kesiti

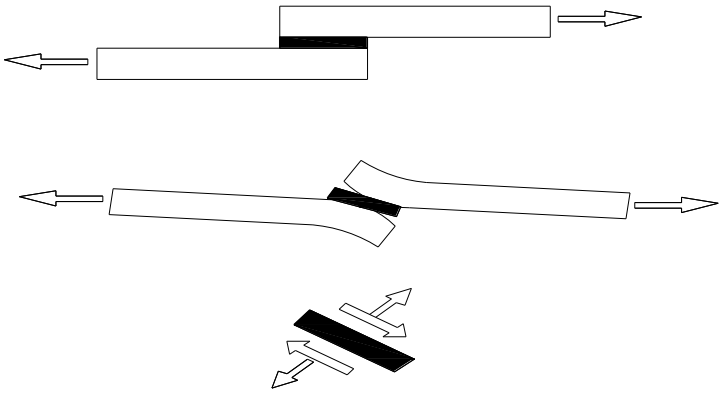
Şekil 4.6'da ise bindirmeli birleşim gösterilmiştir. Birleşimde levha ve yama çekme yükü etkisi altındadır. Levha ve yama arasındaki yapıştırıcı tabaka, kayma gerilmeleri aracılığıyla çekme yükünü levhadan yamaya aktarır. Şekil 4.7'de birleşimdeki yük transferi gösterilmiştir. Tek bindirmeli birleşimde tarafsız eksenin eksantirikliğinden dolayı levha ve yamada eğilme etkili olur. Şekil 4.8'de ise tarafsız eksen değişimi ile levha ve yamada meydana gelen eğilme gösterilmiştir (Schubbe 1997).



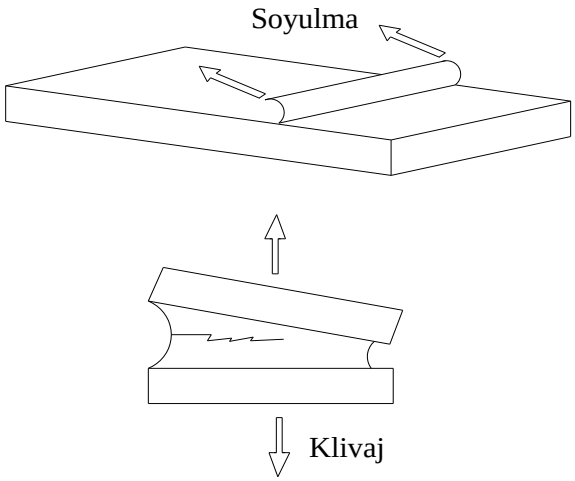
Şekil 4.6. Bindirmeli birleşim (Schubbe 1997)



Şekil 4.7. Levhadan yamaya yük transferi (Schubbe 1997)



Şekil 4.8. Tarafsız eksen değişimi ile meydana gelen eğilme (Schubbe 1997)



Şekil 4.9. Yapıştırıcının soyulma ve klivaj hasarı (Schubbe 1997)

Levha ve yamayı birleştiren yapıştırıcı tabakasında, yüzeye dik normal kuvvetler ile paralel kayma kuvvetleri meydana gelir. Bu kuvvetler ile yapıştırıcı hasarları meydana gelir. Yüzeye dik etkiyen kuvvetler Şekil 4.9'da gösterildiği gibi yapıştırıcının soyulma ve klivaj hasarına sebep olur (Schubbe 1997).

Yama kenarlarında meydana gelen bu hasar biçimlerinin en aza indirilmesinde çift taraflı onarım yapılması, yama kenarlarının konikleştirilmesi ya da bindirme uzunluğunun arttırılması etkili olur. Bu uygulamalar, yapıştırıcı hasarını ve yapıştırıcının levhadan ayrılma olasılığını azaltır (Schubbe 1997).

Thumb (Fredell 1992) onarım için aşağıdaki etkenlerin önemini belirtmiştir.

- Yama malzemesinin statik dayanımı onarılacak malzemeye eşit veya daha büyük olmalıdır.
- Onarımda meydana gelebilecek eğilmeyi azaltmak için çift taraflı onarım yapılmalıdır.
- Tek taraflı onarımda yama bindirme uzunluğu yama kalınlığının 100 katı, çift taraflı onarımda ise 30 katı olmalıdır.
- Yama/levha rijitlik oranı $E_y.t_y/E_P.t_P \geq 1$ olmalıdır. E_P levhanın, E_y yamanın elastisite modülü ve t_P levhanın t_y ise yamanın kalınlığıdır.
- Yama kenarları, yüksek derecede yüklemeye maruz kaldığında konikleştirilmelidir.

4.4.1.1. Yama bindirme uzunluğu

Yama bindirme uzunluğu birleşim dayanımı üzerine önemli etkiye sahiptir. Yama bindirme uzunluğunun kısa olması durumunda yapıştırıcı tabaka yüksek kayma gerilmesine maruz kalır. Onarımda yama uzunluğunun, yama kalınlığının 80-100 katı kadar olması tavsiye edilir (Composite repair of aircraft structure 2001).

Kısa bindirme uzunluklu yama kullanılması durumunda, yapıştırıcı tabaka plastik kayma gerilmesine maruz kalır. Bindirme uzunluğu arttıkça yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmeleri daha geniş alana etki eder. Levha ile yama arasındaki yapışma yüzeyinin merkezinde kayma gerilmeleri minimumdur. Çünkü yapışma merkezinde levha ve yamanın deplasman uyumsuzluğu en aza inmiştir. Bu

yüzden yapışma merkezinde elastik kayma gerilmesi, yama kenarlarında ise plastik kayma gerilmesi etkili olur. Yama bindirme uzunluğunun daha da artması ile plastik kayma gerilmeleri arasındaki elastik kayma bölgesi genişler (Roberts 1995).

4.4.1.2. Yama kalınlığı

Yama tasarımında yama malzemesinin çekme rijitliği önemli bir faktördür. Onarılacak elemana yapıştırılan yama, elemandaki hasar ilerlemesini azaltmak için hasarlı elemandaki yükü taşır ve ayrıca hasar bölgesini kapatarak takviye sağlar. Yamanın nihai dayanımı da tasarımda önemlidir. Yama çekme veya kayma yükü altında çok kolay hasarlanmamalıdır (Roberts 1995).

Yama rijitliği ($E_y\ t_y$), onarılacak elemanın rijitliğine ($E_P\ t_P$)'ye eşit olduğunda onarım en etkili olur. Yama rijitliğinin onarılacak elemanın rijitliğine oranına rijitlik oranı (SR) denir ve bu oranın ideal değeri 1'dir. Onarımda daha rijit yamanın kullanılması birleşim dayanımının artması anlamına gelmez. Çünkü yamanın rijitliği ne kadar fazla olursa yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmeleri de o kadar etkili olur. Bununla birlikte yama kalınlığının artması, tarafsız eksenin değişmesine ve akabinde de birleşimde meydana gelecek eğilme momentlerine sebep olur. Bu yüzden rijitlik oranının (SR) 1.0-1.6 arasında belirlenmesi tavsiye edilmiştir (Nagaswamy ve ark. 1995). İnce yama kullanarak yapılan onarımlarda ise çatlak üzerindeki yapıştırıcı tabakasında ve fiberlerde yüksek gerilme konsantrasyonu oluşur. Yama kalınlığının artması ile bu gerilmelerin azalması mümkün olur (Okafor ve ark. 2005).

Hosseini-Toudeshky ve Mohammadi (2007), merkezi çatlaklı 2024-T3 alüminyum alaşımı panellerin tek taraflı onarımında kullandıkları boron/epoksi, grafit/epoksi ve cam/epoksi kompozit yamaların kalınlığını, panel kalınlığını aşmayacak ve rijitlik oranı 1.5'ten az olacak şekilde belirlemişlerdir. Lee ve Lee (2004) ise ön çatlaklı alüminyum levhaların tek taraflı onarımında kullandıkları tek yönlü grafit/epoksi kompozit yama kalınlığını, rijitlik oranı 1.0 olacak şekilde tespit etmiştir.

4.4.2. Yüzey hazırlama

Yapıştırılarak yapılan birleşimlerde yapışma dayanımı büyük ölçüde yapıştırılan yüzeylerin kalitesine bağlıdır. Bu yüzden iyi bir yapıştırma için yüzey hazırlama işlemleri gereklidir. Yüzey hazırlama işlemleri yüzeydeki zayıf tabakaları yok etmek ve yüzeyin ıslanabilirliğini arttırmak için yapılır. Kompozit malzeme yüzeyleri, kalıp ayırıcı maddeler ve diğer katkı maddeleri ile etkileşim halinde olduğundan bu malzemelerin yüzey hazırlama işlemlerine ihtiyaçları vardır. Bu kirletici maddeler ya zımpara kâğıdı ile yüzeyi aşındırarak ya da kimyasallarla temizleyerek yüzeyden uzaklaştırılır (Mazumdar 2002).

Mekanik aşındırma işlemi kompozit malzemeler için kullanılmaktadır. Mekanik aşındırma ile metal ve kompozit malzemelerin yüzeyleri pürüzlü hale getirilir. Böylece malzemelerin yapışma yüzey alanları artar ayrıca yüzeyden kirletici maddeler ve partiküller uzaklaştırılır. Aşındırma işlemi için zımpara kâğıdı, tel fırça ve zımpara bezi kullanılır (Mazumdar 2002).

Kimyasal işlem de yapışma dayanımını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bu işlemde metalik ve metalik olmayan malzemelerin yüzeylerindeki kirletici maddeler çeşitli kimyasallar kullanılarak yok edilir (Mazumdar 2002).

Rao ve ark. (1999) tek kenar çatlaklı alüminyum numunelerinin ve cam/epoksi kompozit yamaların, Soutis ve ark. (1999) ise iki taraflı onarım öncesi delikli karbon/epoksi prepreg kompozit numunelerinin yüzeylerini aseton ile temizlemiştir.

Baker'a göre yapışma dayanımı, yapıştırmalı onarımın en önemli etkenidir. Baker onarımla ilgili olarak aşağıdaki hususlara değinmiştir.

- Onarımda kuvvetli yapışma sağlanmalı,
- Kapalı alan onarımlarında ve yakın temas halinde zararlı kimyasallar kullanılmamalı,
- Üretim ve kürleme ortam sıcaklığına yakın sıcaklıkta yapılmalı,
- Onarım korozyona karşı direnç göstermeli,
- Onarım yakıt tankları v.s. yüzünden elektriksel kıvılcım oluşturmamalı,
- Onarım işlemi çeşitli elemanlara uygulanabilmelidir.

4.4.3. Yama malzemesinin seçimi

Yama malzemesinin seçiminde kullanım kolaylığı, mevcut olma, işlenebilirlik ve malzemenin performansı dikkate alınır (Schubbe 1997).

Yamanın rijitliği onarımı üç farklı şekilde etkiler. Birincisi, onarımda daha rijit yama malzemesi kullanarak yamanın daha fazla yük taşıması sağlanır. Bu şekilde çatlaklı eleman üzerindeki yük azalmış olur. İkincisi, daha rijit yama malzemesi ile onarılan elemanın çatlak açılma miktarı daha da azalır. Böylece çatlak ucundaki gerilmeler azalmış olur. Üçüncüsü ise daha rijit yama malzemesi kullanarak onarılacak eleman ile yama arasındaki ayrılma etkisi artar. Çünkü yama ne kadar rijit olursa yama ile onarılacak elemanın deplasmanları o derece farklı olur. Bu durum da eleman ile yama arasındaki yapıştırıcı tabakasında kayma gerilmelerine sebep olur ve akabinde de ayrılmalar meydana gelir. Bunun için onarımda çok rijit yama malzemesi kullanılmamalıdır (Roberts 1995).

Hosseini-Toudeshky ve ark. (2005), merkezi çatlaklı 2024-T3 alüminyum panellerin tek taraflı onarımında, Rao ve ark. (1999) ise tek kenar çatlaklı alüminyum numunelerin onarımında cam/epoksi kompozit yamalar kullanmıştır.

4.4.4. Yapıştırıcı seçimi

Onarımın dayanım ve tokluğu yapıştırıcının kayma dayanımı ve modülü ile ilgilidir. Yüksek kayma modüllü yapıştırıcılar çatlaklı levhadaki gerilme şiddet faktörlerini azaltırlar. Düşük kayma modüllü yapıştırıcılar ise yapıştırıcı tabakasında daha fazla deformasyona sebep olurlar. Ayrıca levhadaki çatlak açılma miktarı ile birlikte gerilme ve çatlak ilerleme hızını da arttırırlar (Schubbe 1997).

Başarılı bir onarım iyi bir birleşim tasarımına, iyi yüzey hazırlamaya, uygun yapıştırıcı seçimine ve kürlemesine ihtiyaç duyar. Yapıştırıcı seçiminde yapıştırılacak malzemeleri tanımlamak, dayanıklılık ve diğer ihtiyaçları belirlemek gerekir (Mazumdar 2002).

Yapıştırıcı seçimi aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

- Yapıştırıcı çalışma sıcaklığında iyi dayanım ve tokluk özelliklerine sahip olmalı,
- Neme veya kimyasallara karşı dirençli olmalı,
- Yapışma, yüzey hazırlama etkenleri ile uyumlu olmalı,
- Mümkün olan en düşük kür sıcaklığına sahip olmalı (Schubbe 1997).

Çalışma sıcaklığı yapıştırıcı seçiminde dikkat edilecek özelliklerden biridir. Yüksek sıcaklıkta kürlenen yapıştırıcılar çok düşük sıcaklıklarda gevrek, düşük sıcaklıkta kürlenen yapıştırıcılar ise yüksek sıcaklıklarda plastik davranış sergilerler. Onarımın yerinde yapılması durumunda, yama ve onarılacak elemanın çalışma sıcaklığına yakın sıcaklıkta kür edilmesi gerekmektedir. Böylece yama ve onarılacak elemanda meydana gelebilecek termal kalıcı gerilmeler en aza indirilmiş ve çatlak ilerlemesine engel olunmuş olacaktır (Schubbe 1997).

Yapıştırmalı birleşimlerde köpük, macun ve film şeklinde yapıştırıcılar kullanılır (Schubbe 1997). En çok kullanılan yapıştırıcılar epoksiler, akrilikler, üretanlar, silikonlar ve polyolefinlerdir (Mazumdar 2002).

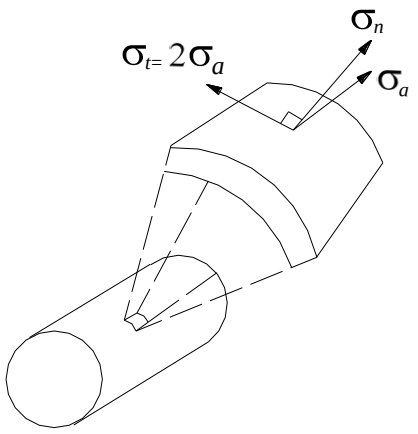
Çok ince yapıştırıcı tabaka rijit ve gevrek davranırken, kalın yapıştırıcı tabaka gözenekli ve zayıf olur. Bu yüzden yapışma dayanımının iyi olması için yapıştırıcı kalınlığı 0.124 mm-0.249 mm arasında olmalıdır (Sun ve Klug 1996). Yapıştırıcı kalınlığı arttıkça yama rijitliği azalacağından, ince yapıştırıcılı birleşim kalın yapıştırıcılı birleşimden daha etkili olur. Bununla birlikte yama kalınlığının artması

ile yama daha az şekil değişimi çekeceğinden yama daha dayanıklı olur (Okafor ve ark. 2005)

Rao ve ark. (1999) tek kenar çatlaklı alüminyum numunelerinin onarımında, Goertzen ve Kessler (2007) çelik boru onarımında, Soutis ve ark. (1999) ise delikli karbon/epoksi prepreg kompozit levhaların onarımında yapıştırıcı olarak epoksi kullanmışlardır.

4.5. Onarılmış Boruya Etkiyen Gerilmeler

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi ince cidarlı silindirik basınçlı kaplarda teğetsel yönde σ_t ve eksenel yönde σ_a gerilmesi olmak üzere 2/1 yükleme oranı mevcuttur. Basınçlı kabın yüzeyine dik yönde etki eden σ_n gerilmesi ise basınçlı kabın dışarı doğru deformasyonuna sebep olur, bu gerilme uygulamada ihmal edilir. Basınçlı kabın kalınlığına göre yama daha ince olduğundan yamadaki normal gerilmeler minimum olur (Roberts 1995).



Şekil 4.10. İki ucu kapalı basınçlı kaptaki gerilmeler (Roberts 1995)

Kompozit yamanın davranışı fiberlerin yönünün fonksiyonudur. Basınçlı kap uygulamasında kompozit yama çift eksenli yüklemeye mukavemet edebilmelidir. Yamadaki fiberler çatlak ilerlemesinin yavaşlaması için çatlağa dik yönde

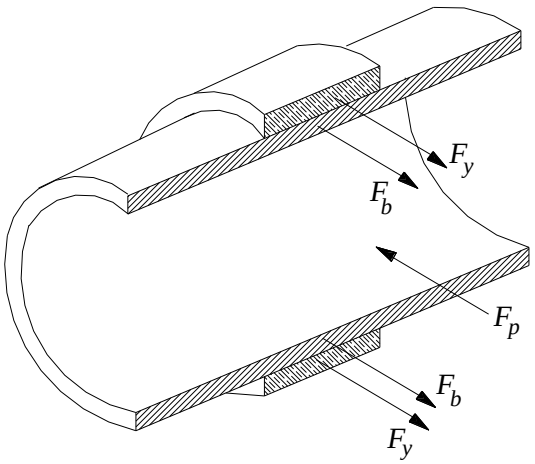
dizilmelidir. Yük fiberlere dik yönde uygulandığı zaman ise yama tasarımı, çatlak olmayacak şekilde yapılmalıdır (Roberts 1995).

Bir borunun patlama basıncı boru malzemesinin dayanımı ile ilgilidir. Boru yarıçapının cidar kalınlığına oranı 10'dan büyük olan borularda yani ince cidarlı borularda teğetsel gerilme Barlow'un denklemi ile belirlenir (Handbook for Armor Plate Pipe Wrap 1998).

$$\sigma_t = \frac{P.r}{t} \tag{4.1}$$

Burada σ_t teğetsel gerilme, *r* iç yarıçap, *P* iç basınç ve *t* cidar kalınlığıdır.

Şekil 4.11'de kompozit yama ile onarılmış bir boruda iç basınç etkisiyle meydana gelen kuvvetler gösterilmiştir (Handbook for Armor Plate Pipe Wrap 1998).



Şekil 4.11. Onarılmış boruda iç basınçla oluşan kuvvetler

İç basınç kuvveti boru ve yamanın tepki kuvvetine eşit olmalıdır.

$$F_p = 2\,(F_b + F_y) \tag{4.2}$$

Denklem 4.2. gerilme ve kesit alanları cinsinden aşağıdaki şekle dönüşür.

$$P.r_{iç} = \sigma_b.t_b + \sigma_y.t_y \tag{4.3}$$

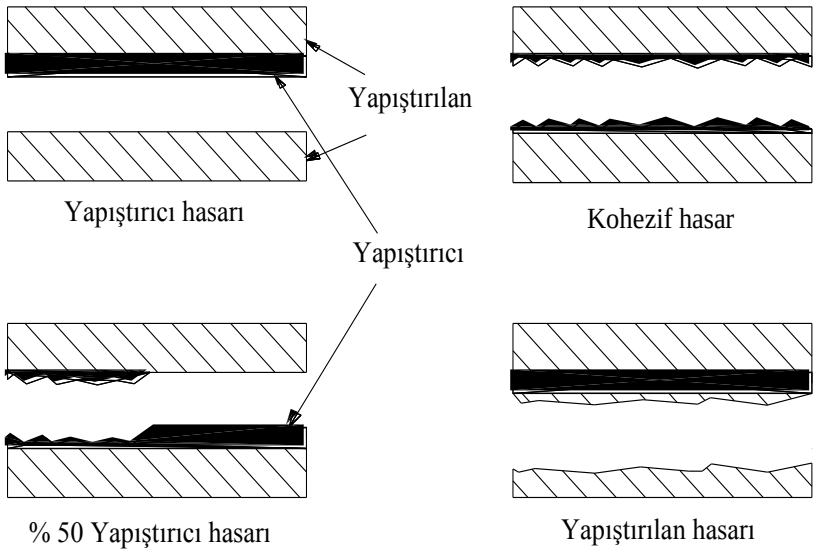
Onarılmış boruya uygulanan basınç aşağıdaki denklemle belirlenir.

$$P = \frac{\sigma_b \cdot t_b + \sigma_y \cdot t_y}{r_{iç}} \tag{4.4}$$

4.6. Yapıştırıcı Bağdaki Hasar Tipleri

Yapıştırmalı birleşimlerde Şekil 4.12'de gösterildiği üzere yapıştırıcı hasarı ve kohezif hasar meydana gelir. Yapıştırıcı hasarı, zayıf birleşim neticesinde yapıştırıcının yapıştırılandan ayrılması şeklinde gerçekleşir. Kohezif hasar ise yapıştırıcıda veya yapıştırılan malzemede meydana gelebilir. Kohezif hasar yapıştırıcı ile yapıştırılanın birleşim dayanımı, yapıştırıcı ya da yapıştırılan malzemenin dayanımından büyük olması durumunda gerçekleşir (Mazumdar 2002).

Yapıştırma tasarımı yapılırken yapıştırılan hasarının ya da kohezif hasarın meydana gelmesi istenir. Yapıştırılan hasarında yapıştırıcı ile yapıştırılanın birleşim dayanımı daha fazla olduğundan, yapıştırılan malzeme yırtılarak hasar verir. Kohezif hasarda ise yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme birbirine iyice bağlı olup yapıştırıcıda çatlama meydana gelir (Mazumdar 2002).



Şekil 4.12. Yapıştırma hasar biçimleri (Mazumdar 2002)

Metallerde kohezif hasar meydana gelirken yapıştırıcı hasarı meydana gelmez (Adams ve Davies 1996). Kompozit malzemelerde ise yapıştırılan ve yapıştırıcı malzemelerinin poisson oranlarındaki farklılıktan dolayı hem yapıştırıcı hem de kohezif hasar oluşur (Armanios 2005).

5. YORULMA

Periyodik veya tekrarlı yükleme altındaki hasar yorulmadır. Yorulmaya maruz kalan bir yapısal elemanın ömrü, yapıda mevcut olan çatlak veya hataların kritik altı boyutlardan kritik boyuta ulaşması için geçen zaman ile belirlenir. Hatanın kritik değere ulaşması durumunda son hasar meydana gelir (ASTM E-399).

Bir yorulma çatlağının başlaması için geçen çevrim sayısı yorulma çatlak başlama ömrü, N_i dir. Yorulma çatlağının kritik boyuta ulaşması için geçen çevrim sayısı ise yorulma çatlak ilerleme ömrü, N_p dir. Toplam yorulma ömrü N_t, çatlak başlama ve ilerleme ömürlerinin toplamıdır (Barsom ve Rolfe 1999).

$$N_t = N_i + N_p \tag{5.1}$$

Yapısal elemanda çatlak mevcut olması durumunda, yorulma çatlak başlama ömrü kısalır veya ortadan kalkar. Böylece elemanın toplam yorulma ömrü azalır (Barsom ve Rolfe 1999).

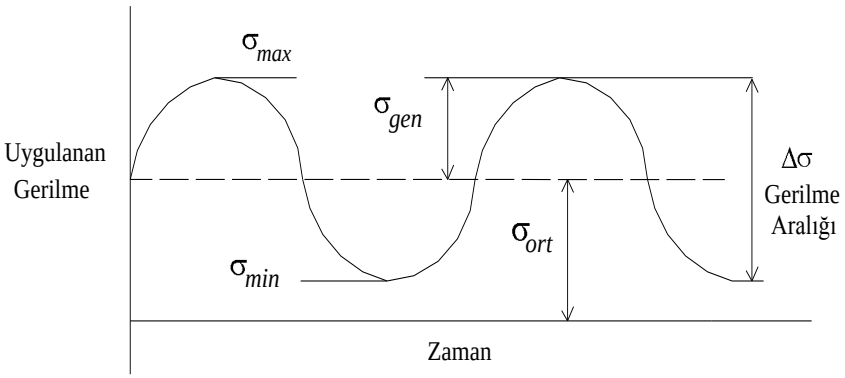
5.1. Yorulma Performansını Etkileyen Faktörler

Yapısal elemanların yorulma performansını gerilme, elemanın geometrik özellikleri ve çevre ile ilgili faktörler etkiler. Gerilme durumu, gerilme aralığı, gerilme oranı, sabit veya değişken yükleme, frekans ve maksimum gerilme gerilme parametreleridir (Barsom ve Rolfe 1999).

Yapısal elemanlar çeşitli yükleme durumlarına maruz kalırlar. Şekil 5.1‘de sabit genlikli gerilme-çevrim sayısı grafiği verilmiştir (Barsom ve Rolfe 1999).

Sabit genlikli yük durumu Şekil 5.1’de gösterildiği gibi sabit yük veya gerilme aralığı ΔP ($\Delta\sigma$), ortalama gerilme σ_{ort}, gerilme genliği σ_{gen} ve gerilme oranı R ile tanımlanır. Gerilme aralığı bir çevrimdeki maksimum gerilme σ_{max} ile minimum gerilme σ_{min} arasındaki farktır (Barsom ve Rolfe 1999).

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \tag{5.2}$$



Şekil 5.1. Sabit genlikli yükleme (Barsom ve Rolfe 1999)

Ortalama gerilme σ_{max} ve σ_{min} 'in ortalamasıdır.

$$\sigma_{ort} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \tag{5.3}$$

Gerilme genliği bir çevrimdeki gerilme aralığının yarısıdır.

$$\sigma_{gen} = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \tag{5.4}$$

Gerilme oranı *R* ise her bir çevrimdeki minimum ve maksimum gerilmelerin oranıdır.

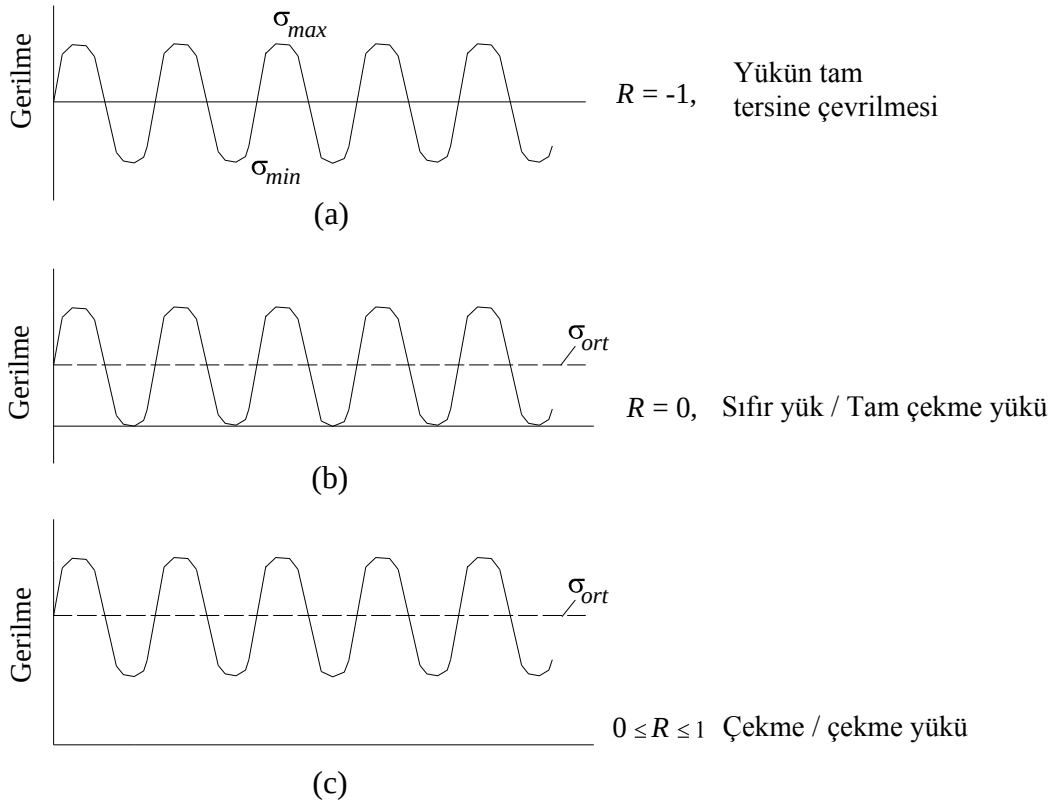
$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \tag{5.5}$$

Şekil 5.2.a'da gösterildiği gibi gerilme, eşit büyüklükteki minimum basma ve maksimum çekme gerilmeleri arasında değişirse *R*=-1, Şekil 5.2.c'deki gibi minimum çekme gerilmesinden maksimum çekme gerilmesine değişirse $0 \leq R \leq 1$ 'dir (Barsom ve Rolfe 1999).

5.2. Gerilme-Çevrim Sayısı Eğrisi

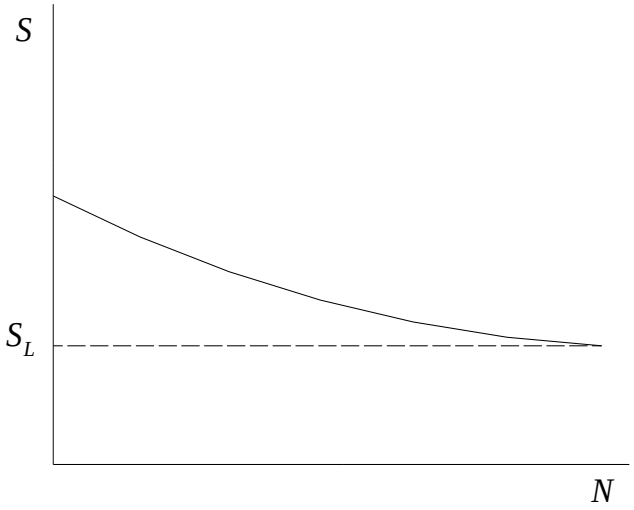
Bir malzemenin yorulma özellikleri yorulma yüklemesine karşı malzemenin davranışıdır. Malzemenin dayanımı çevrim yüklemesi ile azalır. Çalışma şartlarında sünek olan metalik malzemeler tekrarlı yük etkisiyle gevrek tarzda hasarlanırlar.

Hasarın meydana geldiği çevrim sayısı gerilme seviyesi, gerilme durumu, çevrim tipi, malzeme bileşimi ve çevresel şartlar gibi faktörlere bağlıdır (Mallick 2007).



Şekil 5.2. Farklı yüklemeler için *R* oranları

Çevrim yükü altında malzemelerin yorulma davranışı Şekil 5.3'te gösterilen *S*-*N* eğrisi ile karakterize edilir. Bu eğride *S* maksimum gerilme veya gerilme genliğini, *N* ise çevrim sayısını ifade eder. *S* ve *N* arasındaki ilişki, yorulma altında hasarlanacak malzemenin eğilimini gösteren bir eğri ile belirtilir. S_L bu ilişkinin alt limitini ifade eder. Malzemelerin büyük çoğunluğu için çevre, korozyon gibi etkiler dikkate alınmadığı takdirde, S_L yük limitinin altında hasar meydana gelmez (Schubbe 1997).



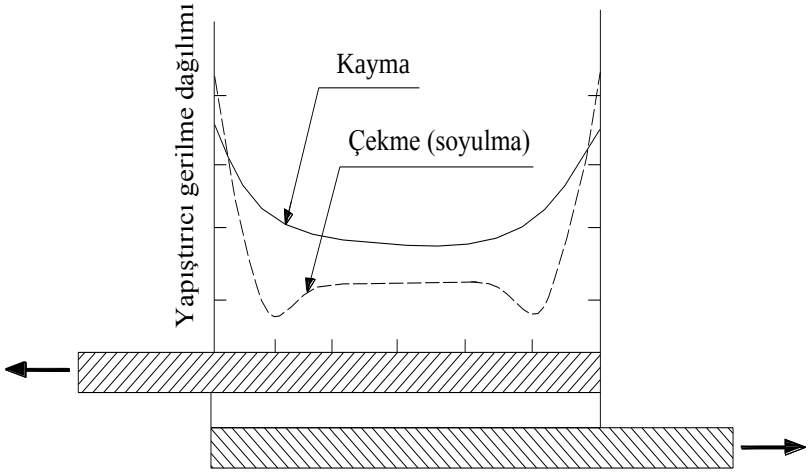
Şekil 5.3. *S-N* eğrisi

Bu eğri sinüzoidal yükleme koşulları ile farklı gerilme seviyelerinde numunelerin test edilmesi ile elde edilir. Malzemelerin çoğunluğu için gerilme seviyesi azaldıkça çevrim sayısı devamlı olarak artar. Düşük karbonlu çelik ve diğer birkaç alaşım için, yorulma limiti veya dayanıklılık limiti 10^5 ve 10^6 çevrim arasında değişir. Düşük karbonlu çelikler için yorulma limiti yaklaşık olarak nihai çekme dayanımının %50'sidir. Yorulma limiti altında yorulma hasarının meydana gelmemesi malzemenin sonsuz ömre sahip olduğunu gösterir. Birçok fiber takviyeli kompozitte yorulma limiti gözlenmez ve *S-N* eğrisinin eğimi düşük gerilme seviyelerinde azalır. Bu durumda 10^6 veya 10^7 çevrim gibi çok yüksek çevrimlerde malzemenin yorulma dayanımı belirlenir (Mallick 2007).

Yorulma yükü gerilme kontrollü ve şekil değiştirme kontrollü olmak üzere iki şekilde uygulanır. Gerilme kontrollü çevrimde, gerilme değeri σ_{max} ve σ_{min} arasında değişir ve bu esnada gerilme genliği sabit kalır. Şekil değiştirme kontrollü çevrim ise maksimum veya minimum şekil değiştirme ya da deplasman ile kontrol edilir. (Schubbe 1997).

5.3. Yapıştırıcı ile Bağlanmış Birleşimlerde Yorulma

Yapıştırıcı ile bağlanan birleşim çekme, basma, kayma, eğilme veya bu yüklerin birleşimi ile yüklenebilir. Yapıştırılmış birleşim yüklendiğinde, yapıştırılan ve yapıştırıcı arasındaki elastik farklılıktan ve olası geometrik asimetriden dolayı üniform bir gerilme alanının meydana gelmesi mümkün değildir. Şekil 5.4 bindirmeli birleşimdeki kayma ve çekme gerilme dağılımlarını göstermektedir (Harris 2003).

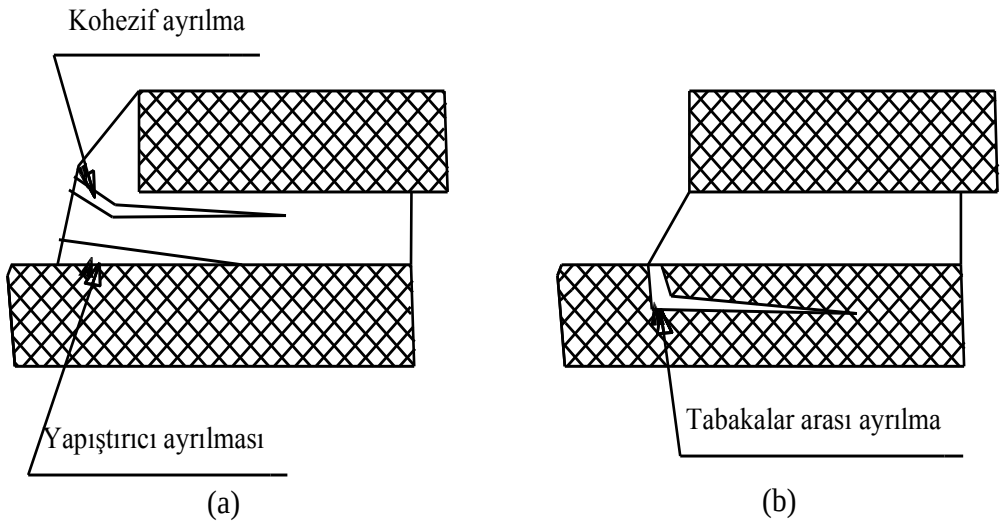


Şekil 5.4. Tek bindirmeli birleşimde gerilme dağılımı (Harris 2003)

Çevrim yükü etkisiyle yorulma çatlakları gerilme konsantrasyonunun yoğun olduğu bindirme kenarlarında başlar. Çift bindirmeli birleşimlerde, yapıştırıcı iç ve dış kavisleri gerilme ve şekil değiştirme konsantrasyonlarının meydana geldiği bölgelerdir. Şekil 5.5'te görüldüğü üzere kompozit birleşimlerde tek bir hasar ya da yapıştırıcı ve kohezif ayrılma, yapıştırılan hasarı gibi farklı hasar biçimlerinin birleşimi şeklinde hasarlar görülür (De Goeij ve ark. 1999**,** Mall ve Yun 1987).

Yorulma çatlağı şeklindeki bir hasar ya yapıştırıcı tabakasında ya da yapıştırılan ve yapıştırıcı ara yüzeyinde meydana gelir. Çift bindirmeli birleşimlerde yorulma çatlağı her iki yapışma alanında meydana gelir. Yapışma alanlarının birinde

meydana gelen çatlak, gerilme etkisi ile diğer yapışma alanındaki çatlakların başlamasına sebep olabilir (Abdel Wahab ve ark. 2001).



Şekil 5.5. Yapıştırmalı birleşimlerde yorulma hasar biçimleri (Harris 2003)
a) Yapıştırıcı ve kohezif ayrılma, b) Tabakalar arası hasar

Bazı durumlarda yapıştırıcı tabakasındaki bir çatlak yönünü değiştirip kompozitte tabakalararası ayrılmalara sebep olabilir. Tabakalararası çatlaklar genellikle yapıştırıcı tabakasındaki çatlaklardan çok daha hızlı ilerler (Potter ve ark. 2001). Çoğu tabakalı kompozitin tabakalararası dayanımı yapıştırıcı dayanımından daha düşük olduğundan, çatlak yapışma alanında değil de tabakalar arasında başlayabilir. Bu hasarın meydana gelmesi yapıştırmanın uygun olmadığının göstergesidir **(**Abdel Wahab ve ark. 2001).

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmanın amacı, kompozit yama ile onarılmış cam/epoksi kompozit boruların, tekrarlı iç basınç etkisi altında yorulma ömrünü ve yorulma hasar davranışını araştırmaktır. Borulara açılan yüzey çentiklerinin boyutları a/c=0.2 ve a/t=0.75 oranına sahiptir. Filaman sarım açıları ±55° dir. Yorulma deneyleri yapılırken borulara uygulanan basınç, hasarsız borunun statik patlama basıncının %35, %40 ve %45'i kadar alınmıştır. Yorulma yük oranı R=0.05 ve frekans f=0.416 olarak alınmış ve sabit tutulmuştur. Deney boyunca onarılmış boruların yorulma hasar davranışı incelenmiştir. Hasar ilerlemesi gözlendiği anda çevrim sayısı kaydedilmiş ve hasarın fotoğrafı çekilmiştir.

Ayrıca çentiksiz ve yüzey çentikli yamasız boruların da tekrarlı iç basınç tesiri altında yorulma davranışlarını belirlemek amacı ile yorulma deneyleri yapılmıştır.

6.1. Kompozit Boruların Üretimi

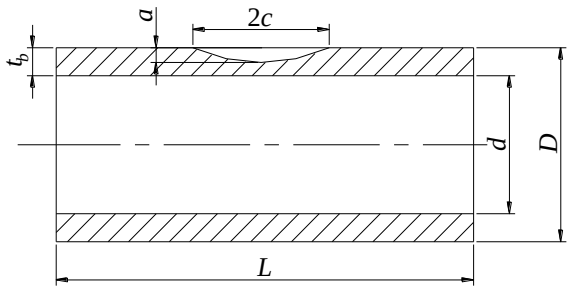
Wild ve Vickers (1997), filaman sarım kompozit basınçlı kaplar için optimum sarım açısını netting analiz ile 54.74^{o} olarak belirlemiştir. Buna dayanarak bu çalışmada da boru sarım açısı ±55° olarak belirlenmiştir. Cam/epoksi kompozit borular İZOREEL Kompozit İzole Malzemeler San. ve Tic. Ltd. Şti.'ne ürettirilmiştir. Kompozit borular yaş sargı metodu ile üretilmiştir. Boru üretiminde 17 µm çapında Vetrotex 1200 teks E-camı elyaf ve 100:90:0.5 ağırlık oranına sahip CIBA-GEIGY LY 556/HY 917/DY 070 Bisphenol-A Epoksi reçine sistemi kullanılmıştır. Yaş sargı metodunda elyaflar öncelikle 60 ^{o}C'lik reçine banyosundan geçirilmiştir. Kompozit borunun mandrelden kolay çıkması için çapı 72 mm, uzunluğu 1 m olan mandreller üzerine QZ-13 kalıp ayırıcı sürülmüştür. Reçine banyosundan geçirilen elyaflar mandreller üzerine, boru ekseni ile ±55° açı yapacak şekilde sarılmışlardır. Helisel sarma işlemine kompozit borunun toplam kat sayısı altı oluncaya kadar devam edilmiştir. Sarım işlemi bittikten sonra kompozit borular önce 135 ^{o}C'de, daha sonrada 150 ^{o}C'de 2 şer saat süre ile fırında kür edilmiştir. Kür

işleminden sonra kompozit borular her bir deney numune uzunluğu 300 mm olacak şekilde kesilmiştir. Böylece uzunluğu 300 mm, iç çapı 72 mm ve ortalama kalınlığı 2.3 mm olan borular elde edilmiştir. Çizelge 6.1'de kompozit boruların üretiminde kullanılan elyaf ve matriks malzemesinin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 6.1. Kompozit boru üretiminde kullanılan elyaf ve matriks malzemesinin mekanik özellikleri (Samancı 2004)

	E (GPa)	$\sigma_{çek}$ (MPa)	ρ (g/cm^3)	ε_{kop}	ν
Vetrotex 1200 teks E camı	73	2400	2.6	1.5-2	0.25
Ciba Geigy CY 225 Epoksi reçine	3.4	50-60	1.2	4-5	0.38

Kompozit borulara freze tezgahında *a/c* oranı 0.2 ve *a/t* oranı 0.75 olan ve boru eksenine paralel yüzey çentikleri açılmıştır. Uzunluğu 17.25 mm olan yüzey çentiklerinin genişliği 1 mm alınmıştır. Şekil 6.1'de boru ve çentik geometrisi gösterilmiştir.



L : Boru uzunluğu
D : Boru dış çapı
d : Boru iç çapı
t_b : Boru kalınlığı
$2c$: Çentik uzunluğu
a : Çentik derinliği

Şekil 6.1. Kompozit boru ve yüzey çentiği geometrisi

6.2. Yüzey Çentikli Boruların Onarımı

Çentikli boruların yüzeyi onarılmadan önce mekanik ve kimyasal olarak hazırlanmıştır. Boru yüzeyinin mekanik hazırlanmasında aşındırıcı olarak zımpara kağıdı kullanılmıştır. Boruların onarılacak bölgesi işaretlendikten sonra bu bölge torna tezgahında zımpara kağıdı ile zımparalanmıştır. Bu şekilde boru yüzeyi pürüzlü hale getirilerek yamanın boru yüzeyine daha iyi bağlanması sağlanmıştır.

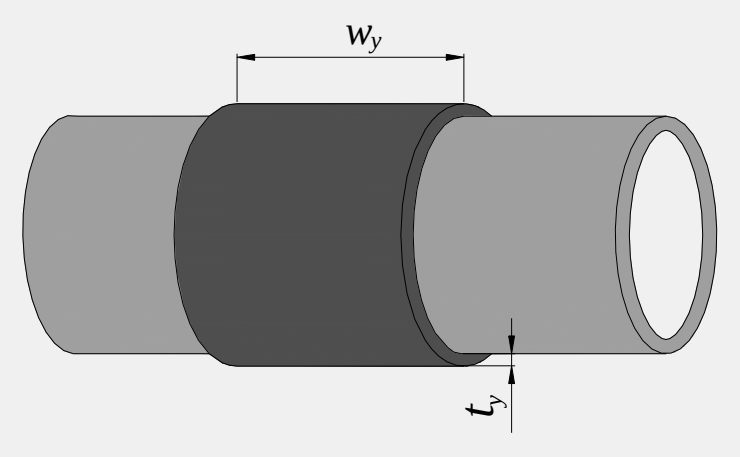
Kimyasal hazırlama için ise aseton kullanılmıştır. Pürüzlendirilen boru yüzeyleri aseton ile temizlenerek, onarım öncesi her türlü kir, yağ ve benzeri istenmeyen etkenlerin yüzeyden uzaklaştırılması sağlanmıştır.

Boruların onarılacak yüzeyleri mekanik ve kimyasal olarak hazırlandıktan sonra onarım işlemlerinde kullanılmak üzere 0.15 mm kalınlıklı, 200 g/m^2'lik E-camı kumaştan 100 mm genişliğindeki kumaşlar kesilmiştir. Şekil 6.2'de genişliği w_y ve kalınlığı t_y olan yama ile onarılmış boru gösterilmiştir. E-camı kumaş mukavemetli, ucuz ve kolay temin edilebilir olmasından dolayı tercih edilmiştir.

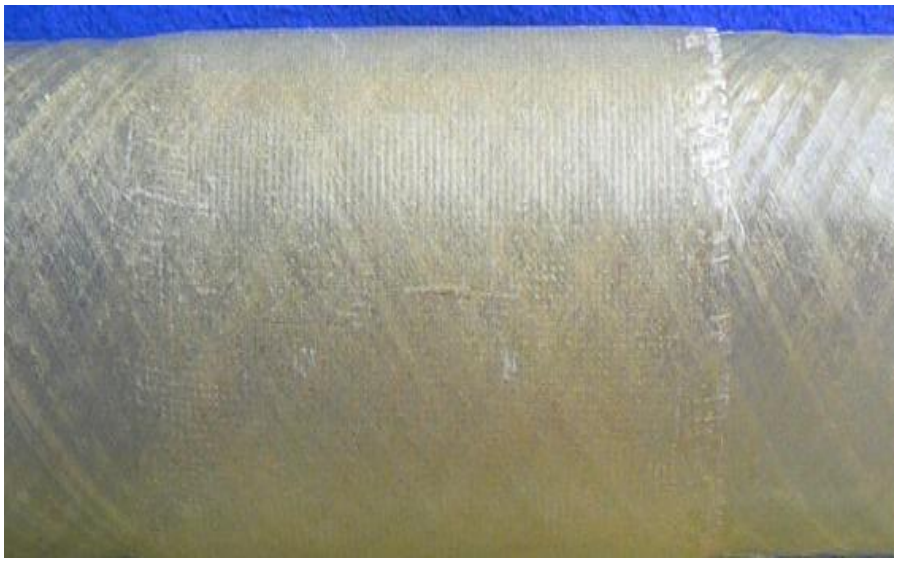
Kesilen cam kumaşlar fırça yardımıyla epoksi yapıştırıcı ile doyurularak boru üzerine sarılmıştır. Yama iki, üç, dört, beş, altı ve yedi katlı olacak şekilde sarım işlemine devam edilmiştir. Sarım işlemleri sırasında yamanın başlangıç ve bitiş kenarlarının çentik yüzeyinin tam tersinde olmasına, her kata uygulanan sarım gerginliğinin aynı olmasına ve hava kabarcığı oluşmamasına dikkat edilmiştir.

Sarım işlemi sonrasında yama yüzey pürüzlülüğünün sağlanması, yamanın boruya sıkı bağlanması ve kür işlemi sırasında reçinenin akmaması için yama yüzeyi polietilen film ile sarılmıştır.

Yama yüzeyi film ile sarılan boruların fırında 120 ^{o}C'de 3 saat kürlenmesiyle onarım işlemi tamamlanmıştır. Şekil 6.3'te onarım işlemi tamamlanmış kompozit boru görülmektedir.



Şekil 6.2. Yama geometrisi



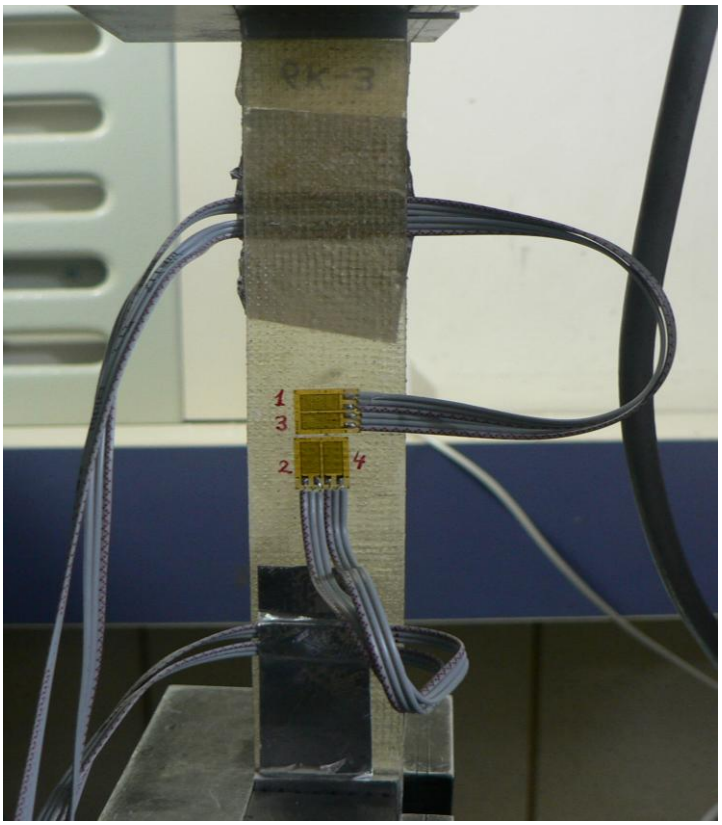
Şekil 6.3. Onarım işlemi tamamlanmış yüzey çentikli kompozit boru

6.3. Kompozit Yamanın Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Kompozit yamanın mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ASTM D 3039 standardına göre 250 mm uzunluklu ve 25 mm genişlikli çekme numuneleri hazırlanmıştır. Çekme numuneleri E-cam kumaş ve Ciba Geigy, Bisphonel A, Epoksi CY 225 epoksi reçineden imal edilmiştir. Numuneler el yatırma metoduna göre iki, üç, dört, beş ve altı katlı olacak şekilde hazırlanıp 3 saat süreyle 80^{o}C'de kür

edilmiştir. Elyaf hacim oranı 0.3 olan her bir yama tipinden üçer adet deney numunesi hazırlanarak çekme testleri yapılmıştır.

Kompozit yamanın poisson oranını belirlemek için strain-gage kullanılmıştır. Strain-gage yapıştırılacak yama numune yüzeyi önce zımparalanmış ve sonra aseton ile kimyasal olarak temizlenmiştir. Biri eksenel diğeri ise enine şekil değişimini ölçmek üzere iki strain-gage, birbirine dik olacak şekilde yama numune yüzeyine yapıştırılmıştır. Her bir strain-gage yarım köprü olup ikisi birlikte Tam Köprü III devresini oluşturmuştur. Strain-gage yapıştırılmış deney numunesi Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Çekme testi sonucunda elde edilen şekil değişimi verilerine göre yamanın poisson oranı belirlenmiştir.



Şekil 6.4. Altı katlı yama üzerine strain-gage yapıştırılmış çekme deney numunesi

Kompozit boru ve yama yakma deneyleri ASTM D 2584'e göre yapılmıştır. ±55° sarım açılı kompozit borudan üç adet 50 mm uzunluğunda yakma deney

numunesi kesilmiştir. Bu numunelerin ağırlıkları hassas terazi kullanılarak tespit edilmiştir. Numuneler sıcaklığı 600 ^{o}C olan fırında reçine tamamen yanıncaya kadar yakılmıştır. Yakma işlemi sonrası geriye sadece cam elyaf kalmıştır. Cam elyafın ağırlığı hassas terazide tartılarak belirlenmiştir. Toplam ağırlıktan elyaf ağırlığının çıkarılması ile reçine ağırlığı tespit edilmiştir. Elyaf hacim oranı Denklem 6.1 ile belirlenmiştir. Cam elyafın yoğunluğu ρ_f =2.6 g/cm^3'tür.

$$V_f = (W_f / \rho_f) / (W_c / \rho_c) \tag{7.1}$$

Burada W_f elyafın, W_c kompozitin ağırlığı ve ρ_f elyafın, ρ_c kompozitin yoğunluğudur.

Yama yakma deneyi için ise 300 mm genişliğindeki cam kumaş, Ciba Geigy, Bisphonel A, Epoksi CY 225 epoksi ile doyurularak 72 mm çapındaki malafa üzerine iki, üç, dört, beş ve altı kat olacak şekilde elle sarılmıştır. Hazırlanan yamalar 80 ^{o}C'de 3 saat süreyle kür edilmiştir. Kür sonrası her tip yamadan 50 mm uzunluğunda üçer adet yakma deney numunesi kesilmiştir. Bu deneyler de boru yakma deneyinde olduğu gibi yapılmış ve böylece kompozit yamaların elyaf hacim oranı belirlenmiştir.



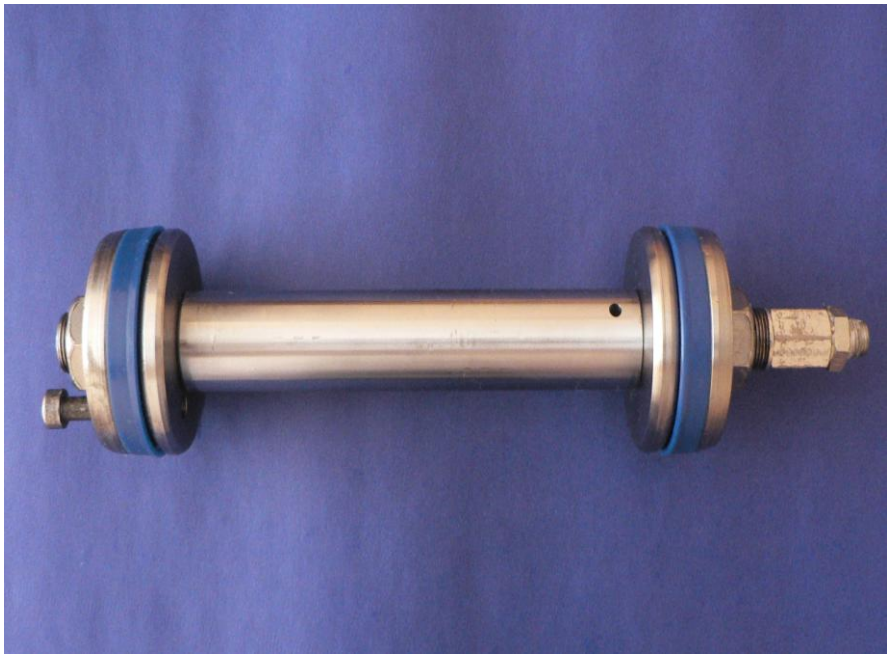
Şekil 6.5. Tek bindirmeli birleşim deney numuneleri

Boru ile yama arasındaki kayma mukavemetinin belirlenmesi için ASTM D 5868 standardına göre Şekil 6.5'te gösterilen tek bindirmeli birleşim deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler için 100 mm uzunluklu ve 25 mm genişlikli boru numunesi ile aynı boyuttaki yama numunesi, bindirme yüzey alanı 25x25mm olacak şekilde yapıştırılmıştır. Yapıştırıcı olarak onarım işlemlerinde kullandığımız Bisphenol A, Epoxy CY-225 reçine, Anhydride HY-225 sertleştirici kullanılmıştır. Yapıştırma sonrası birleşim 80 ^{o}C'de 3 saat süreyle kür edilmiştir. Bu numuneden üçer adet hazırlanarak çekme deneyleri yapılmıştır.

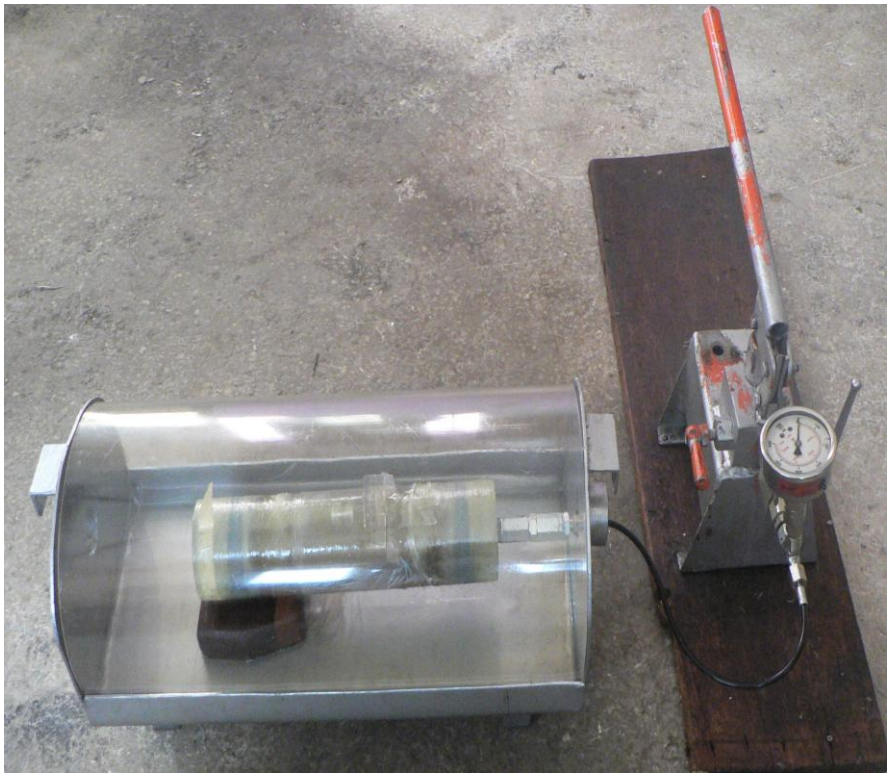
6.4. Serbest Uçlu Statik İç Basınç Deneyleri

±55° sarım açılı çentiksiz cam/epoksi kompozit boruların serbest uçlu statik iç basınç deneyi Samancı (2004) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan kompozit boruların boyutları, elyaf hacim oranı ve kür parametreleri, Samancı (2004) tarafından kullanılan borularla aynı olduğu için çentiksiz borunun serbest uçlu statik iç basınç deney sonucu için Samancı (2004) referans alınmıştır.

Onarımın etkinliğinin değerlendirilmesi amacıyla yüzey çentikli boruların statik iç basınç deneyleri yapılmıştır. Serbest uçlu iç basınç elde etmek amacıyla Şekil 6.6'da gösterilen aparat kullanılmıştır. Bu aparat çelik milden yapılmış olup milin her iki ucuna vida açılmıştır. Vida açılmış milin her iki ucuna çelik flanşlar, flanşlar üzerine ise yüksek basınca dayanıklı, sızdırmazlığı sağlayan keçeler geçirilmiştir. Statik iç basınç testi için Şekil 6.7'de gösterilen düzenek kullanılmıştır. Serbest uçlu iç basınç aparatı boru içerisine geçirildikten sonra iç basınç düzeneği ile aparat arasındaki bağlantı hidrolik elemanlar ile sağlanmıştır. Deney öncesinde boru, koruma amaçlı cam mika bir kabin içerisine yerleştirilmiştir. İki, üç, dört, beş, altı ve yedi katlı yama ile onarılmış borulara, son hasar meydana gelinceye kadar 10 bar/dk'lık artış hızı ile iç basınç uygulanmıştır. Deney esnasında hasar mekanizması incelenmiştir. Hasar gözlendikçe hasarın meydana geldiği basınç değeri kaydedilerek hasarın fotoğrafı çekilmiştir.



Şekil 6.6. Serbest uçlu iç basınç aparatı



Şekil 6.7. Statik iç basınç deney düzeneği

6.5. Serbest Uçlu Yorulma İç Basınç Deneyleri

Yorulma deneyleri için Şekil 6.8'de gösterilen PLC kontrollü yorulma iç basınç deney cihazı kullanılmıştır. PLC kontrol ünitesi analog/dijital çevirici, merkezi işlem ünitesi ve dijital ekrandan oluşmaktadır. Hidrolik güç ünitesinin tank hacmi 40 litre olup ünitede basınç değeri 150 bar, debisi 8 *l*/dak olan bir dişli pompa mevcuttur. Sistemde hidrolik akışkan olarak HD 32 hidrolik yağ kullanılmıştır. Hidrolik sisteme aynı anda üç adet deney numunesi bağlanabilir.

Yorulma iç basınç deney cihazındaki dijital ekran, sistemin üst ve alt basıncı ile frekans ve çevrim sayısı değerlerini sürekli olarak göstermektedir. PLC ünitesinin kalibrasyonu dijital ekrandan okunan basınç değerleri ile sistemde mevcut olan analog manometreden okunan basınç değerlerinin karşılaştırılması ile yapılmıştır.



Şekil 6.8. PLC kontrollü yorulma iç basınç deney cihazı

Yorulma iç basınç deneyleri ASTM D 2992 standardına göre yapılmıştır. Serbest uçlu iç basınç temin edilmesini sağlayan aparat boru içerisine geçirildikten sonra boru, cam mika bir kabin içerisine yerleştirilmiştir. Borunun hidrolik güç ünitesi ile bağlantısı sağlandıktan sonra PLC ünitesinden üst ve alt basınç değerleri girilerek sistem çalıştırılmıştır. Sistem basıncı, çentiksiz borunun statik patlama basıncının %35, %40 ve %45'i kadar olacak şekilde ayarlanmıştır. Deney boyunca yorulma yük oranı $R=\sigma_{min}/\sigma_{max}=0.05$ ve frekans değeri $f=0.416$ Hz (dakikada 25 çevrim) olacak şekilde sabit tutulmuştur. Hasar ilerlemesi gözlenmiş ve hasar ilerledikçe her hasara karşılık gelen çevrim sayısı kaydedilerek hasarın fotoğrafı çekilmiştir.

7. SONLU ELEMANLARLA GERİLME ANALİZİ

Yüzey çentikli ve yama ile onarılmış borularda sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme analizi yapılmış ve yamanın etkinliği incelenmiştir. Dört değişik genişlikte ve altı değişik sayıda katlı yamalar göz önüne alınmıştır. Farklı yama genişliklerinin ve kat sayılarının gerilme dağılımı üzerine etkisini görmek için onarılmış boru sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmiştir. Ayrıca yamasız çentikli ve çentiksiz boruların da analizi incelenmiştir. Geometri ve yüklemenin simetrikliğinden dolayı onarılmış borunun 1/4'ü modellenmiştir. Modellemede boru ve yama tabakalı yapıya sahip olduğu için SOLID 46 eleman tipi seçilmiştir. Kompozit boru ve yamanın malzeme özellikleri Çizelge 7.1'de verilmiştir. Kırılma kriteri olarak kompozit malzemelerin hasar analizinde en çok kullanılan kriterlerden biri olan Tsai-Wu kırılma kriteri esas alınmıştır.

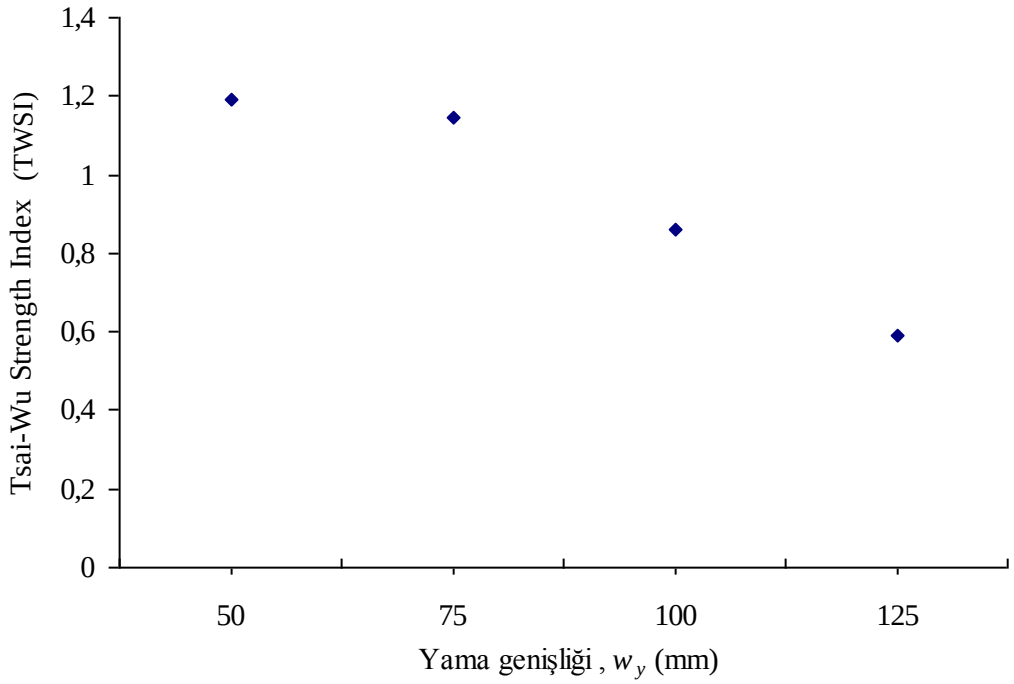
Yama kat sayısı yedi iken genişliğin etkisini görmek için 50, 75, 100 ve 125 mm olmak üzere dört farklı yama genişliği seçilerek incelenmiştir.

Çizelge 7.1. Tek kat boru ve yamanın mekanik özellikleri

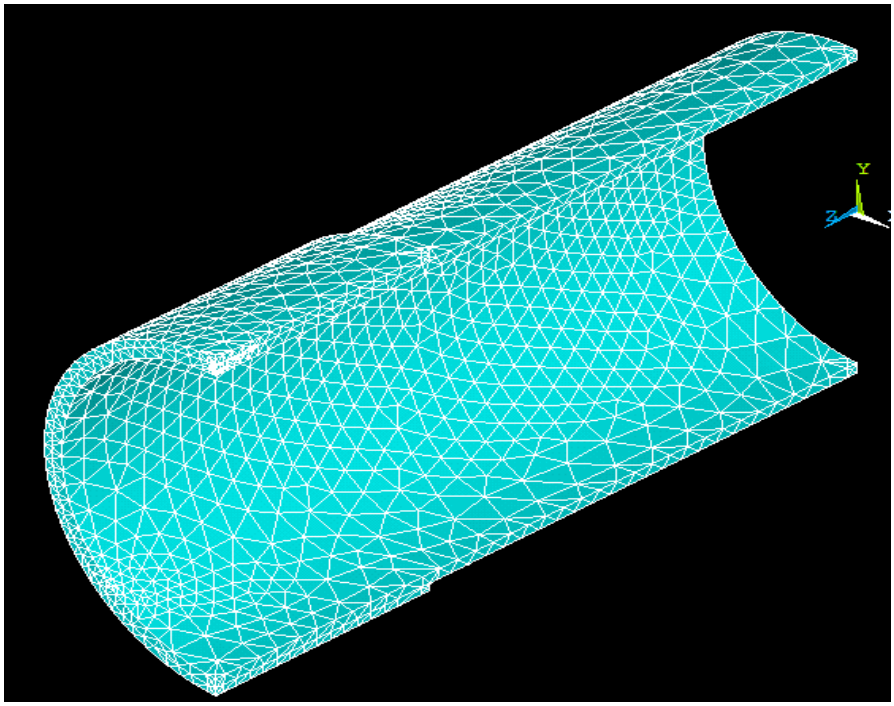
	Boru (Uyaner ve Kara, 2007)	Yama
Boylamasına modül, (GPa)	42	22
Enine modül, (GPa)	9.5	22
Kayma modülü, (GPa)	3.5	1.728
Poisson oranı	0.34	0.16
Boyuna çekme dayanımı, (MPa)	690	292
Enine çekme dayanımı, (MPa)	66	292
Boyuna basma dayanımı, (MPa)	300	145
Enine basma dayanımı, (MPa)	147	145
Kayma dayanımı, (MPa)	56	30

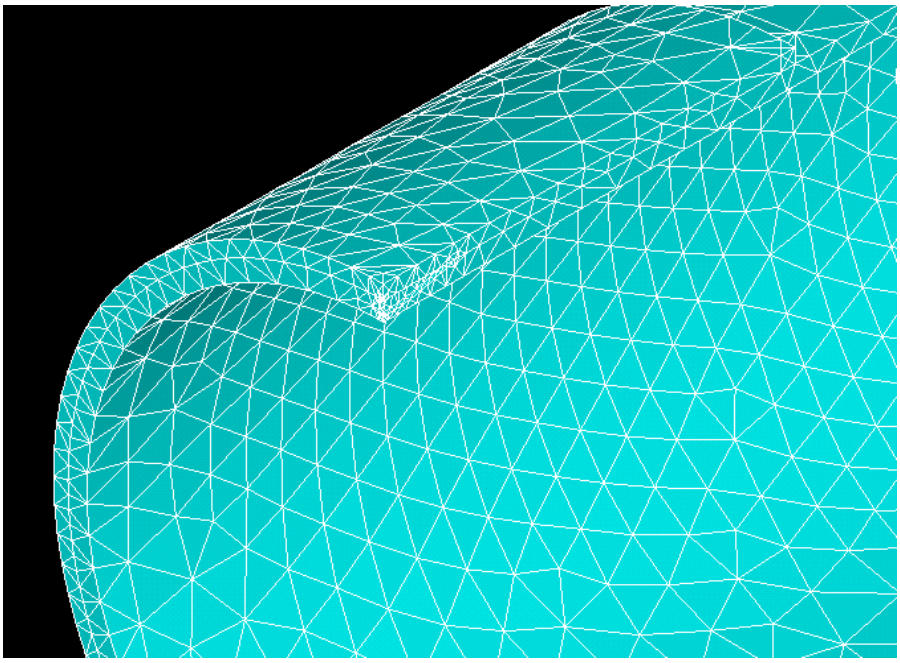
Şekil 7.1'de yedi katlı yama ile onarılmış boruda, yama genişliği 50 mm'den 125 mm'ye kadar artırıldıkça Tsai-Wu Strength Index (TWSI) değerinin azaldığı görülmektedir. Bu analizde borulara, çentiksiz borunun hasarının başladığı basınç değeri uygulanmıştır. TWSI değerinin 1 olması hasarın başladığını göstermektedir. Grafikten görüldüğü üzere yama genişliği arttıkça hasarın başladığı değerden uzaklaşılmaktadır.

Yama genişliği arttıkça yama ile boru temas yüzey alanı artmaktadır. Yama genişliği ne kadar fazla olursa, hasar bölgesindeki gerilme de o kadar az olur. Ancak, yama genişliği hasar boyutu ile orantılı olmalıdır. Marioli-Riga ve ark. (2004), her hangibir yöndeki yama uzunluğunun çatlak uzunluğunun en az 4-5 katı kadar olması gerektiğini çalışmalarında ifade etmiştir. Yama genişliği 100 mm olarak alınmıştır. İki, üç, dört, beş, altı ve yedi katlı olmak üzere altı değişik sayıda yama için çözümler yapılmıştır.



Şekil 7.1. Yama genişliği ile TWSI değerinin değişimi



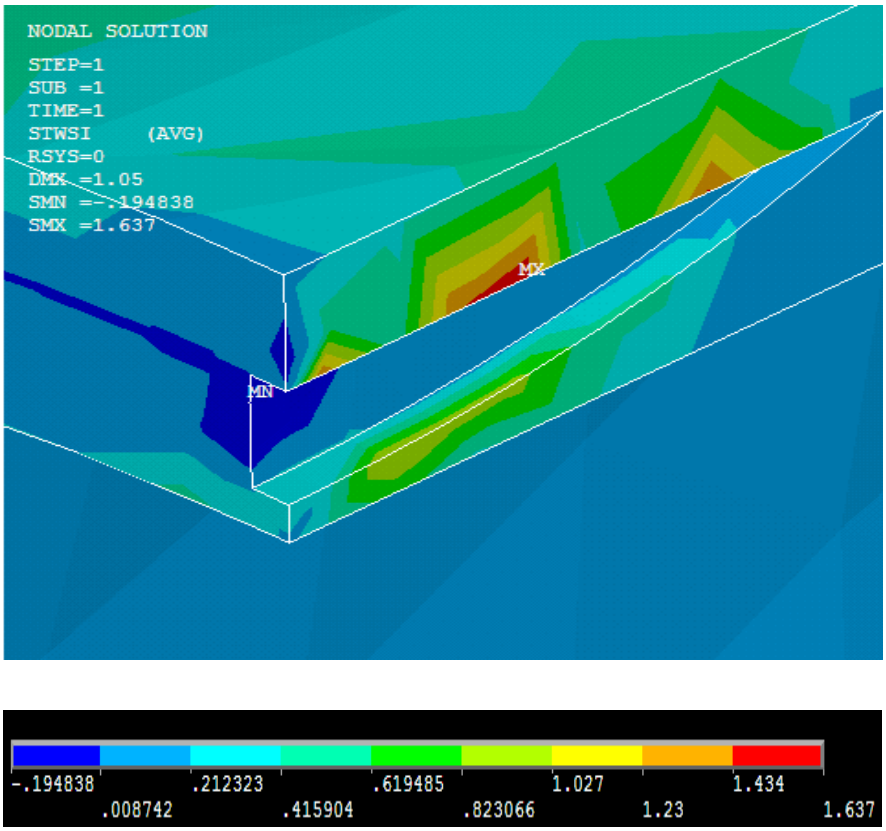


Şekil 7.2. Yamalı borunun sonlu elemanlara bölünmüş hali

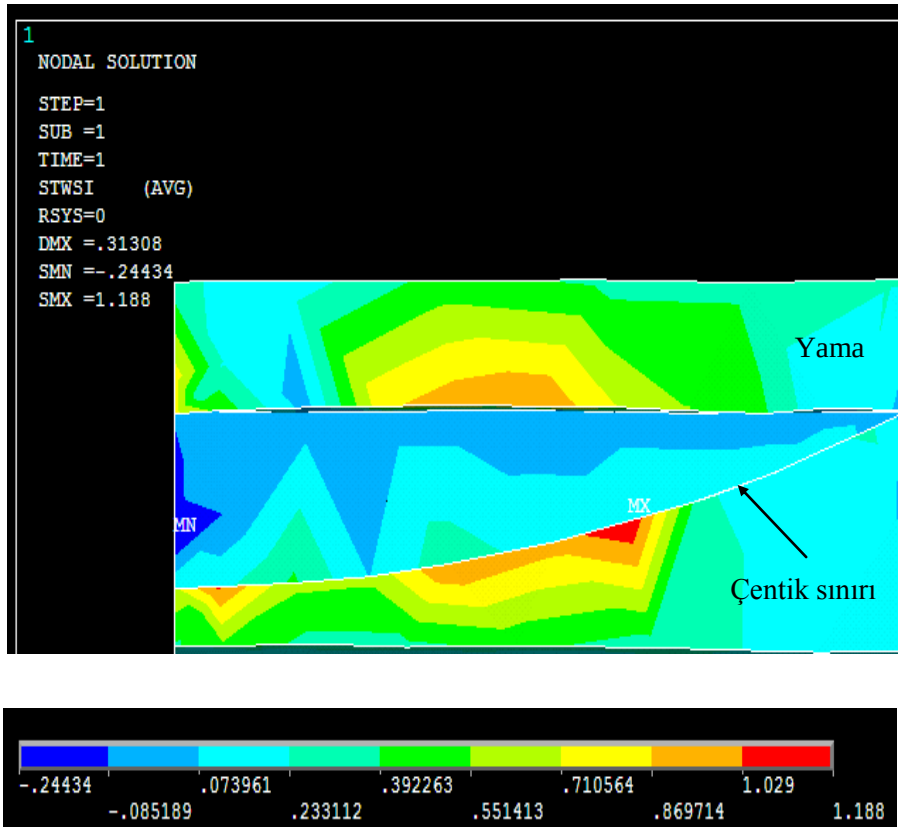
Yamalı borunun sonlu elemanlara bölünmüş hali Şekil 7.2'de verilmiştir. Şekil 7.3'te ise beş katlı ve 100 mm genişliğindeki yama ile onarılmış borunun çentik

bölgesindeki TWSI dağılımı görülmektedir. Maksimum TWSI değeri çentik dibinde meydana gelmiştir.

Yedi katlı ve 100 mm genişliğindeki yama ile onarılmış borunun çentik bölgesindeki TWSI dağılımı Şekil 7.4'te görülmektedir. Bu analizde maksimum TWSI değeri yamada meydana gelmiştir. Yama, çentik bölgesindeki TWSI değerini azaltmıştır.

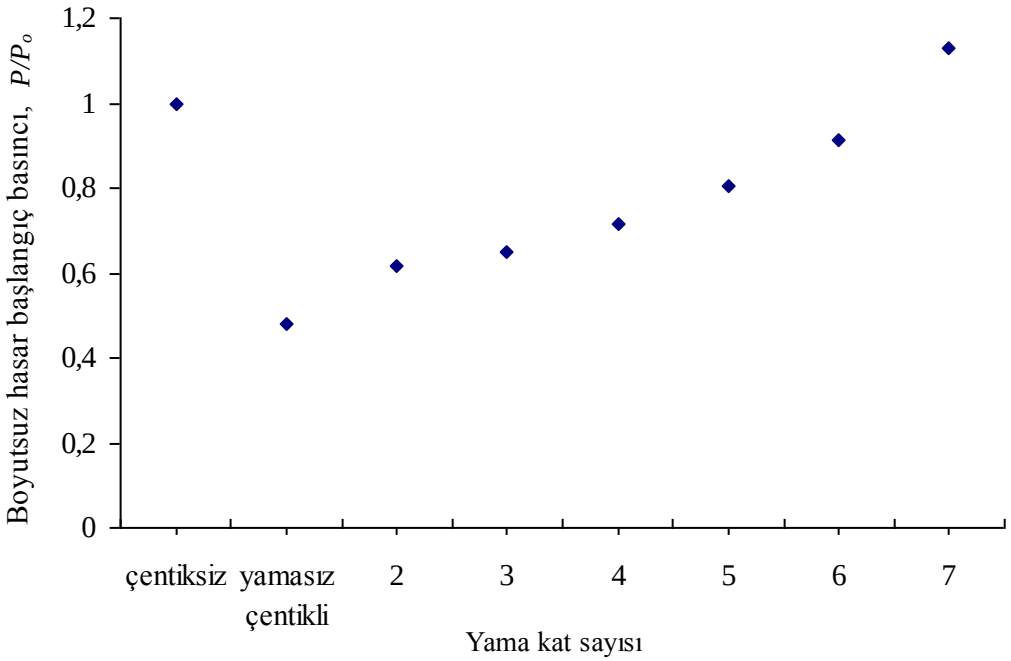


Şekil 7.3. Yedi katlı ve 100 mm genişliğindeki yama ile onarılmış borunun çentik bölgesinde TWSI dağılımı



Şekil 7.4. Beş katlı ve 100 mm genişliğindeki yama ile onarılmış borunun çentik bölgesinde TWSI dağılımı

Yama genişliği 100 mm iken boyutsuz hasar başlangıç basınç değerinin (P/P_o) yama kat sayısı ile değişimi Şekil 7.5'te görülmektedir. Boyutsuz hasar başlangıç basıncı, analizi yapılan borunun hasarının başladığı basınç değerinin çentiksiz borunun hasarının başladığı basınç değerine oranı olarak alınmıştır. Bu analizde, Tsai-Wu Strength Index değeri (TWSI) 1 oluncaya kadar borulara farklı iç basınç değerleri uygulanmıştır. 1 değerini veren basınç, hasarın başladığı basınçtır. Grafikten, yama kat sayısı arttıkça boyutsuz hasar başlangıç basınç değerinin arttığı görülmektedir. Yani yama kat sayısı arttıkça hasar daha yüksek basınç değerinde meydana gelmektedir. Yama kat sayısının artması ile yama mukavemeti artmaktadır. Böylece hasarlı bölgedeki gerilme değerleri azalmakta ve hasar ilerlemesi yavaşlamaktadır.



Şekil 7.5. Yama kat sayısı ile boyutsuz hasar başlangıç basıncının (P/P_o) değişimi

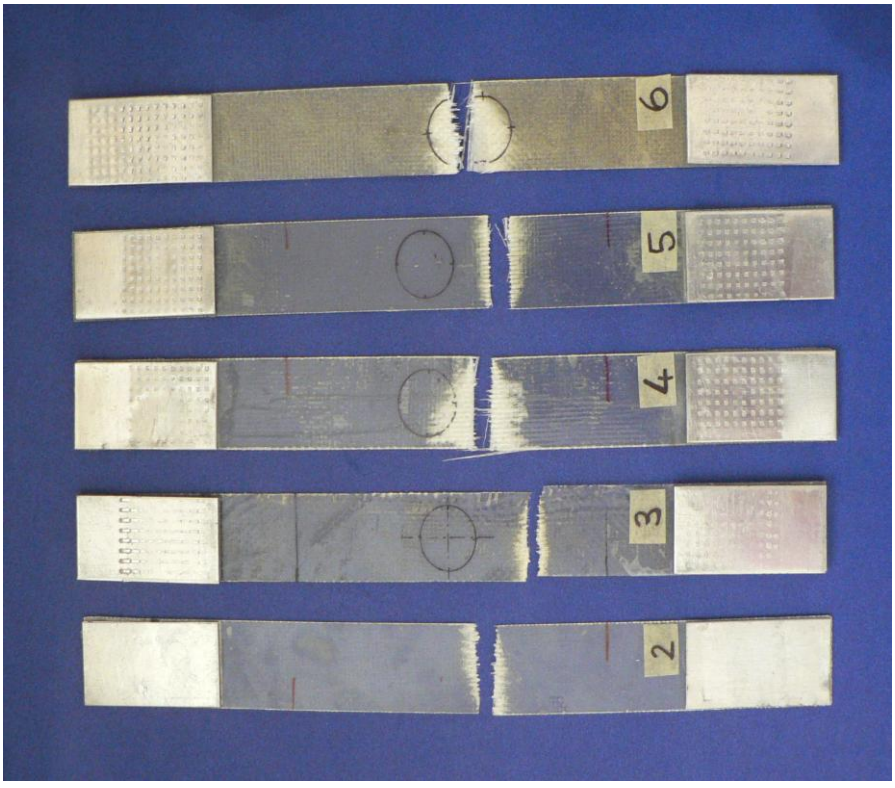
Ouinas ve ark. (2007), yarı dairesel kenar çentikli alüminyum numuneleri alüminyum yama ile onardıklarında gerilme değerinin %40, grafit/epoksi yama ile onardıklarında %46, boron/epoksi yama ile onardıklarında ise %52 oranında azaldığını görmüşlerdir. Ayrıca yama kalınlığının yaklaşık olarak %55 oranında artması ile gerilme şiddeti aynı oranda azalmıştır.

Kumar ve Hakeem (2000), merkezi çatlaklı alaşımlı alüminyum numuneleri karbon/epoksi yama ile onarmışlardır. Çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörünü azaltmada, yama kalınlığını arttırmanın yama alanını arttırmadan daha etkili olduğunu görmüşlerdir.

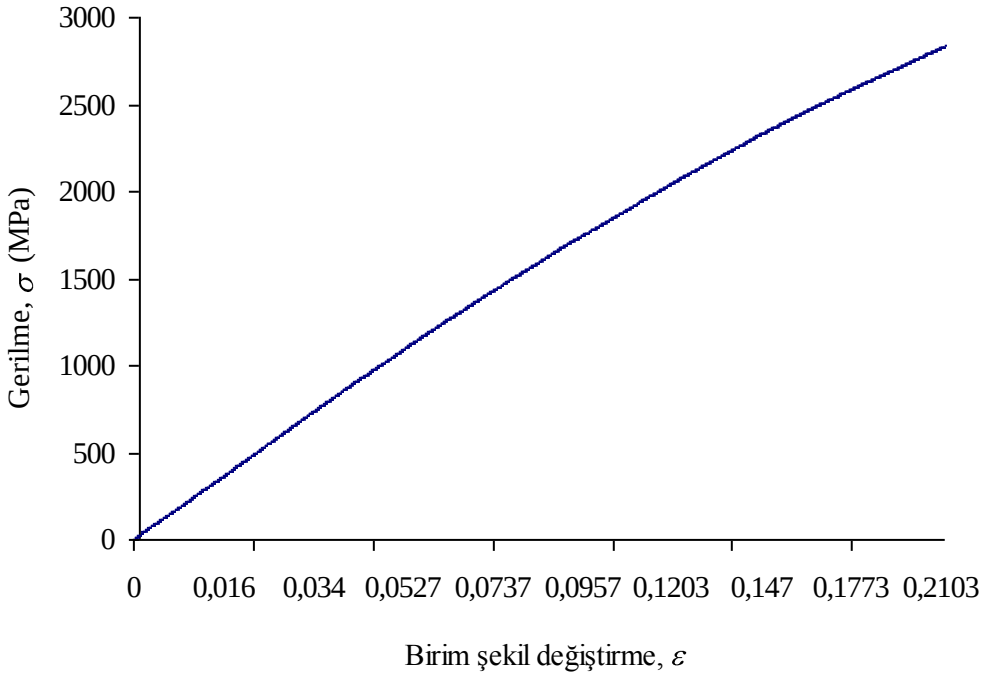
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

8.1. Kompozit Yamanın Mekanik Özellikleri

İki, üç, dört, beş ve altı katlı kompozit yamanın mekanik özelliklerinin belirlenmesi için statik çekme testleri yapılmıştır. Deney numuneleri Şekil 8.1'de gösterilmiştir. Deneyler yapılırken çekme yükü arttıkça beyazlama hasarı gözlenmiştir. Son hasar yük doğrultusundaki elyafların aniden kopması ile meydana gelmiştir. Çekme testi süresince deney cihazı, numuneye uygulanan kuvvet ile kuvvete karşılık gelen eksenel yöndeki uzama miktarını kaydetmiş ve grafiğini otomatik olarak çizmiştir. Her bir numune için kuvvet-uzama miktarı verilerinden gerilme-birim şekil değiştirme grafiği çizilmiştir. Bu grafiklerden kompozit yamanın elastisite modülü 22 GPa olarak elde edilmiştir. Şekil 8.2'de beş katlı yamanın gerilme-birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir.

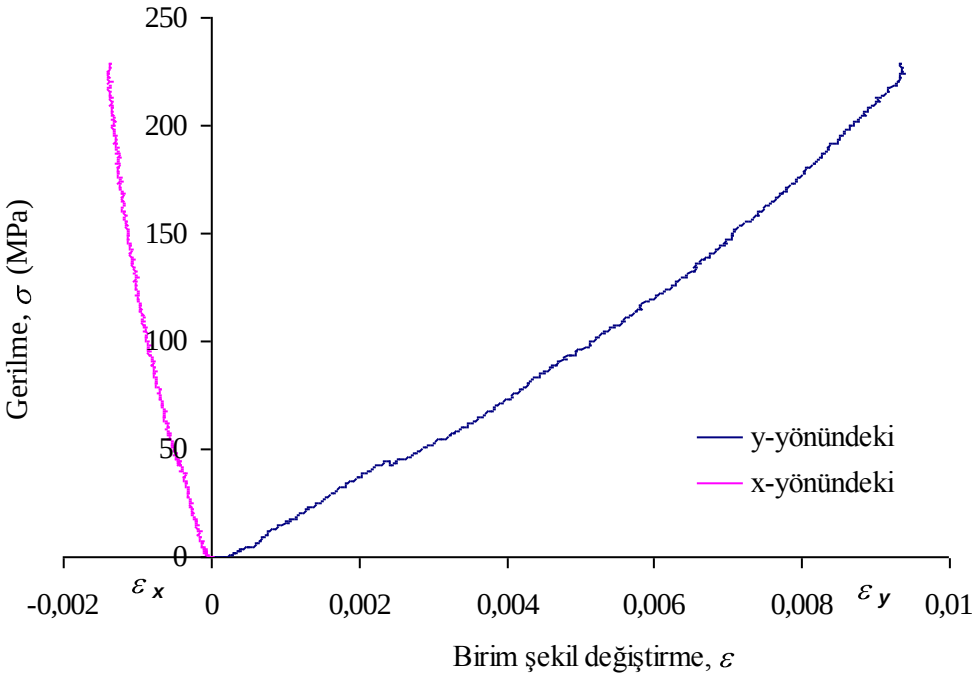


Şekil 8.1. Çekme testi yapılmış farklı kat sayılı yama numuneleri



Şekil 8.2. Beş katlı yamanın gerilme-birim şekil değiştirme grafiği

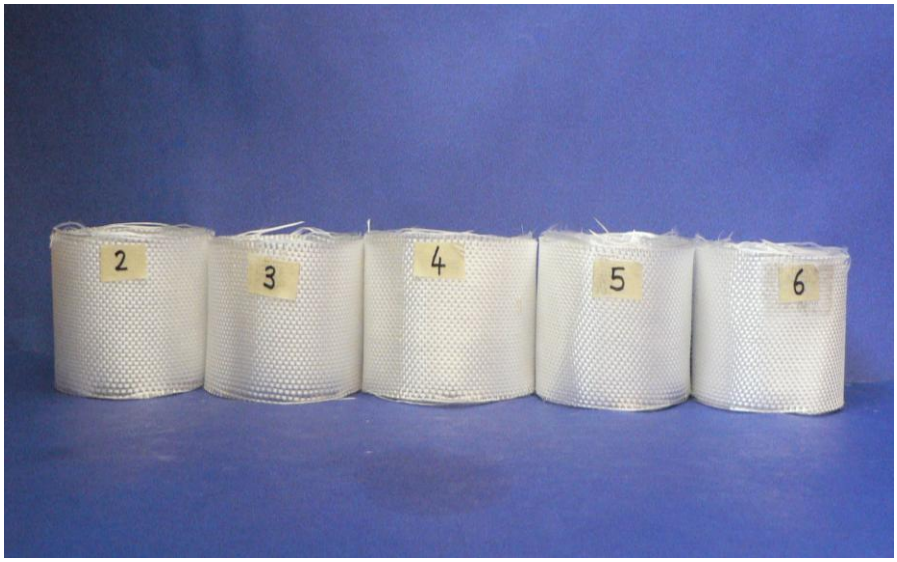
Yamanın poisson oranını belirlemek için strain-gage yapıştırılmış olan yama numunesinin çekme testinde, çekme yükü arttırıldıkça Şekil 8.3'te de görüldüğü gibi numunenin boyunda uzama meydana gelirken eni daralmıştır. Elde edilen verilere göre yamanın poisson oranı 0.16 olarak belirlenmiştir.



Şekil 8.3. Altı katlı yamanın gerilme-birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 8.4. Kompozit boru numunelerinin yakılmış hali



Şekil 8.5. Kompozit yama numunelerinin yakılmış hali

Kompozit boru ve yamanın elyaf hacim oranını belirlemek için yakma deneyleri yapılmış ve borunun elyaf hacim oranı 0.51 ve yamanın elyaf hacim oranı 0.30 olarak belirlenmiştir. Yakılmış boru ve yama numuneleri Şekil 8.4 ve 8.5'te gösterilmiştir.

Kompozit yamanın, yapılan deneyler sonucunda elde edilen mekanik özellikleri Çizelge 8.1'de verilmiştir.

Çizelge 8.1. Kompozit yamanın mekanik özellikleri

Elastisite modülü,	$E_x=E_y$ (GPa)	22
Çekme mukavemeti,	σ_y (MPa)	292
Poisson oranı,	$\nu_{xy}=-\varepsilon_y/\varepsilon_x$	0.16
Elyaf hacim oranı,	V_f	0.30

Kompozit boru ve yama arasındaki kayma mukavemetinin belirlenmesi için çekme testi yapılmıştır. Çekme kuvveti arttıkça birleşimin bindirme bölgesinde eğilme gözlenmiştir. Boru ile yama arasında oluşan soyulma ve kayma

gerilmelerinin, epoksinin kayma mukavemetini aşması durumunda yama borudan ayrılmaya başlamıştır. Bindirme bölgesinin uç kısımlarında kayma ve soyulma gerilmeleri en yüksek değerde olduğu için ayrılma, bindirme kenarlarından başlamış ve bu ayrılma yama ile boru bindirme yüzeyleri birbirinden tamamen ayrılıncaya kadar devam etmiştir. Deney sonucu elde edilen verilere göre boru ve yama arasındaki kayma mukavemeti 52.4 MPa olarak belirlenmiştir.

8.2. Serbest Uçlu Statik İç Basınç Deney Sonuçları

Çentiksiz borunun serbest uçlu statik iç basınç deneyi için Samancı (2004) referans alınmıştır. Elde edilen mekanik özellikler Çizelge 8.2'de verilmiştir.

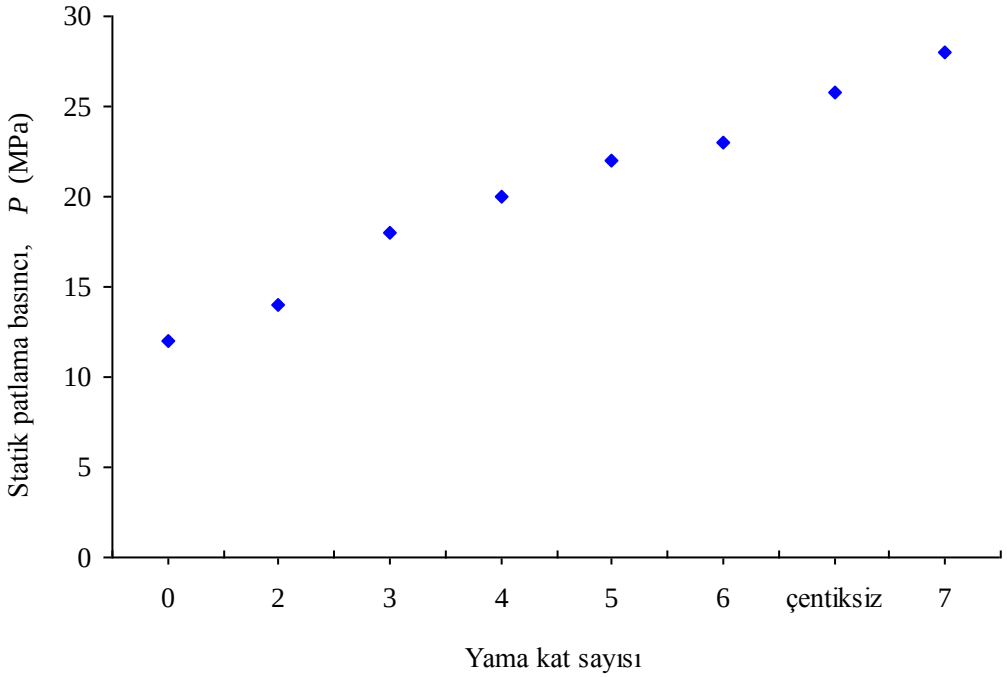
Onarılmış boruların statik iç basınç deneylerinin serbest uçlu şartlarda yapılmasından dolayı boruda yalnızca teğetsel gerilme meydana gelmiştir. Bu gerilme ile borudaki elyaf doğrultuları teğetsel yöne doğru yönlenmişlerdir. Ancak borunun üzerinde yamanın bulunması bu yönlenme davranışını sınırlandırmıştır. İlk hasar, yamanın borudan ayrılması neticesinde gözlenen beyazlama şeklinde meydana gelmiştir. Basıncın artması ile beyazlama alanında büyüme olmuştur.

Yamada elyaf-matriks ve tabakalar arasındaki bağların zayıflaması ile ayrılmalar olmuştur. Yamada 90^{o}'de dizilen elyafların teğetsel yönde gerilmesi ile elyaf kopmaları meydana gelmiştir. Basınç daha da arttırılınca son hasar artan etkisi ile boru ve yamanın birlikte yırtılması şeklinde olmuştur.

Şekil 8.6'da, yama kat sayısı arttıkça patlama basıncının arttığı görülmektedir. İki, üç, dört, beş, altı ve yedi katlı yama ile onarılmış borularda patlama basıncı, yamasız çentikli borunun patlama basıncına göre sırasıyla %16, %50, %66, %83, %91 ve %133 oranında artmıştır.

Çizelge 8.2. Çentiksiz borunun mekanik özellikleri (Samancı 2004)

Elastisite modülü, (GPa)	23.1
Teğetsel mukavemet, (MPa)	405
Poisson oranı	0.81



Şekil 8.6. Statik patlama basıncının yama kat sayısına göre değişimi

Li ve ark. (2003) dört farklı yapıştırıcı ve dört, altı ve sekiz kat cam prepreg ile uç uca birleştirilmiş 54^{o} cam/epoksi kompozit boruların statik iç basınç testini yapmışlar ve sarım sayısı arttıkça patlama basıncının arttığını görmüşlerdir. Epoksi poliamid yapıştırıcı ile uç uca birleştirilmiş boruların çevresine dört kat yama sarıldığında patlama basıncı 2.24 MPa iken altı kat sarıldığında 4.14 MPa ve sekiz kat sarıldığında 5.17 MPa olmuştur.

8.3. Yorulma İç Basınç Deney Sonuçları

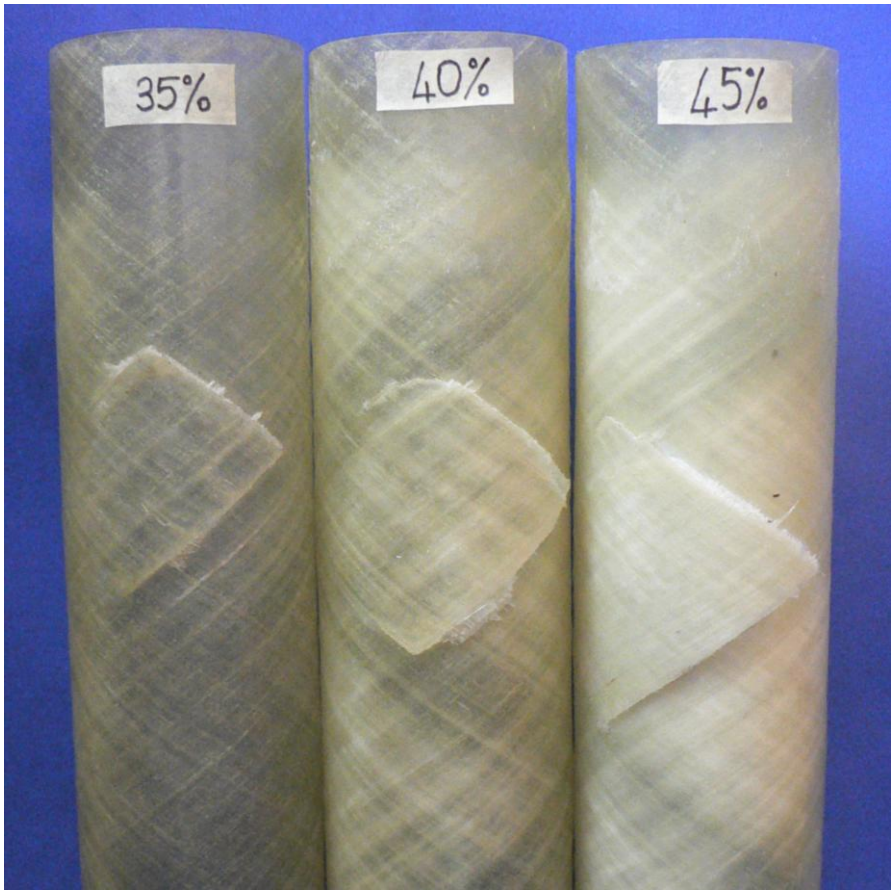
8.3.1. Çentiksiz boruların yorulması

Borunun elyaf doğrultusu teğetsel doğrultuya paralel olma eğilimi göstermiş ve neticesinde çapta artış, boyda ise kısalma gözlenmiştir. Elyafların teğetsel yönde gerilip tekrar eski haline dönmesi sonucunda elyaf-matriks ayrılmaları ile tabakalar arası ayrılmalar meydana gelmiştir. Beyazlama olarak gözlenen hasar alanı elyaf doğrultusunda artış göstermiştir. Artı ve eksi açılı elyafların kesişim noktalarında,

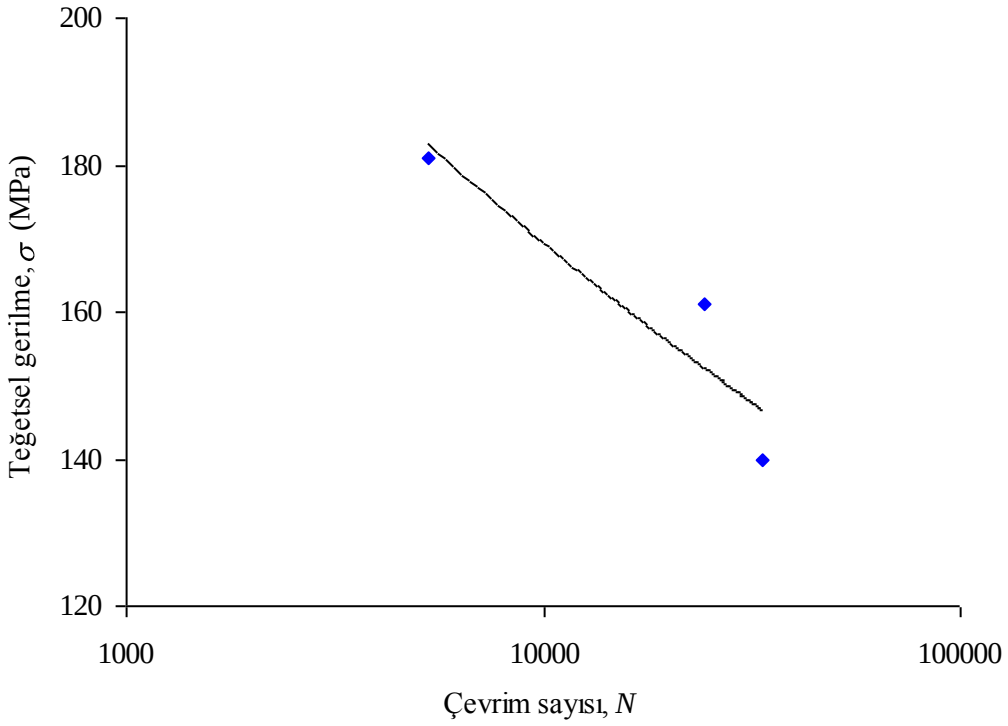
elyaflar arası sürtünme ve kayma etkisi ile elyaf doğrultusuna paralel çok küçük matriks çatlakları oluşmuştur.

Şekil 8.7'de görüldüğü gibi beyazlamanın yoğun olduğu bölgedeki elyaflarda gerilme etkisi çok daha fazla olduğu için son hasar bu bölgedeki elyafların kopması ile meydana gelmiştir. Boruda oluşan yırtığın elyaf doğrultularına paralel olduğu görülmektedir.

Uygulanan iç basınçlara karşılık gelen gerilmeler azaldıkça yorulma ömrünün arttığı Şekil 8.8'deki *S-N* grafiğinden görülmektedir Yorulma ömrü 181 MPa'da (%45P_{sta}) 5300 çevrim, 161 MPa'da (%40P_{sta}) 24400 çevrim ve 140 MPa'da (%35P_{sta}) 33500 çevrimdir. Tarakcioğlu ve ark.(2005), ±55° sarım açılı çentiksiz cam/epoksi kompozit boruların iç basınç yorulma ömrünü, %40P_{sta} basınç değerinde 3023 çevrim, %35P_{sta} basınç değerinde ise 18315 çevrim olarak belirlemişlerdir.



Şekil 8.7. Çentiksiz boruların yorulma hasarı



Şekil 8.8. Çentiksiz boruların *S-N* grafiği

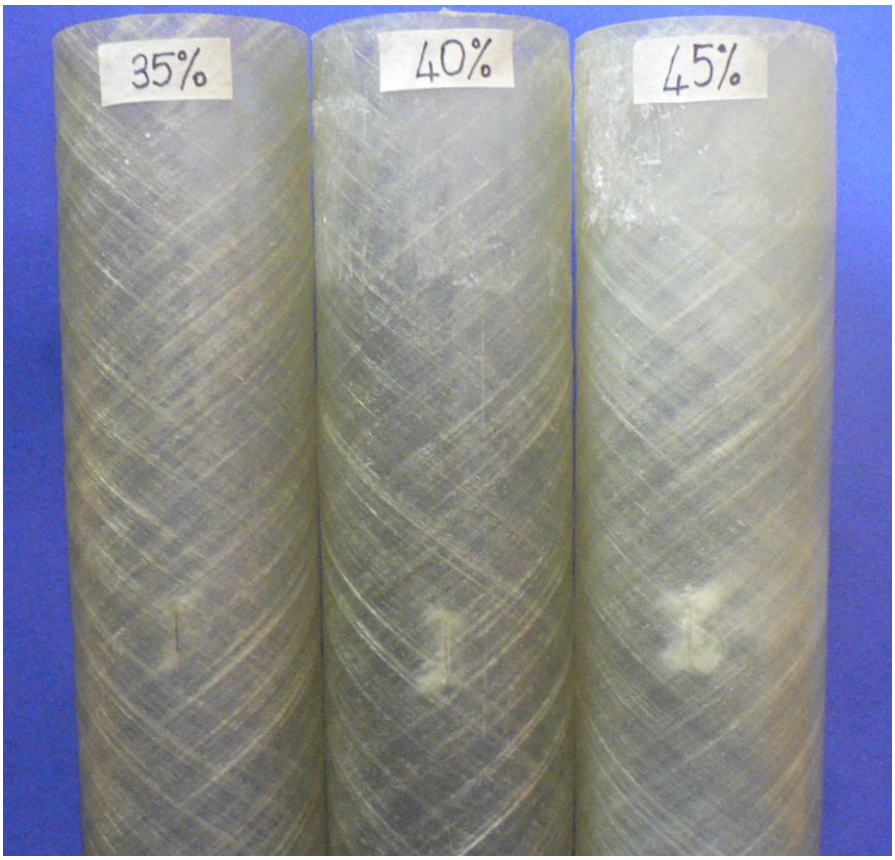
8.3.2. Yüzey çentikli onarılmamış boruların yorulması

Yüzey çentiğinden dolayı kompozit boruda meydana gelen ilk hasar, çentiğin boruyu kestiği tabakalardaki elyaf-matriks ayrılmalarından dolayı beyazlama şeklinde meydana gelmiştir. Bu ayrılma alanı çevrimle arttıkça elyaf sarım açısı yönünde genişleme göstermiştir. Son hasara kadar çentik uçlarında çatlak ilerlemesi gözlenmemiştir. Kayma gerilmesinden dolayı çentik bölgesindeki tabakalar arasında da ayrılmalar meydana gelmiştir. Elyafların teğetsel yöne doğru gerilip tekrar eski haline dönme davranışı neticesinde elyafların yük taşıma kabiliyeti azalmış ve elyaf kopmaları olmuştur.

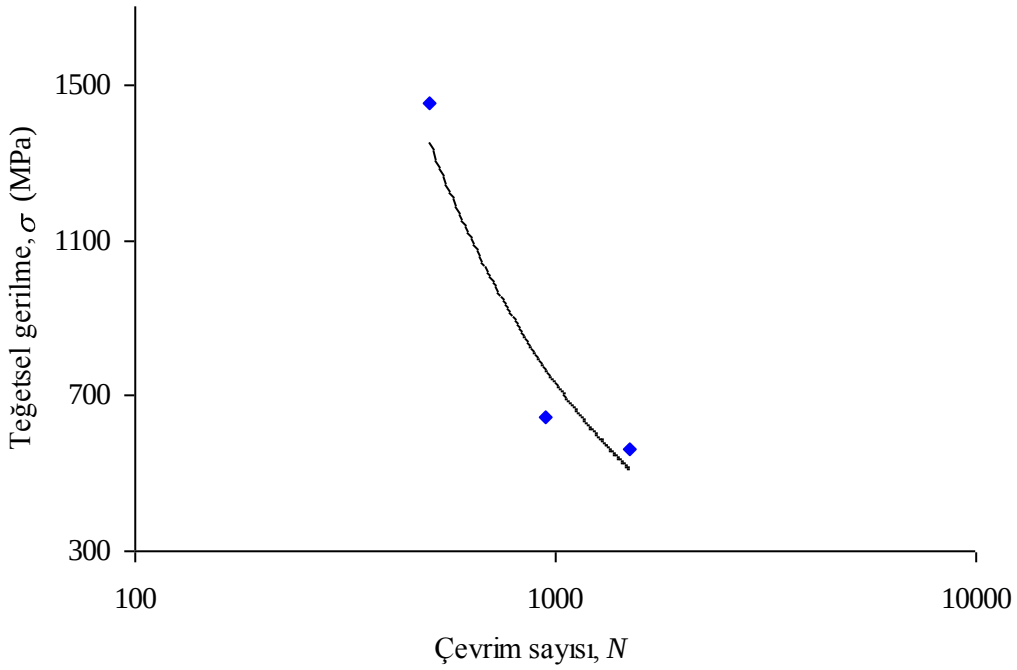
Çevrim sayısı artırıldıkça çentik dibinden yüzeye sızıntı olduğu görülmüştür. Başlangıçta çok az olan bu sızıntı çevrim sayısının daha da artması ile birlikte sıvı jetine dönüşmüştür. Daha sonra sıvı jeti genişlemiş ve elyaf kopmaları ile borunun son hasarı meydana gelmiştir.

Şekil 8.9'da yüzey çentikli boruların, %35P_{sta}, %40P_{sta} ve %45P_{sta} iç basınç değerlerinde oluşan yorulma hasarları görülmektedir.

Şekil 8.10'da da görüldüğü gibi gerilme değerinin azalması ile yorulma ömrü uzamıştır. Yorulma ömrünün 1452 MPa (%45P_{sta}) teğetsel gerilme değerinde 500 çevrim, 644 MPa'da (%40P_{sta}) 950 çevrim ve 563 MPa'da (%35P_{sta}) 1500 çevrim olduğu görülmektedir. Tarakcioğlu ve ark. (2007), ±55° sarım açılı a/c=0.2 ve a/t=0.5 oranına sahip çentikli cam/epoksi kompozit boruların iç basınç yorulma ömrünü, %40P_{sta} iç basınç değerinde 2040 çevrim, %30P_{sta} basınç değerinde ise 25446 çevrim olarak belirlemişlerdir.



Şekil 8.9. Yüzey çentikli onarılmamış boruların yorulma hasarı

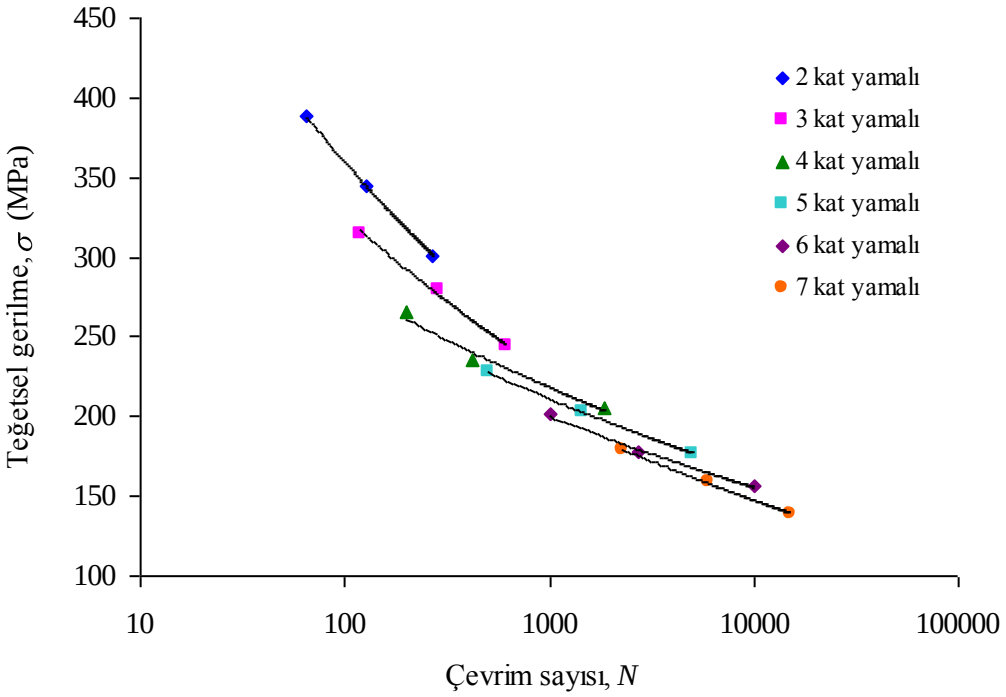


Şekil 8.10. Yüzey çentikli onarılmamış boruların *S-N* grafiği

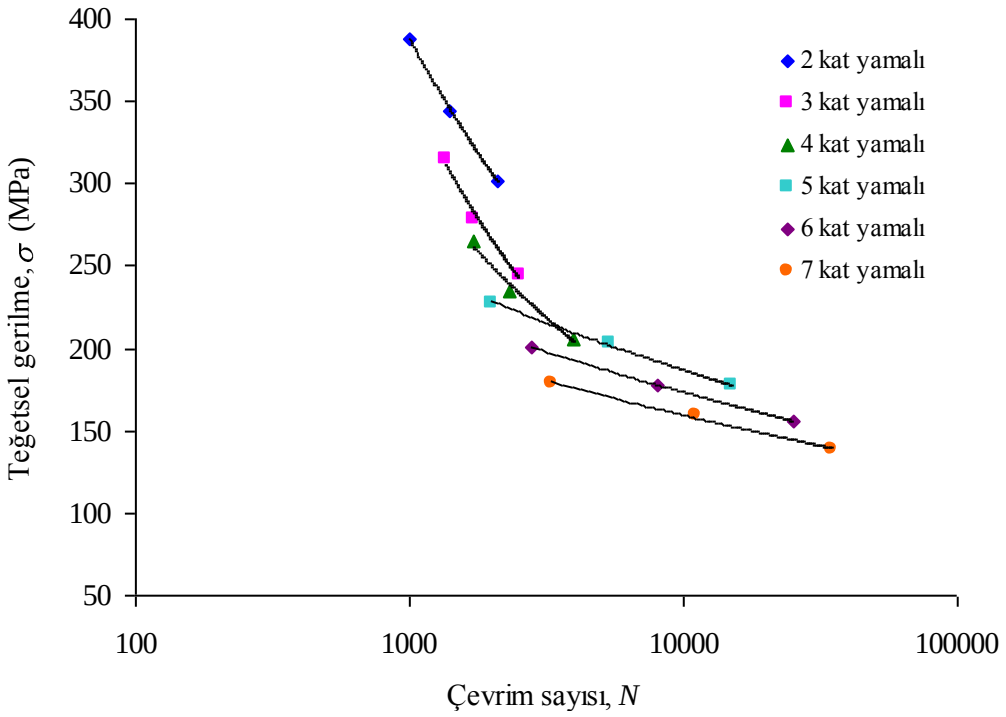
8.3.3. Yüzey çentikli onarılmış boruların yorulması

Yapılan deneylerle farklı katta yama ile onarılmış boruların beyazlama başlangıcındaki, sızıntı başlangıcındaki ve son hasara ait çevrim sayıları belirlenmiş ve *S-N* grafikleri çizilmiştir. Farklı katta yama ile onarılmış boruların beyazlama başlangıcı hasarına göre çizilmiş *S-N* grafikleri Şekil 8.11'de verilmiştir. Farklı katta yama ile onarılmış boruların sızıntı başlangıcı hasarına göre çizilmiş *S-N* grafikleri de Şekil 8.12'de verilmiştir.

Şekillerden görüldüğü üzere teğetsel gerilme değerinin azalıp yama kat sayısının artmasıyla, borudaki beyazlama ve sızıntı süreçleri daha geç meydana gelmiş ve borunun yorulma ömrü uzamıştır. Uygulanan %35P_{sta} basınç değerinde iki katlı yama ile onarılmış boruda beyazlama hasarı 270 çevrimde, üç katlı yama ile onarılmış boruda 610 çevrimde ve dört katlı yama ile onarılmış boruda 1870 çevrimde meydana gelmiştir.



Şekil 8.11. Farklı katta yama ile onarılmış boruların beyazlama başlangıcına göre çizilmiş *S-N* grafikleri



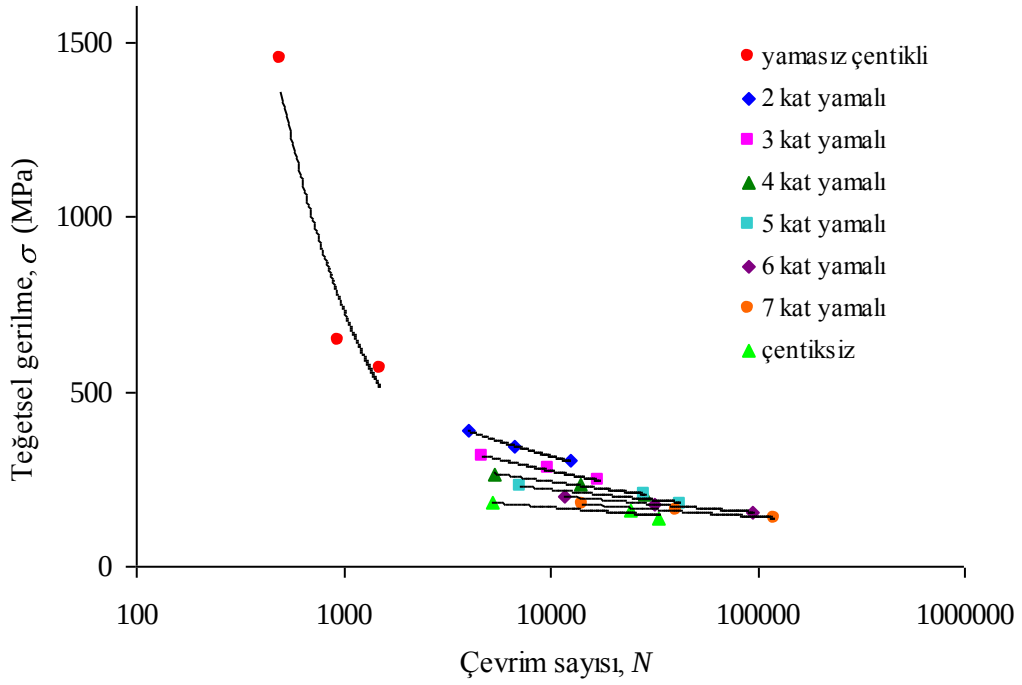
Şekil 8.12. Farklı katta yama ile onarılmış boruların sızıntı başlangıcına göre çizilmiş *S-N* grafikleri

Wang ve Pidaparti (2002) yorulma etkisi ile çatlak ilerlemesinin, yamasız tek kenar çatlaklı alüminyum numunelerinde 3000 çevrimde, bir katlı yama ile onarılmış numunelerde 12000 çevrimde, iki katlı yama ile onarılmış numunelerde 13000 çevrimde ve dört katlı yama ile onarılmış numunelerde 16000 çevrimde başladığını görmüşlerdir.

Yama kat sayısının artması ile sızıntının çentik bölgesinden yama yüzeyine ulaşması gecikmiştir. Uygulanan %35P_{sta} basınç değerinde sızıntı oluşumu, iki katlı yama ile onarılmış boruda 2100 çevrimde, üç katlı yama ile onarılmış boruda 2500 çevrimde ve dört katlı yama ile onarılmış boruda 4000 çevrimde meydana gelmiştir.

Farklı katta yama ile onarılmış boruların son hasara göre çizilmiş *S-N* grafikleri Şekil 8.13'te verilmiştir.

Şekilden yamasız yüzey çentikli borunun en az ömre sahip olduğu, yama kat sayısının artmasıyla yorulma ömrünün arttığı görülmektedir. Beş katlı yama ile onarılmış borunun çentiksiz borudan daha uzun yorulma ömrüne sahip olduğu görülmektedir. %35P_{sta} iç basınç etkisinde yamasız çentikli borunun yorulma ömrü, iki katlı yama ile 8, üç katlı yama ile 11, dört katlı yama ile 19, beş katlı yama ile 28, altı katlı yama ile 63 ve yedi katlı yama ile 80 kat artmıştır.



Şekil 8.13. Farklı katta yama ile onarılmış boruların son hasara göre çizilmiş *S-N* grafikleri

%40P_{sta} iç basınç değerinde, yamasız çentikli borunun yorulma ömrü iki katlı yama ile 7, üç katlı yama ile 10, dört katlı yama ile 14, beş katlı yama ile 30, altı katlı yama ile 33 ve yedi katlı yama ile 43 kat artmıştır.

%50P_{sta} iç basınç değerinde ise yamasız çentikli borunun yorulma ömrü, iki katlı yama ile 8, üç katlı yama ile 9, dört katlı yama ile 10, beş katlı yama ile 14, altı katlı yama ile 23 ve yedi katlı yama ile 28 kat artış göstermiştir.

Her iki sızdırmazlık keçesi civarında, basınç genliği arttıkça borudaki eğilme etkisi artmıştır. Beş, altı ve yedi katlı onarılmış boruların bu bölgelerindeki eğilme etkisini azaltmak için borular Şekil 8.14'te görüldüğü gibi dıştan dört katlı cam/epoksi kompozitle takviye edilmiştir.

Hosseini-Toudeshky (2006), 2.29 mm kalınlıklı merkezi çentikli alaşımlı alüminyum levhanın yorulma ömrünün, dört katlı yama ile onarılması durumunda %65-69, sekiz katlı yama ile onarılması durumunda %85-91 ve onaltı katlı yama ile onarılması durumunda %218-236 oranında arttığını görmüştür. 6.35 mm kalınlıklı numunede ise yorulma ömrü dört katlı onarım ile %21-35 oranında artarken, sekiz ve onaltı katlı onarımlarda dört katlı onarıma göre önemli bir değişim olmadığını görmüştür.



Şekil 8.14. Beş, altı ve yedi katlı yama ile onarılmış borular

Wang ve Pidaparti (2002), tek kenar çatlaklı alüminyum numunelerinin yorulma ömrü $6.01x10^3$ çevrim iken, ömrün bir katlı onarım ile $3.24x10^4$ çevrim, iki katlı onarım ile $6.05x10^4$ çevrim ve dört katlı onarım ile $8.24x10^4$ çevrim olduğunu görmüşlerdir.

Farklı katta yama ile onarılmış boruların beyazlama başlangıcına, sızıntı başlangıcına ve son hasarına ait çevrim sayıları Çizelge 8.3-5'te verilmiştir.

Çizelge 8.3.Farklı katta yama ile onarılmış boruların beyazlama hasar başlangıcına ait gerilme – çevrim sayıları

	2 kat yamalı	3 kat yamalı	4 kat yamalı	5 kat yamalı	6 kat yamalı	7 kat yamalı
$\%35.\sigma_{sta}$	270	610	1870	5000	10000	15000
$\%40.\sigma_{sta}$	127	286	420	1436	2748	6000
$\%45.\sigma_{sta}$	65	120	200	500	1000	2300

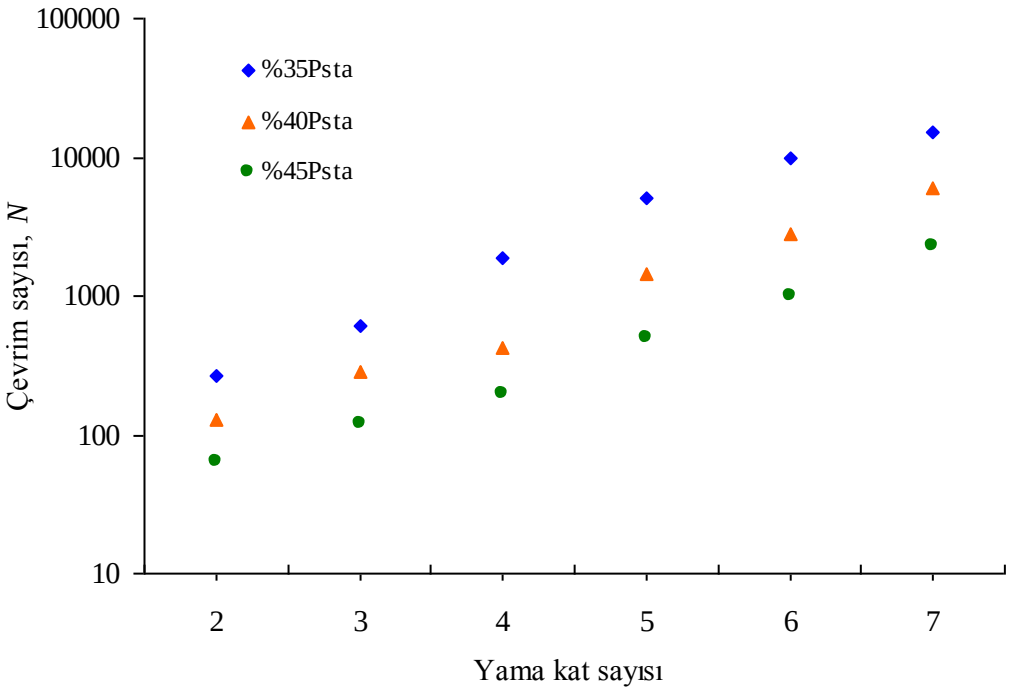
Çizelge 8.4.Farklı katta yama ile onarılmış boruların sızıntı hasar başlangıcına ait gerilme – çevrim sayıları

	2 kat yamalı	3 kat yamalı	4 kat yamalı	5 kat yamalı	6 kat yamalı	7 kat yamalı
$\%35.\sigma_{sta}$	2100	2500	4000	15000	25000	34800
$\%40.\sigma_{sta}$	1400	1700	2300	5400	8000	11000
$\%45.\sigma_{sta}$	1000	1345	1700	2000	2800	3300

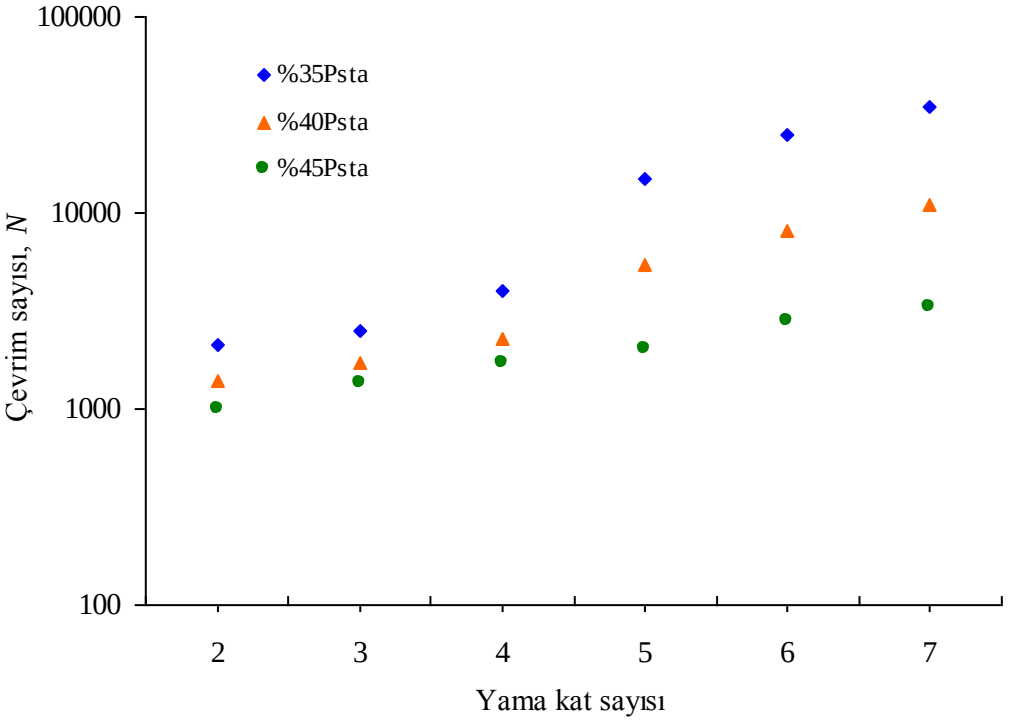
Çizelge 8.5. Farklı katta yama ile onarılmış boruların son hasarına ait gerilme – çevrim sayıları

	çentiksiz	çentikli yamasız	2 kat yamalı	3 kat yamalı	4 kat yamalı	5 kat yamalı	6 kat yamalı	7 kat yamalı
$\%35.\sigma_{sta}$	33500	1500	12360	17150	28500	42290	95000	120000
$\%40.\sigma_{sta}$	24400	950	6640	9690	14022	28600	32080	41000
$\%45.\sigma_{sta}$	5300	500	4000	4720	5333	7120	11750	14300

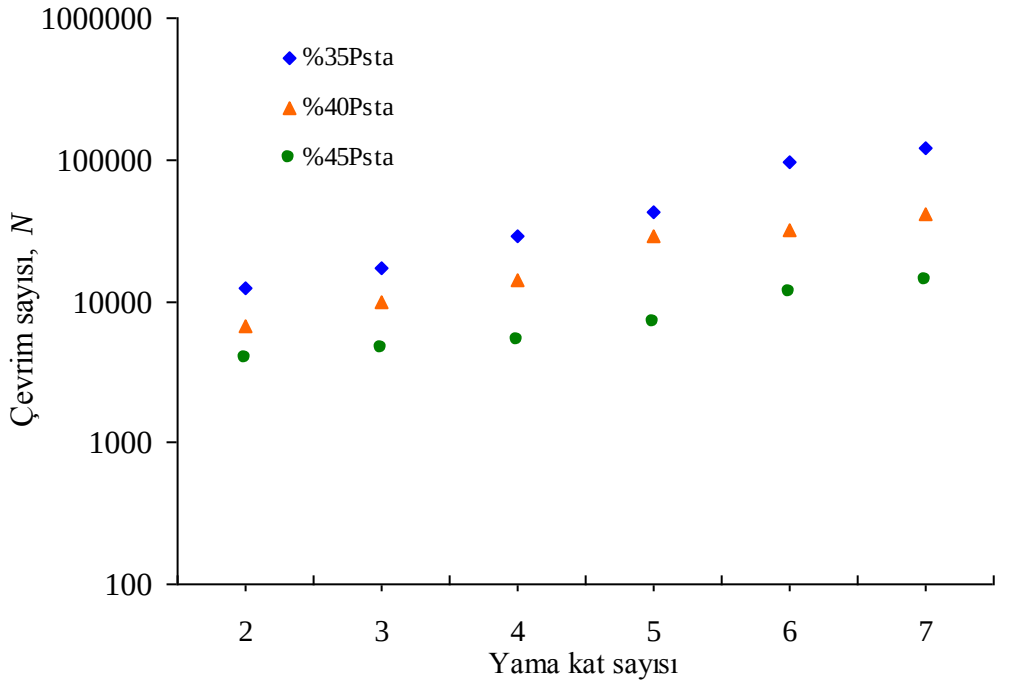
Şekil 8.15-17'de beyazlama ve sızıntı başlangıcı ile son hasarın meydana geldiği çevrim sayılarının, artan basınç değerleri ve yama kat sayısına göre değişimi görülmektedir. Şekillerden görüldüğü üzere uygulanan basınç değerinin ve yama kat sayısının artması ile hasarın meydana geldiği çevrim sayıları artmaktadır.



Şekil 8.15. Farklı yama kat sayılarında beyazlamanın başladığı çevrim sayıları



Şekil 8.16. Farklı yama kat sayılarında sızıntının başladığı çevrim sayıları

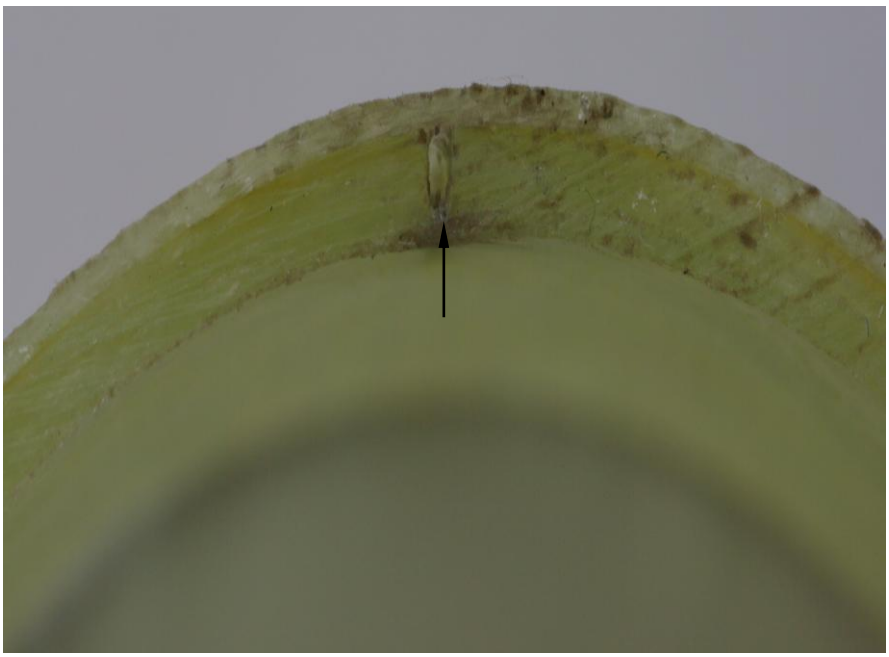


Şekil 8.17. Farklı yama kat sayılarında son hasarın meydana geldiği çevrim sayıları

8.4. Yüzey Çentikli Onarılmış Borularda Yorulma Hasar Davranışı

Boruya uygulanan basınç maksimum iken borudaki elyaflar ±55° olan sarım açısını teğetsel yöne doğru arttırma eğilimi gösterdikleri için borunun çapında artış ve boyunda kısalma gözlenmiştir. Basınç minimum olduğunda ise elyaf sarım açısı ±55° olacak şekilde eski halini almıştır. Sızdırmazlık keçelerinin dışında kalan ve dolayısıyla basınç uygulanmayan kısımlarda ise herhangi bir şekil değişimi olmamıştır.

Basınçlı yağ Şekil 8.18'de görüldüğü gibi, çentik dibinde oluşan çok küçük delikten geçerek yama ile boru arasında kalan çentik boşluğuna çıkmıştır. Çentik boşluğundaki yağın, boru ile yama ara yüzeyine nüfuz ederek bu iki yüzeyin birbirinden ayrılmasına sebep olduğu Şekil 8.19'da görülmektedir.



Şekil 8.18. Basınçlı yağın çentik boşluğuna geçtiği delik



(a)

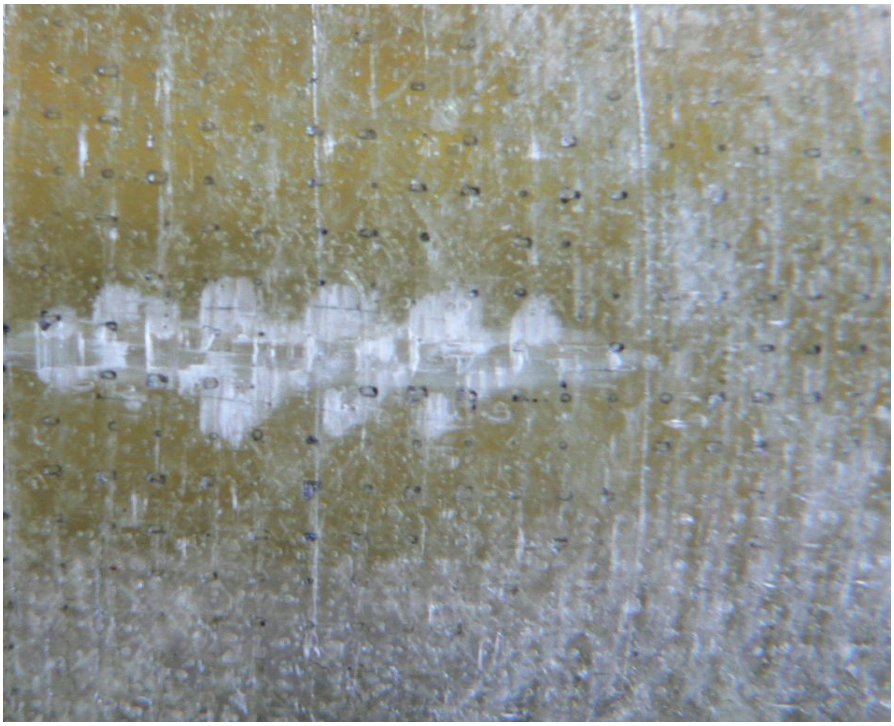


(b)

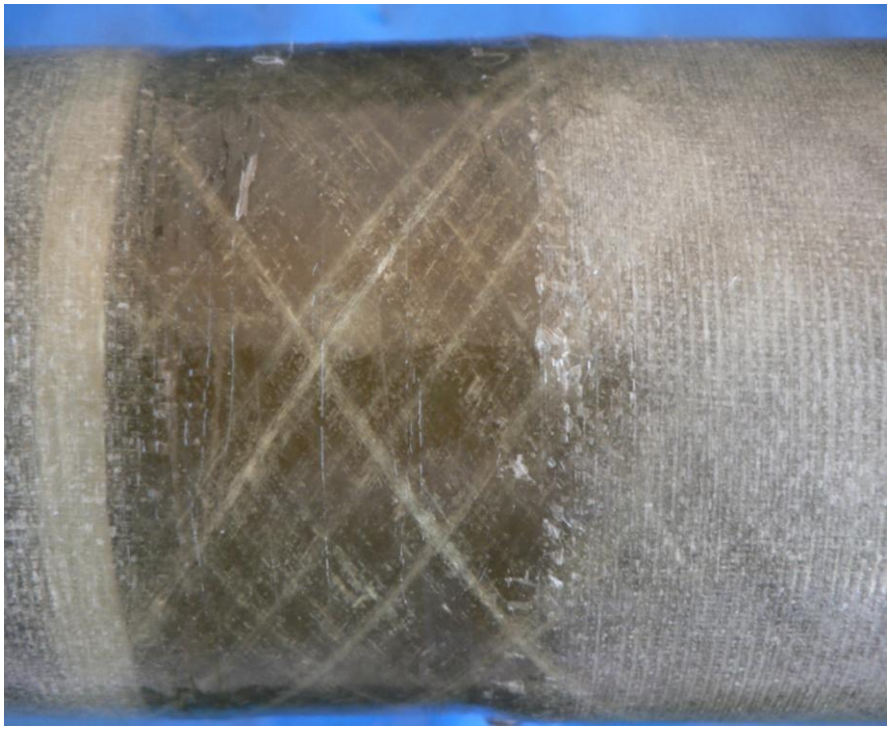
Şekil 8.19. Basınçlı yağın yama ile boru arasına geçişi
a) Yama ile boru arasına geçiş başlangıcı, b) Yama ile boruyu birbirinden ayırması

Tekrarlı yükleme neticesinde elyaf ile matriksi bir arada tutan bağ zayıflamış ve Şekil 8.20.a'da görüldüğü gibi yamada elyaf-matriks ayrılmaları meydana gelmiştir. Bu ayrılma hasarı yamada beyazlama olarak gözlenmiştir.

Borunun yamasız bölgesinde meydana gelen elyaf-matriks ayrılmaları ise Şekil 8.20.b'de verilmiştir. Bu hasar beş, altı ve yedi katlı yama ile onarılmış borularda gözlenmiştir. Yama kat sayısının ve uygulanan basınç değerinin artması ile elyaf doğrultusunda gözlenen bu hasar alanında genişleme olmuştur. Yedi katlı yama ile onarılmış borularda, yamasız bölgedeki elyaf-matriks ayrılmaları daha da artış göstermiştir.



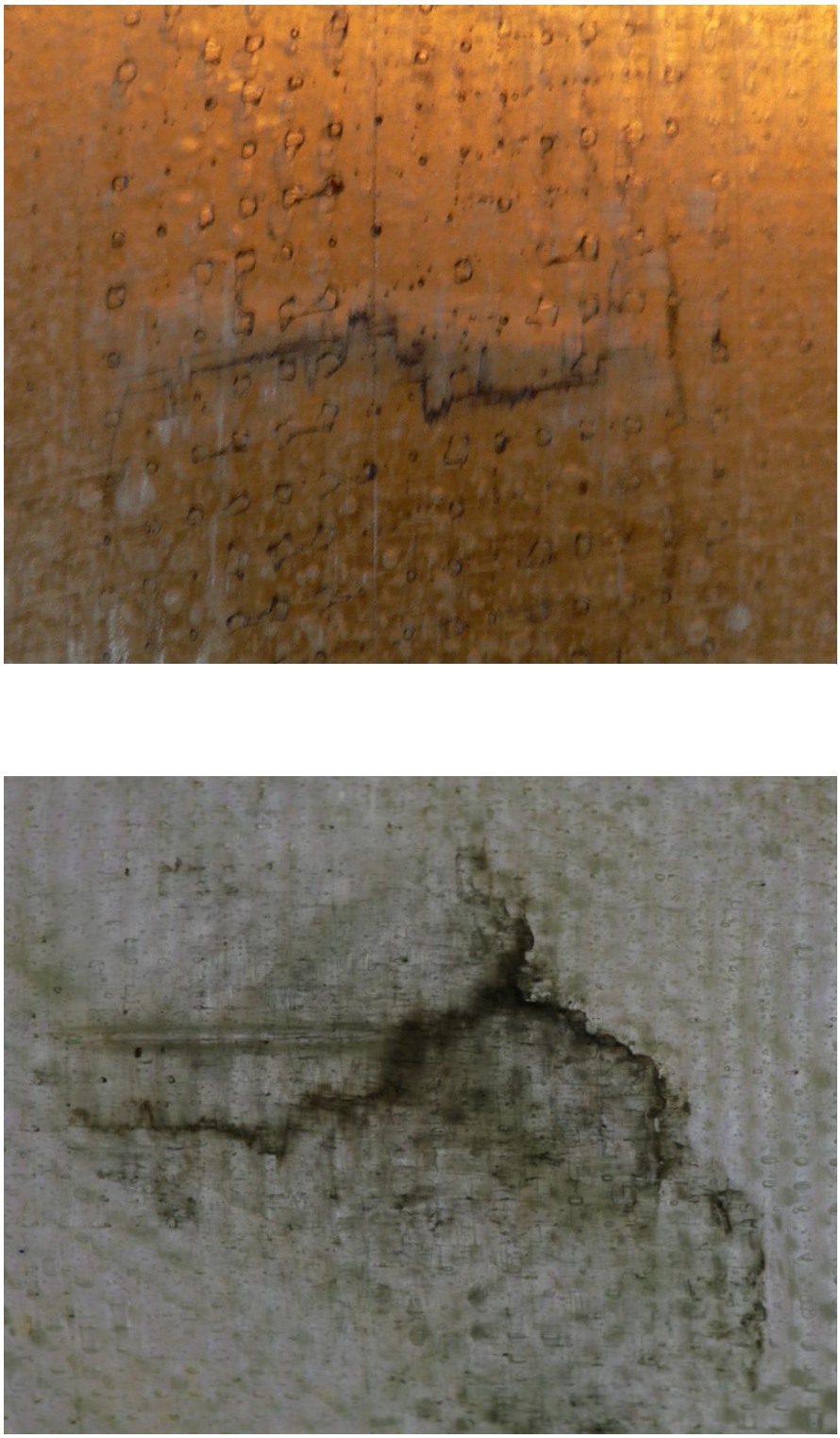
(a)



(b)

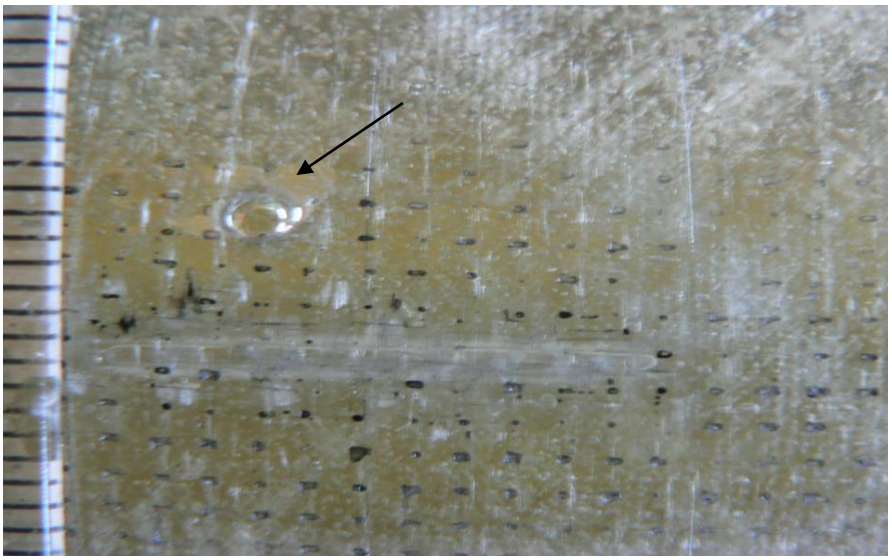
Şekil 8.20. Elyaf-matriks ayrılmaları
a)Yamada meydana gelen ayrılmalar b)Yamasız bölgede meydana gelen ayrılmalar

Yamadaki elyafların teğetsel yönde gerilip eski konumuna geri dönmesi neticesinde, elyaflar arasında kayma ve sürtünme meydana gelmiştir. 0^o ve 90^o sarım açılı elyafların kesişim bölgelerinde, sürtünme ve kayma hareketi fazla olduğu için bu bölgelerde elyaf doğrultusuna paralel çok küçük matriks çatlakları meydana gelmiştir. Şekil 8.21'de görüldüğü gibi yamadaki bu eksenel küçük matriks çatlakları elyaf doğrultusunda ilerleyerek büyümüştür.



Şekil 8.21. Yamada meydana gelen matriks çatlakları

Yama ile boru arasına giren basınçlı yağ Şekil 8.22'de görüldüğü gibi yama yüzeyindeki çok küçük matriks çatlaklarından çıkıp terleme şeklinde yüzeyde gözlenmiştir. Teğetsel gerilme bu matriks çatlaklarının eksenel yönde ilerleyerek büyümesine neden olmuştur. Basınç maksimuma yükseldiğinde, matriks çatlak yüzeyleri birbirine zıt yönde açılarak sızıntı olmuş, basınç minimuma düştüğünde ise çatlak yüzeyleri kapanıp sızıntı durmuştur. Bu tekrarlı davranış neticesinde Şekil 8.23'te görüldüğü gibi sızıntı bölgesinde genişleme olmuştur.

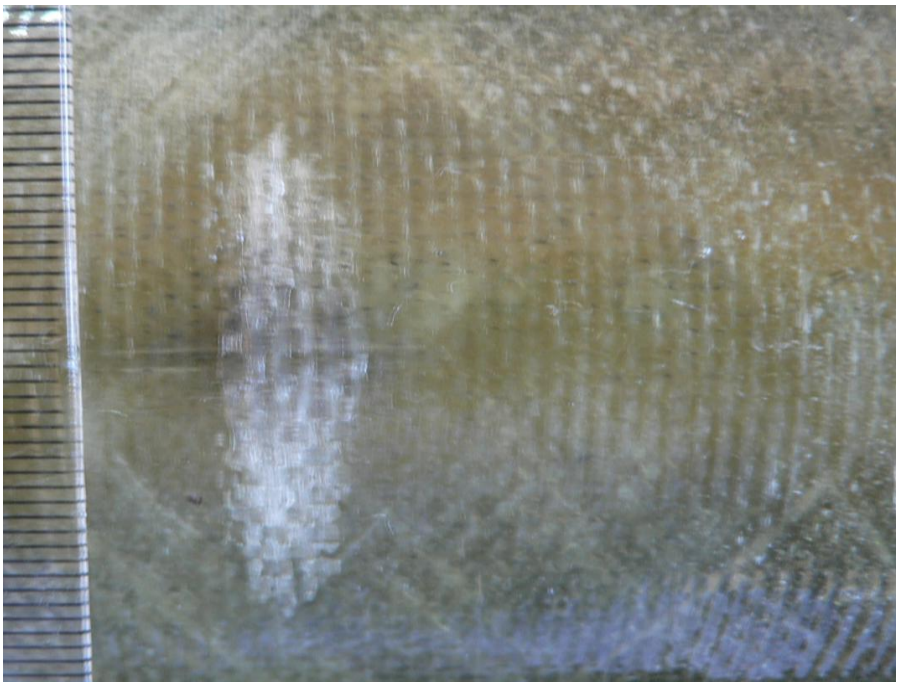


Şekil 8.22. Yamada terleme oluşumu



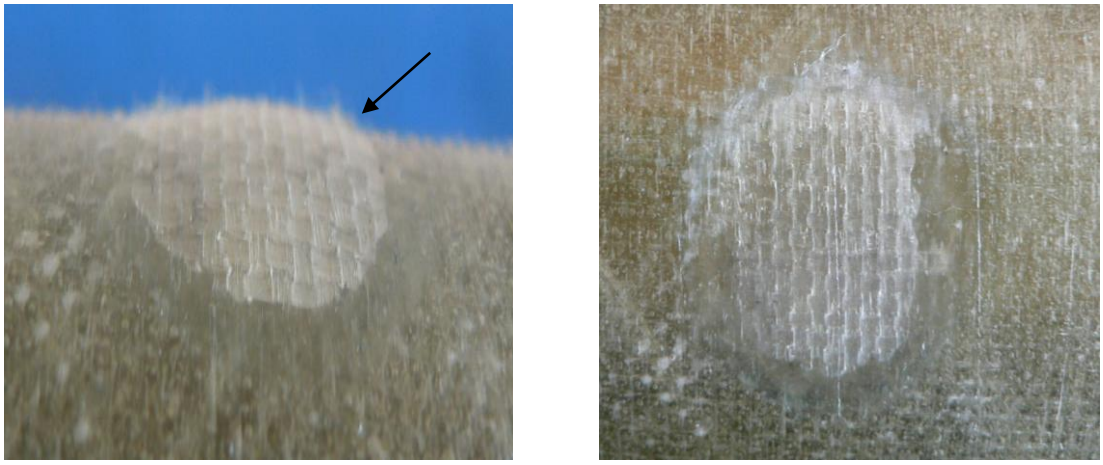
Şekil 8.23.Yamada sızıntı bölgesinin genişlemesi

Elastisite modüllerinin farklılığı sebebi ile boru ve yama arasında kayma gerilmeleri meydana gelmiştir. Tabakalar arasındaki kayma gerilmesi sebebi ile çentik bölgesinde tabakalar arası ayrılmalar meydana gelmiştir. Bu durum Şekil 8.24'te gösterilmiştir. En büyük ayrılma hasar alanı, dört katlı yama ile onarılmış boruda gözlenmiştir.



Şekil 8.24. Çentik bölgesinde meydana gelen tabaka ayrılmaları

Çentik boşluğuna çıkan basınçlı yağın etkisi ile yama borudan ayrılmaya başlamıştır. Yamanın borudan radyal yönde ayrılması yama yüzeyinde şişme olarak gözlenmiştir. Üç katlı yama ile onarılmış borulardaki yama ayrılması Şekil 8.25.'te gösterilmiştir. Üç katlı yama ile onarılmış boruda oluşan ayrılma alanı radyal yönde fazla şişme göstermemiş fakat dört katlı yama ile onarılmış boruda oluşan ayrılma alanının radyal yönde daha fazla şiştiği Şekil 8.26'da görülmektedir.



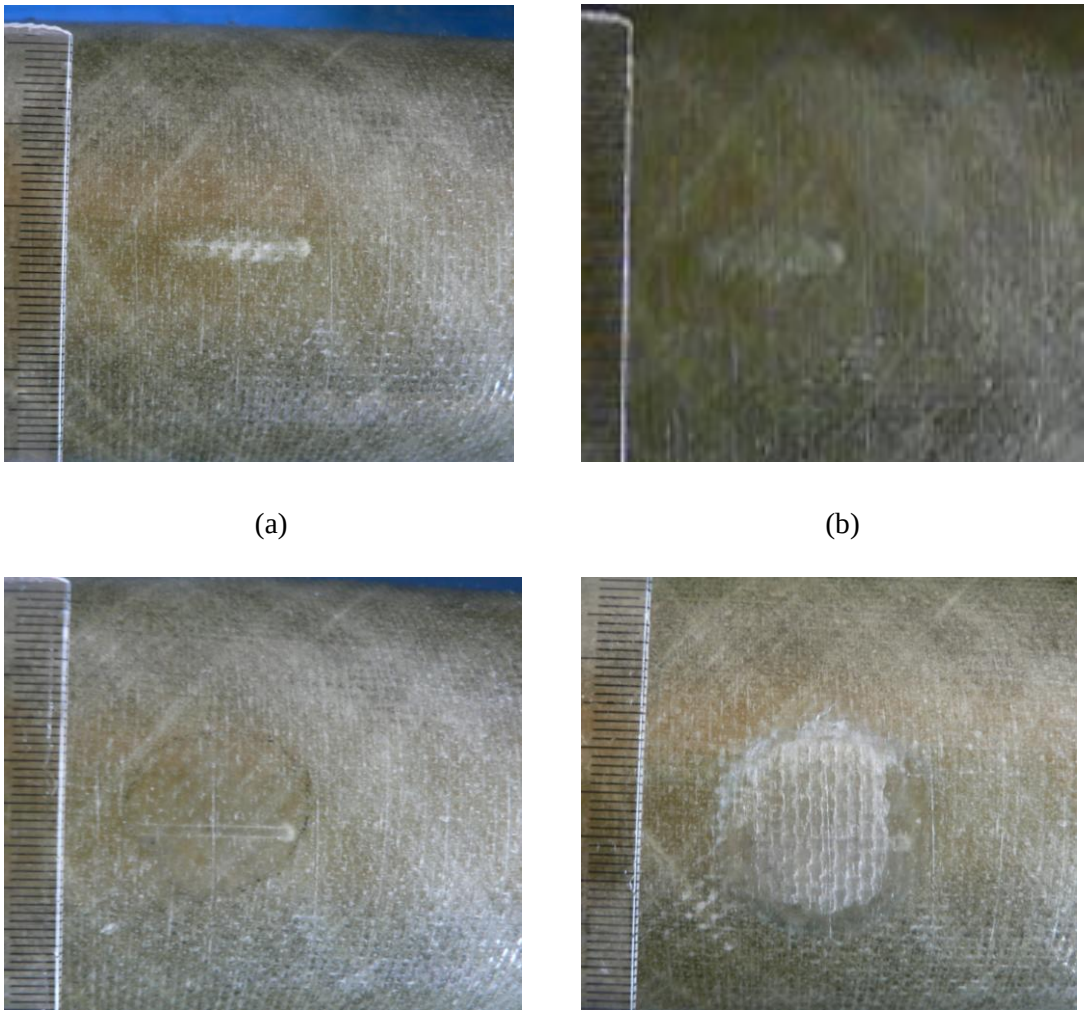
Şekil 8.25. Üç katlı yama ile onarılmış boruda ayrılma alanı ve şişme oluşumu



Şekil 8.26. Dört katlı yama ile onarılmış boruda ayrılma ve şişme oluşumu

Şekil 8.27'de uygulanan %45P_{sta} iç basınç değerinde, üç katlı yama ile onarılmış borunun yorulma hasar fotoğrafları gösterilmiştir. Yamanın borudan ayrılması beyazlama şeklinde (a)'da görülmektedir. (b)'de çevrim sayısı artırıldıkça hasar alanı artmıştır. (c)'de yağ, beyazlama şeklinde gözlenen yama ile boru ara

yüzeyine nüfuz etmiştir. Böylece ayrılma alanı yağ rengi şeklinde gözlenmiştir. (d)'de yamanın tabakaları arasındaki ayrılmalar ile yamanın borudan ayrılması görülmektedir. 4720 çevrimde hasar bölgesindeki elyafların tekrarlı yüklenmesi ve matriks çatlaklarından çıkan sıvı jeti ile elyaf kopmaları meydana gelmiştir.



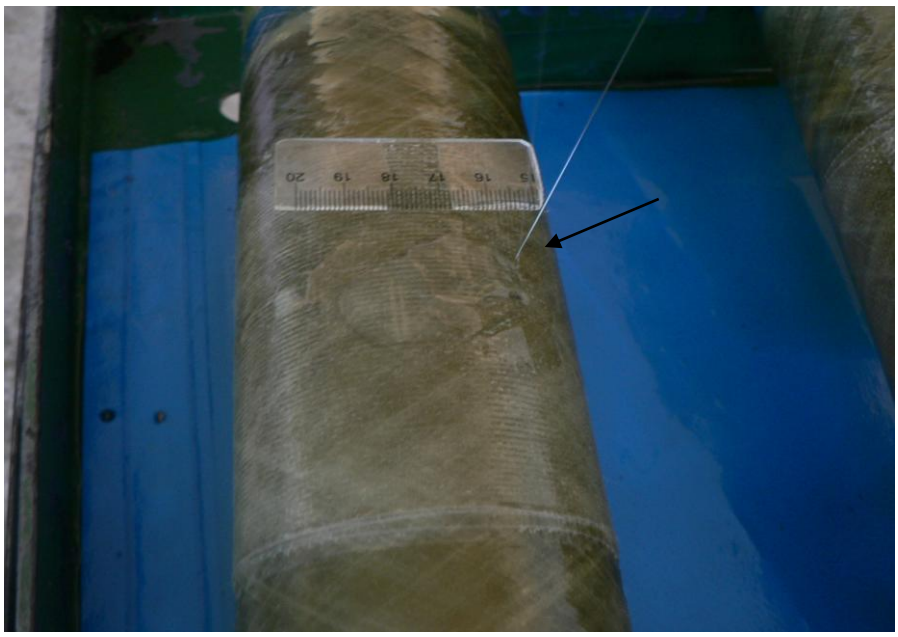
(a) (b)

(c) (d)

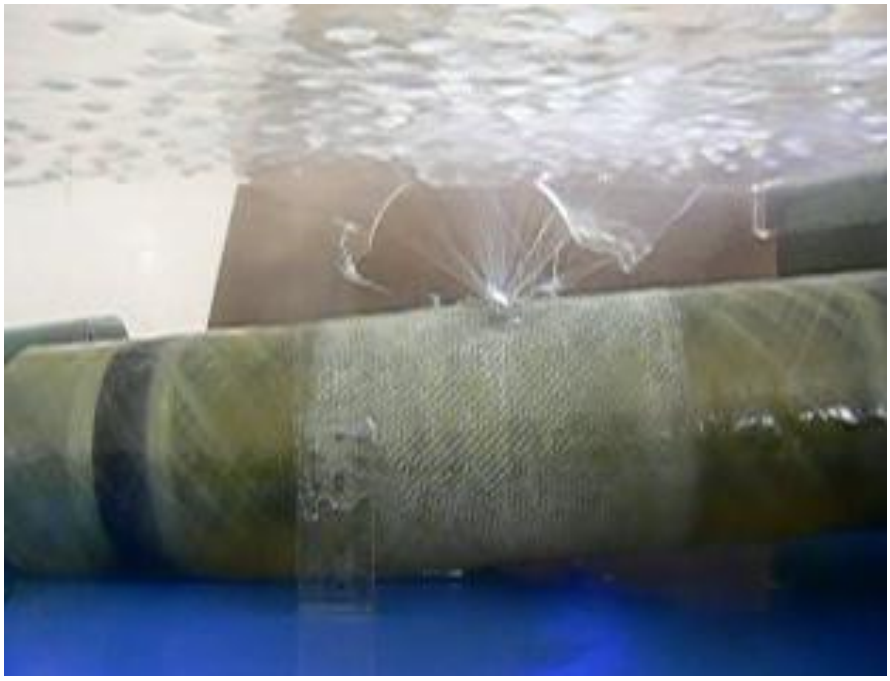
Şekil 8.27. Üç katlı yama ile onarılmış borunun yorulma hasar davranışı fotoğrafları
a) *N*=120, b) *N*=450, c) *N*=1650, d) *N*=4720

Matriks çatlakları giderek büyümüş ve yamadaki elyaflar kopmuştur ve sızıntı meydana gelmiştir. Sızıntı önce Şekil 8.28.a'daki gibi tek noktadan çıkan daha sonra ise Şekil 8.28.b'deki gibi çok noktadan çıkan sıvı jetine dönüşmüştür. Yamadaki elyaflar basıncı taşıyamaz hale gelene kadar sıvı jeti devam etmiştir. Yorulma

ömrünün sonlarına doğru, uygulanan basınç maksimum iken yama radyal yöndeki kuvvet etkisi ile borudan ayrılma davranışı göstermiş ve matriks çatlaklarından çok hızlı sıvı jeti olmuştur, basınç minimum olduğunda ise yama eski haline geri dönerek sıvı jeti durmuştur.



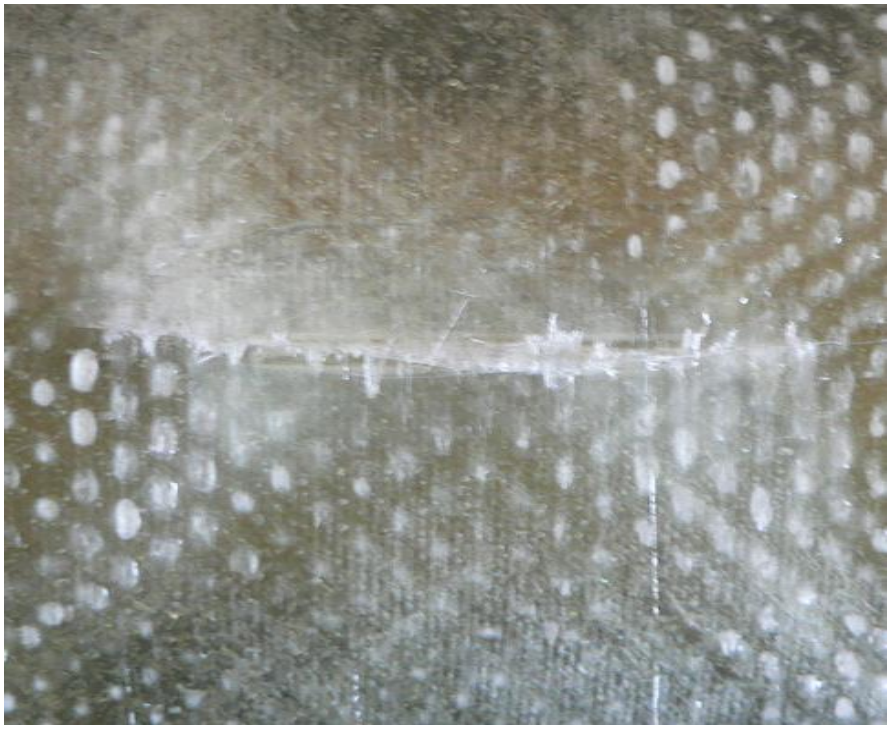
(a)



(b)

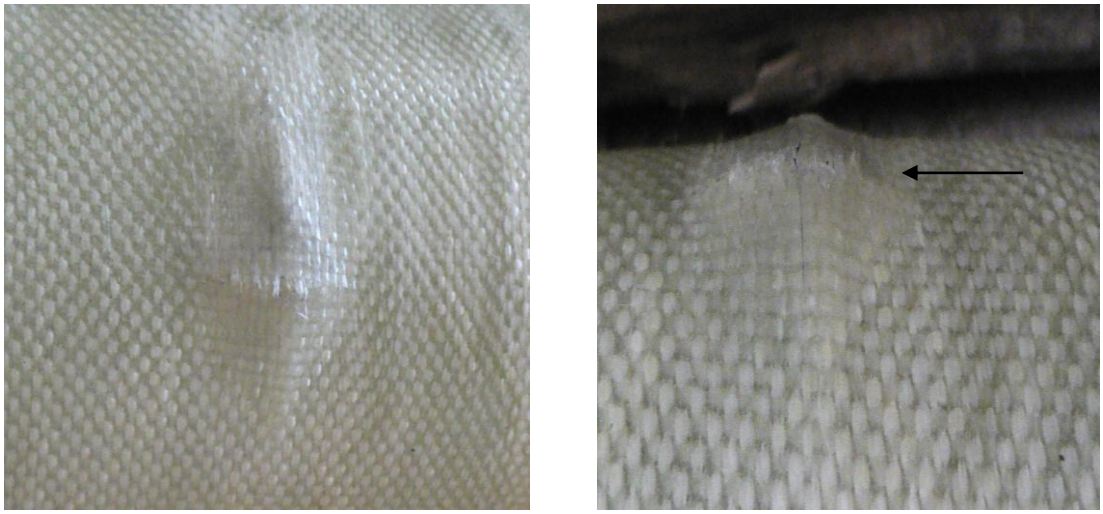
Şekil 8.28. Sıvı jeti oluşumu
a) Tek noktadan sıvı jeti oluşumu, b) Çok noktadan sıvı jeti oluşumu

Tekrarlı yüklemeye devam edildiğinde kopan elyaf sayısı artmış ve bunun sonucunda yırtıklar meydana gelmiştir. İki, üç, dört, beş ve altı katlı yama ile onarılmış borularda son hasar olarak yamada yırtılma meydana gelmiştir. İki katlı yama ile onarılan boruda oluşan yırtık Şekil 8.29'da verilmiştir.

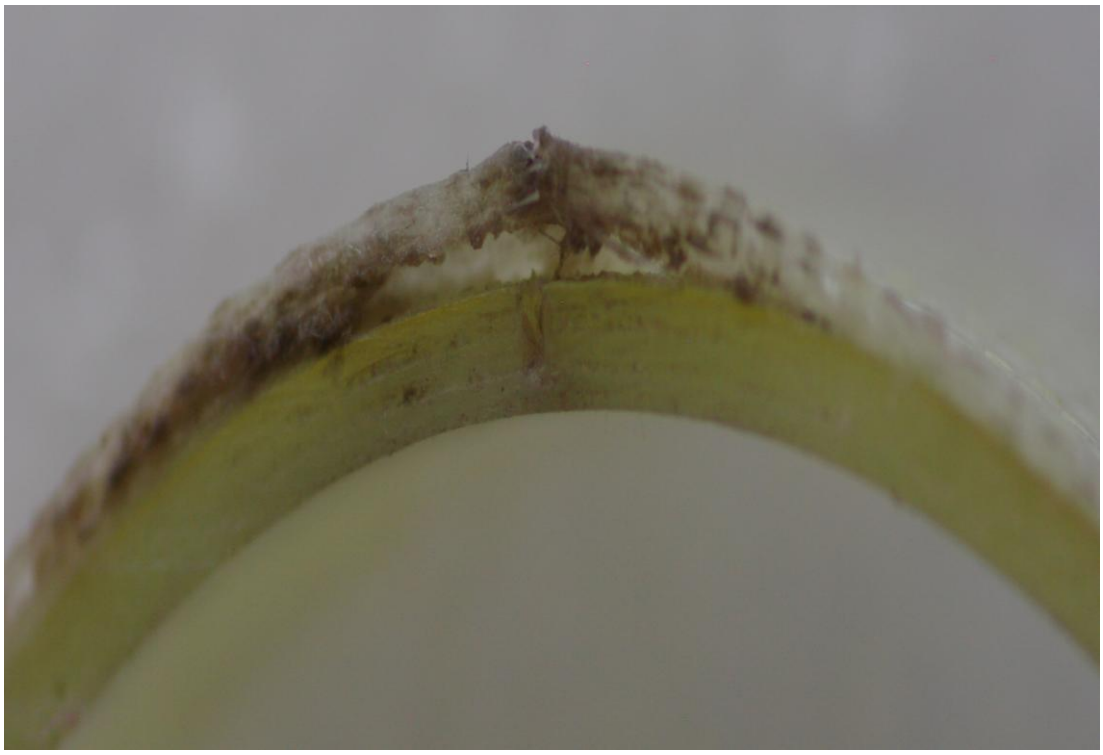


Şekil 8.29. Yamada elyaf kopmaları ve oluşan yırtık

Yamanın borudan radyal yönde ayrılması ile gözlenen şişme oluşumu, en fazla dört katlı yama ile onarılmış boruda meydana gelmiştir. Basınç değerinin %35'ten %40 ve %45'e çıkarılması ile şişme oluşumu daha da belirgin hale gelmiştir. Uygulanan basınç maksimum iken şişme bölgesinde, artan şekilde sıvı jeti olmuştur. Sıvı jeti ile birlikte elyaflar radyal yönde gerilmiştir. Basınç minimum olduğunda ise sıvı jeti durmuştur. Gerilen elyaflarda kopmalar gözlenmiştir. Şekil 8.30'da dört katlı yama ile onarılmış boruda şişme oluşumu ve elyaf kopmaları ile meydana gelen yırtılma gösterilmiştir. Şekil 8.31'de ise bu hasarlar, dört katlı yama ile onarılmış borunun kesitinde daha belirgin bir şekilde görülmektedir.



Şekil 8.30. Dört katlı yama ile onarılmış boruda şişme ve yırtılma oluşumu



Şekil 8.31. Dört katlı yama ile onarılmış boruda şişme ve yırtılma oluşumu



Şekil 8.31. Dört katlı yama ile onarılmış boruda şişme ve yırtılma oluşumu

Onarılmış boruya uygulanan basınç değerinin %35'ten %40 ve %45'e çıkarılması ile yine aynı hasar mekanizmaları gözlenmiştir. Ancak, basıncın artması ile hasar daha hızlı ilerlemiş, böylece beyazlama oluşumu, sızıntı oluşumu, elyaf kopması ve son hasar süreçleri daha erken meydana gelmiştir. İki, üç ve dört katlı yama, teğetsel yöne doğru yüzey çentiğinin açılma ve boru elyaflarının yönlenme davranışını belli miktar sınırlandırmıştır. Bunların içerisinde dört katlı yama ile onarılmış boru, hasar oluşumunun en geç meydana geldiği ve yorulma ömrünün en uzun olduğu boru olmuştur.

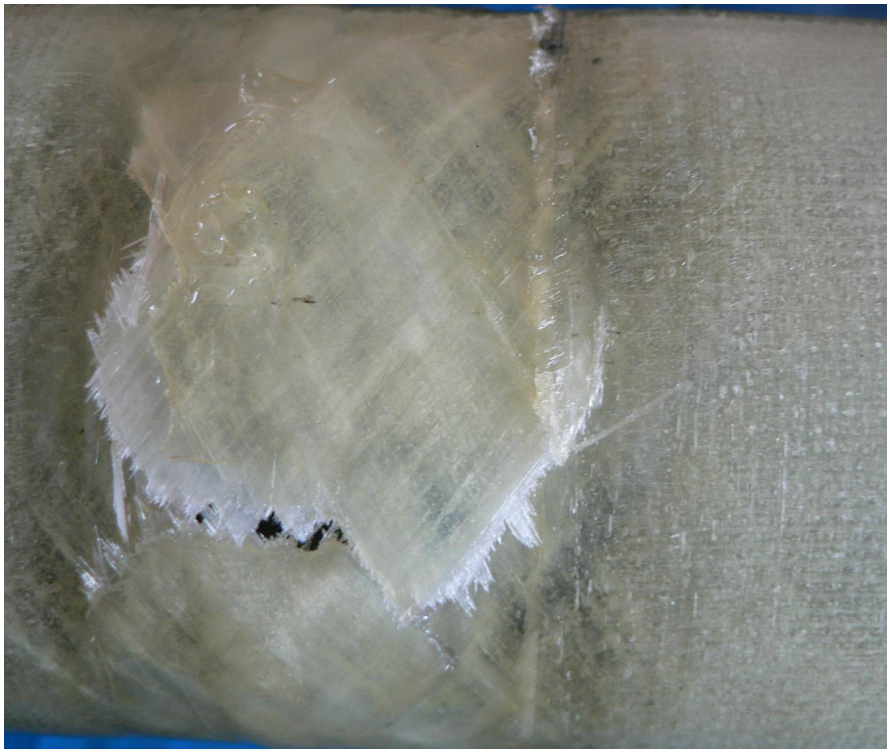
Beş, altı ve yedi katlı yama ile yüzey çentiği bölgesinin mukavemeti daha da artmıştır. Bu yüzden yama bölgesindeki hasar oluşumu gecikmiştir. Bu borularda hasar iki, üç ve dört katlı yama ile onarılmış borularda olduğu gibi başlamıştır. Ancak hasar ilerlemesinde farklılıklar gözlenmiştir.

Beyazlama ve sızıntı oluşumu, yama kat sayısının artışı ile daha geç meydana gelmiştir. Beş, altı ve yedi katlı yama ile onarılmış borularda, yamanın borudan radyal yönde ayrılma etkisi azalmıştır.

Beş ve altı katlı yama ile onarılmış borularda yama bölgesinde beyazlama, sızıntı ve elyaf kopmaları gözlenirken yedi kat yamalı borularda, yama bölgesinde sızıntı oluşumu azalmış, sıvı jeti ise hiç gözlenmemiştir.

Beş, altı ve yedi katlı yama ile onarılmış borularda, yama bölgesindeki hasara ilaveten borunun yamasız bölgelerinde de hasar gözlenmiştir. Bu hasarlar elyaf-matriks ve tabaka ayrılmaları şeklinde meydana gelmiştir. Elyaf doğrultusunda oluşan hasar alanı, yama kat sayısının artması ile artış göstermiştir

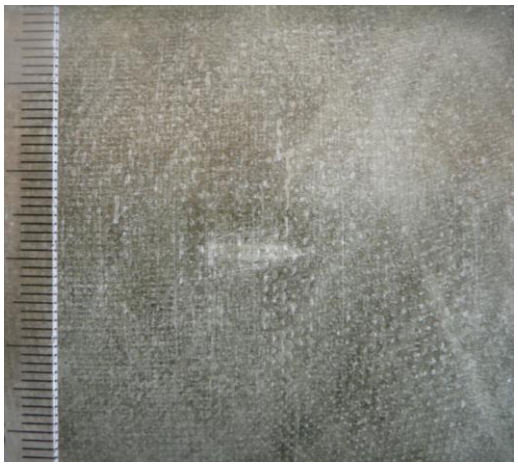
Yedi katlı yama ile onarılmış borularda, borunun yamasız bölgesindeki beyazlama hasarı çok artmıştır. Neticesinde Şekil 8.32'de görüldüğü gibi elyaf kopmaları ve yırtık meydana gelmiştir.



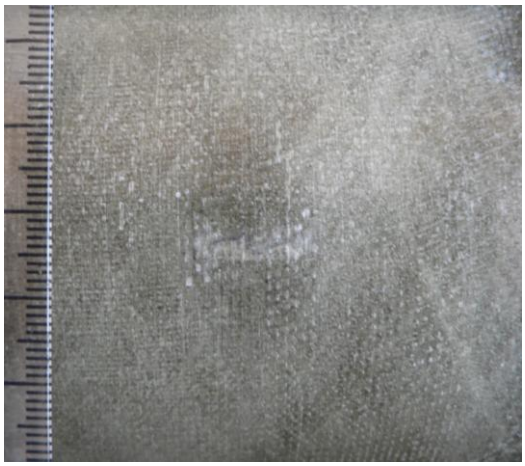
Şekil 8.32.Yamasız bölgede elyaf kopmaları ve oluşan yırtık

Şekil 8.33'te uygulanan %40P_{sta} iç basınç değerinde meydana gelen, beş katlı yama ile onarılmış borunun yorulma hasar fotoğrafları görülmektedir. Yamanın borudan ayrılması beyazlama şeklinde (a)'da görülmektedir. Çevrim sayısı

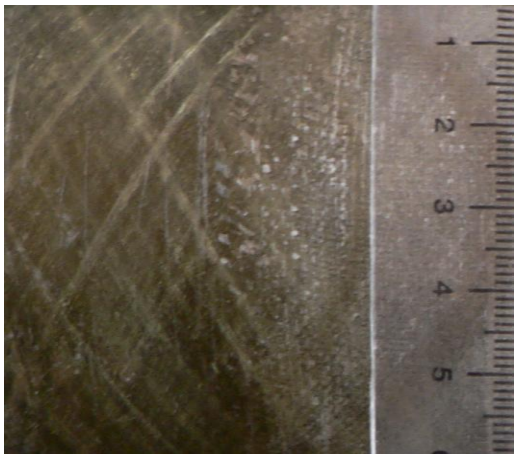
artırıldıkça hasar alanı artmıştır. Yama yüzeyinde oluşan çok küçük matriks çatlakları (b)'de görülmektedir. Basınç maksimum iken bu çatlaklardan sızıntı olmuştur. Basınç minimum olduğunda ise sızıntı durmuştur. Borunun yamasız bölgesinde meydana gelen hasar (c)'de gösterilmiştir. Elyaf doğrultusunda genişleyen bu hasar, elyaf ile matriks ayrılmaları ve tabakalar arası ayrılmalardır. (d)'de ise 28600 çevrimde elyafların kopması ile meydana gelen yırtık gösterilmiştir.



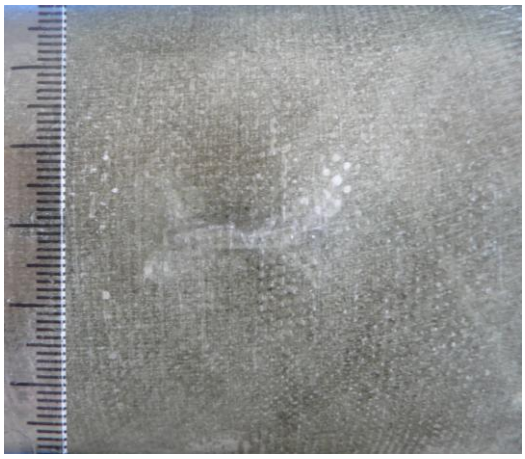
(a)



(b)



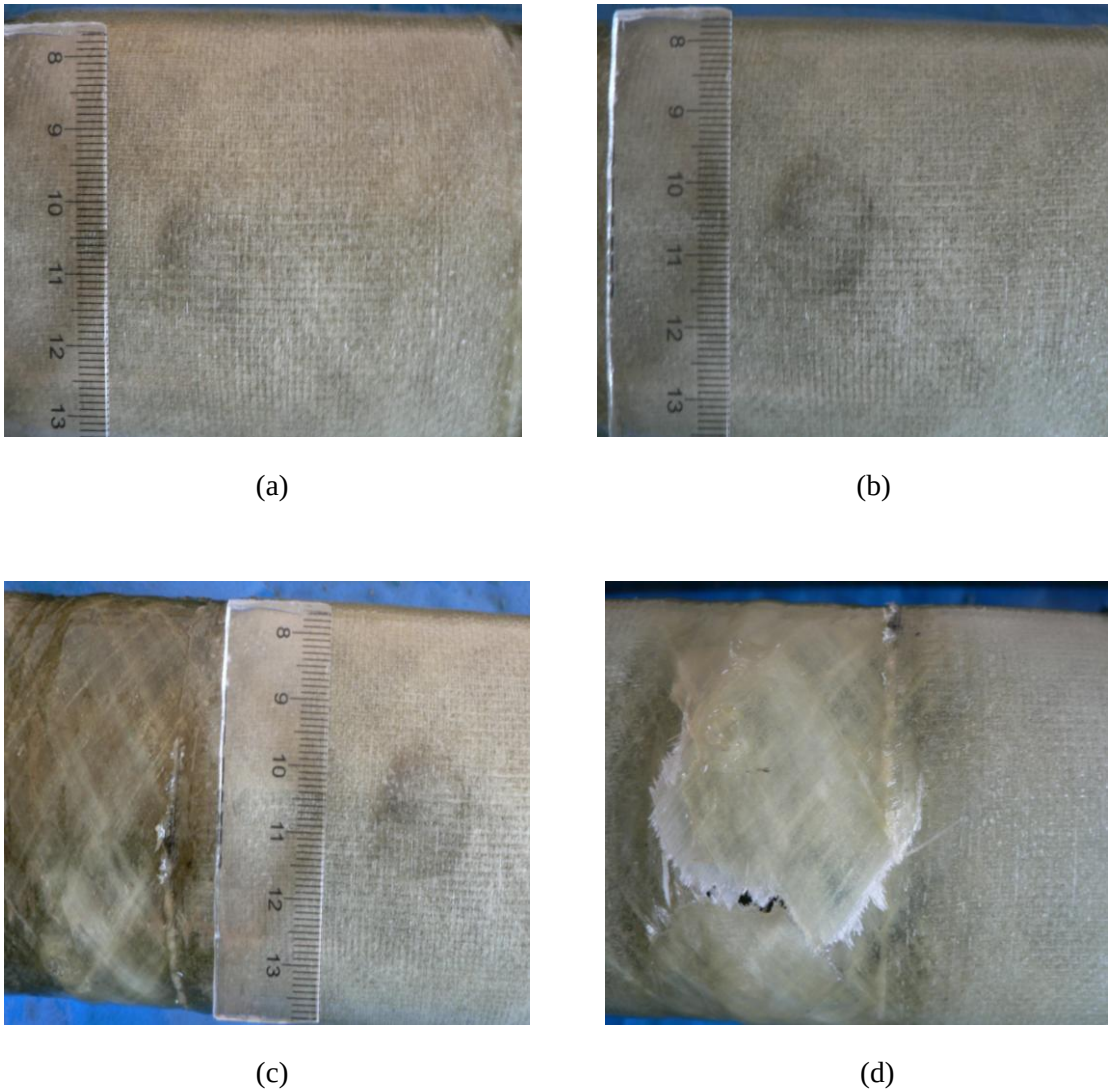
(c)



(d)

Şekil 8.33. Beş katlı yama ile onarılmış borunun yorulma hasar davranışı fotoğrafları
a) N=2100, b) N=18000, c) N=22300, d) N=28600

Yedi katlı yama ile onarılmış borunun %45P_{sta} iç basınç değerinde meydana gelen yorulma hasar fotoğrafları Şekil 8.34'te verilmiştir. (a)'da görüldüğü gibi, basınçlı yağ yamanın borudan ayrıldığı bölgeye nüfuz etmiştir. Yamadaki hasar alanı çevrim sayısı artırıldıkça (b)'de görüldüğü gibi artmıştır. Çentik bölgesinin mukavemetinin artması ile (c)'de gösterildiği gibi borunun daha zayıf olan yamasız bölgesinde de hasar meydana gelmiştir. Yamasız bölgedeki hasar ilerlemesi (d)'de görüldüğü gibi borunun yamasız bölgeden 14300 çevrimde hasara uğraması ile son bulmuştur.



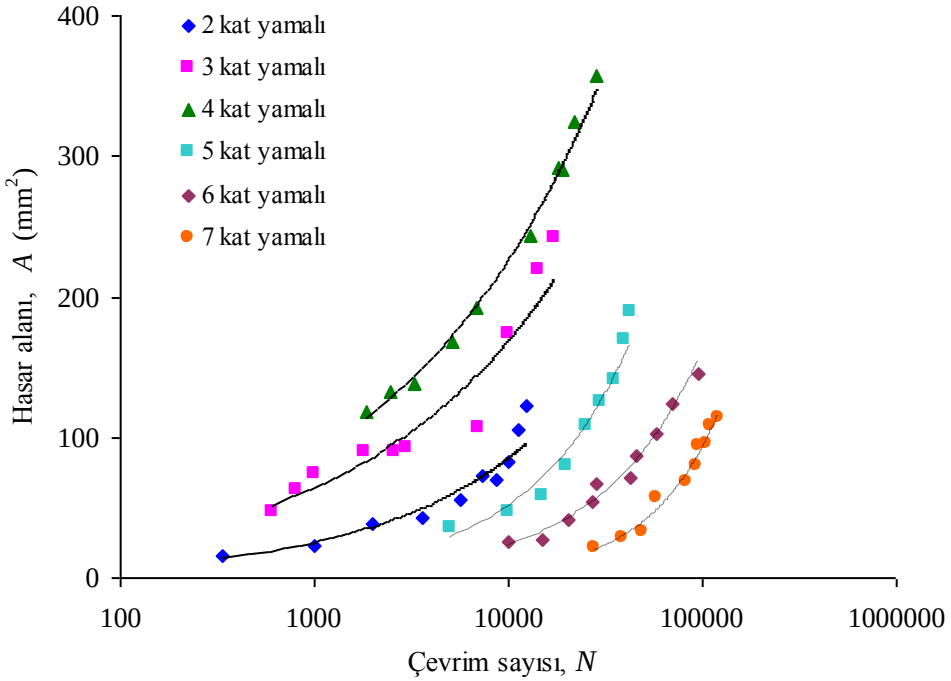
(a) (b)

(c) (d)

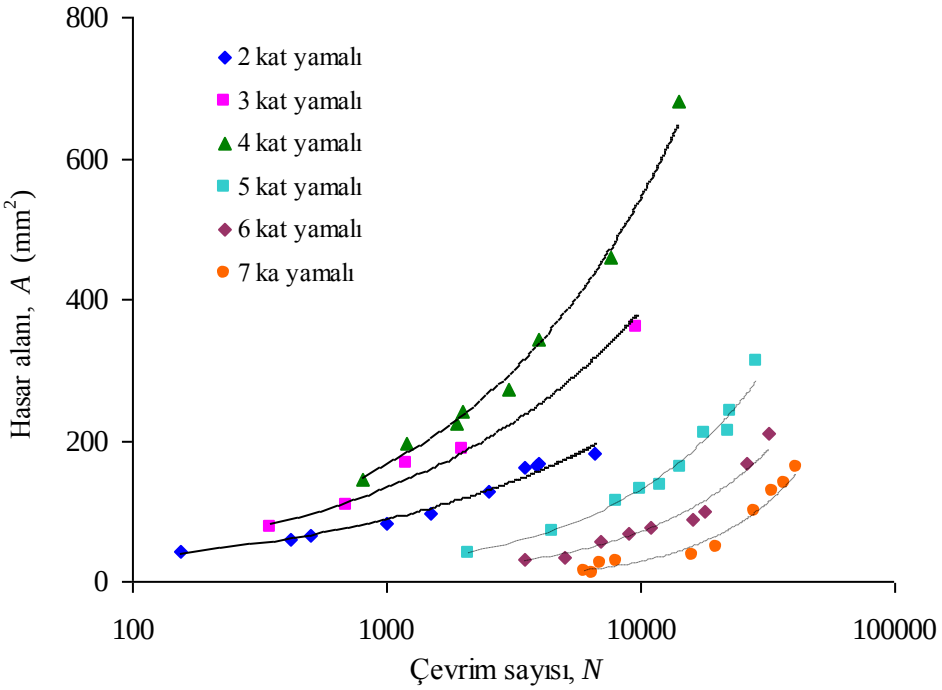
Şekil 8.34. Yedi katlı yama ile onarılmış borunun yorulma hasar davranışı fotoğrafları
a) N=6000, b) N=8000, c) N=12000, d) N=14300

Basınç değerinin %35'ten %40 ve %45'e çıkarılması ile hasar oluşumunda değişim olmamıştır. Basınç artırıldıkça hasar ilerleme hızı artmıştır. Son hasar beş ve altı katlı yama ile onarılmış borularda yamada, yedi katlı yama ile onarılmış borularda ise yamasız bölgede yırtılma şeklinde olmuştur. Bu boruların içerisinde yedi katlı yama ile onarılmış boru en uzun ömürlü boru olmuştur.

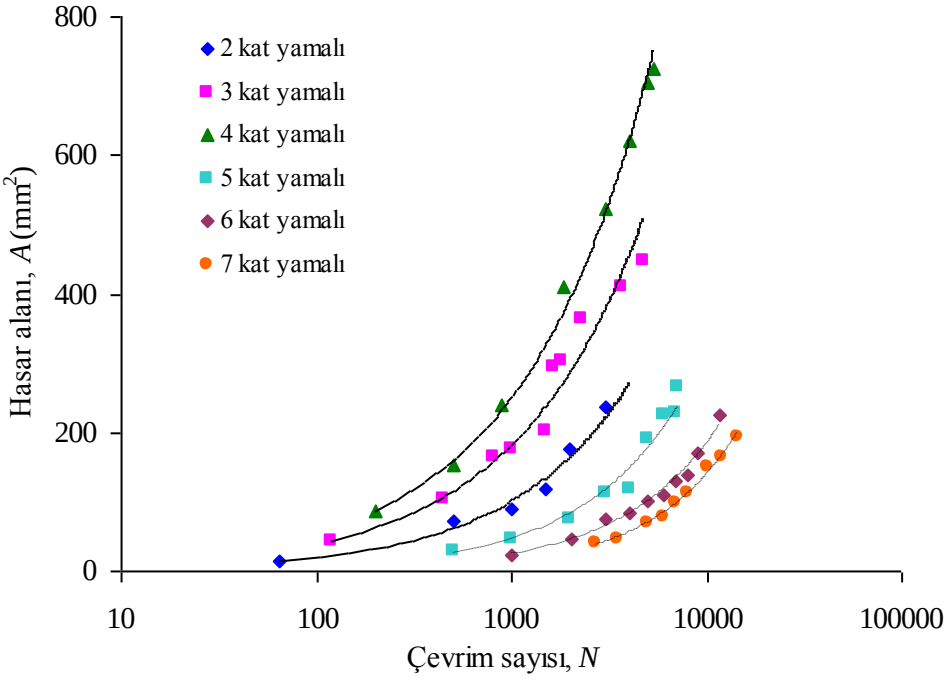
Yüzey çentikli boruların farklı katta yama ile onarımının, yorulma ömrüne ve hasar alanına olan etkisi incelenmiş ve sonuçları aşağıda grafikler halinde verilmiştir. İki, üç, dört, beş, altı ve yedi katlı yama ile onarılmış borular, çentiksiz borunun statik patlama basıncının %35, %40 ve %45'ine karşılık gelen iç basınçla yüklenmiştir. Böylece elde edilen hasar alanı-çevrim sayısı grafikleri Şekil 8.35-37'te verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere, yama kat sayısının ikiden dörde çıkması ile yama bölgesindeki hasar alanında artma, beş ve daha fazla katlı yamalarda ise azalma olmuştur. Çünkü dört katlı yamalı onarımdan sonra yama bölgesinin mukavemeti artmış ve böylece borunun yamasız bölgelerinde de hasar meydana gelmiştir. Ayrıca beş, altı ve yedi katlı onarımlarda, sızdırmazlık keçelerine yakın yamasız bölgelerde eğilme davranışı gözlenmiştir. Yedi katlı yama ile onarılmış borularda, yamasız bölgelerde meydana gelen elyaf-matriks ve tabaka ayrılmalarının artması sonucunda elyafların kopması ile son hasar meydana gelmiştir.



Şekil 8.35. Farklı katta yama ile onarılmış boruların, P_{sta}'nın %35'ine karşılık gelen gerilme değerleri için hasar alanı-çevrim sayısı grafikleri



Şekil 8.36. Farklı katta yama ile onarılmış boruların, P_{sta}'nın %40'ına karşılık gelen gerilme değerleri için hasar alanı-çevrim sayısı grafikleri



Şekil 8.37. Farklı katta yama ile onarılmış boruların, P_{sta}'nın %45'ine karşılık gelen gerilme değerleri için hasar alanı-çevrim sayısı grafikleri

Çizelge 8.6-8'de %35 P_{sta} , %40 P_{sta} ve %45 P_{sta} kadar iç basınca maruz bırakılan farklı katta yama ile onarılmış boruların hasar alanı-çevrim sayısı değerleri verilmiştir.

Yama bölgesindeki en büyük hasar alanının, iç basınç P_{sta}'nın %45'i iken dört katlı yama ile onarılmış boruda meydana geldiği görülmüştür ve değeri 726 mm^2 dir. En küçük hasar alanı ise iç basınç P_{sta}'nın %35'i iken yedi katlı onarılmış boruda görülmüştür ve değeri 113 mm^2 dir.

Wang ve ark. (2006) yaptıkları çalışmada, yorulma ömrü 7x10^6 çevrim olan tek kenar çatlaklı 6061 alaşımlı alüminyum levhayı tek katlı boron/epoksi yama ile onardıklarında 3x10^7 çevrim, iki katlı yama ile onardıklarında ise 4x10^8 çevrim yorulma ömrü elde etmişlerdir.

Çizelge 8.6. %35 P_{sta} kadar iç basınca maruz bırakılan farklı katta yama ile onarılmış boruların hasar alanı-çevrim sayısı arasındaki ilişki

2 katlı yama		3 katlı yama		4 katlı yama		5 katlı yama		6 katlı yama		7 katlı yama	
Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)	Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)	Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)	Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)	Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)	Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)
335	16	610	47.44	1870	118.3096	5050	35	10000	25	28000	21
1000	23	800	63.265	2440	133	10000	47.3	15050	27	39000	28
2000	38	1000	73.727	3300	138	15000	58	20180	41.5	49200	33.3
3600	42	1800	89.106	5200	168	20000	80	27160	54.4	58000	57.1
5600	55	2600	89.609	6900	192	25000	108.72	28370	67.3	82000	68.7
7400	72	3000	92.195	13000	243	30000	125	42160	71.4	93000	79.6
8600	70	7000	107.059	18000	292	35000	141	45600	87.5	96000	93.4
10000	82	10110	173	19000	289.71	40000	169.15	57410	102.7	105000	95.8
11300	105	14260	219	22000	323.92	42290	189.1967	70790	123.8	110000	108.2
12360	123	17150	242	28500	357.57			95000	144.5	120000	113.6

Çizelge 8.7. %40 P_{sta} kadar iç basınca maruz bırakılan farklı katta yama ile onarılmış boruların hasar alanı-çevrim sayısı arasındaki ilişki

2 katlı yama		3 katlı yama		4 katlı yama		5 katlı yama		6 katlı yama		7 katlı yama	
Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)	Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)	Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)	Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)	Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)	Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)
155	43	350	76	800	146	2100	40.9852	3500	30	6000	14
420	59.5182	700	109	1200	197	4500	71	5000	35	6500	11
500	64.0077	1200	166	1900	223	8100	114	7000	57	7000	26
1000	83.6076	2000	186	2000	240	10000	130	9000	68	8000	29
1500	97.5687	9690	360.5772	3000	271	12000	136	11000	76	16000	37
2500	129			4000	343	14300	163	16000	87	20000	49
3500	161.5025			7600	460	18000	209	18000	98	28300	100
3900	165.1015			14022	681.5973	22300	212	26000	168	33000	128
4000	166.0483					22500	241	32080	208.7015	37200	140
6640	182					28600	311			41000	163

Çizelge 8.8. %45 P_{sta} kadar iç basınca maruz bırakılan farklı katta yama ile onarılmış boruların hasar alanı-çevrim sayısı arasındaki ilişki

2 katlı yama		3 katlı yama		4 katlı yama		5 katlı yama		6 katlı yama		7 katlı yama	
Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)	Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)	Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)	Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)	Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)	Çevrim sayısı	Hasar alanı (mm^2)
65	14	120	43	200	86	500	28.6431	1000	23	2700	40.4511
500	71	450	104	500	152	1000	46.801	2030	47	3500	45.6686
1000	89	800	166	890	239.8744	2000	74	3000	74.0046	5000	70
1500	118.26	1000	177	1830	410	3000	112.6198	4000	85.1749	6000	78
2000	177	1500	202.8306	3000	523	4000	118.86	5000	100.2478	7000	97.834
3000	236	1650	295.3598	4000	620	5000	189.7271	6000	110.1833	8000	113
4000	263.98	1800	303.8955	5000	704.1539	6000	225.2822	7000	128.6789	10000	151.6192
		2300	363.5658	5333	726.0271	7000	228.1757	8000	138.8282	12000	164
		3700	410			7120	266	9000	169.4156	14300	193
		4720	448.6874					11750	225.1953		

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, çentik boyut oranları *a/c*=0.2 ve *a/t*=0.75 olan yüzey çentikli kompozit borularda, farklı katlardaki kompozit yamalarla onarımın, yorulma davranışına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme analizi yapılmıştır. Analizde 50, 75, 100 ve 125 mm olmak üzere dört farklı yama genişliği ile iki, üç, dört, beş, altı ve yedi kat olmak üzere, altı farklı kat sayısı göz önüne alınmıştır.

1. 100 mm genişliğinde ve iki, üç, dört, beş, altı ve yedi katlı yama ile onarılmış borularda patlama basıncı, yamasız çentikli borunun patlama basıncına göre sırasıyla %16, %50, %66, %83, %91 ve %133 oranında artmıştır.
2. Uygulanan yorulma iç basıncı azaltıldığı zaman yorulma ömrü artmıştır. Yorulma iç basıncı %45P_{sta}'dan %40P_{sta}'ya düşürüldüğünde, yüzey çentiksiz boruların ömrü 5 kat ve yüzey çentikli yamasız boruların ömrü 2 kat artmıştır. Yorulma iç basıncı %40P_{sta}'dan %35P_{sta}'ya düşürüldüğünde bu artış sırasıyla 1.4 kat ve 1.6 katı olmuştur.

   Uygulanan yorulma iç basıncı azaltıldığı zaman yama ile onarılmış boruların yorulma ömrü de artmıştır. Yama kat sayısı yedi iken yorulma iç basıncı %45P_{sta}'dan %35P_{sta}'ya düşürüldüğünde ömür 8 kat artış göstermiştir.
3. Yama ile onarılmış yüzey çentikli boruların yama kat sayısı artırıldığı zaman yorulma ömrü artmıştır. Yorulma iç basıncı %35P_{sta} ve yama kat sayısı iki, üç, dört, beş, altı ve yedi olarak alındığında onarılmış yüzey çentikli borunun yorulma ömrü onarılmamış yüzey çentikli borunun yorulma ömrünün sırasıyla 8, 11, 19, 28, 63 ve 80 katı olmuştur. Yorulma iç basıncı %40P_{sta} ve yama kat sayısı iki, üç, dört, beş, altı ve yedi olarak alındığında onarılmış yüzey çentikli borunun yorulma ömrü onarılmamış yüzey çentikli borunun yorulma ömrünün sırasıyla 7, 10, 14, 30, 33 ve 43 katı olmuştur. Yorulma iç basıncı %45P_{sta} ve yama kat sayısı iki, üç, dört, beş, altı ve yedi olarak alındığında onarılmış yüzey çentikli borunun yorulma ömrü onarılmamış yüzey çentikli borunun yorulma ömrünün sırasıyla 8, 9, 10, 14, 23 ve 28 katı olmuştur.

4. İki, üç ve dört katlı yama ile onarılmış borularda yama bölgesinde meydana gelen hasar sırasıyla beyazlama, sızıntı ve yırtılma şeklinde gerçekleşmiştir. Beş, altı ve yedi katlı yama ile onarılmış borularda çentik bölgesinin mukavemetinin artması ile borunun yamasız bölgelerinde de beyazlama olmuştur. Fakat beş ve altı katlı yama ile onarılmış boruların sızıntı ve son hasara uğraması yama bölgesinden olmuştur. Yedi katlı yama ile onarılmış boruda ise yamanın hemen bitimindeki onarılmamış bölgeden elyaf kopması şeklinde son hasar meydana gelmiştir.
5. İki, üç ve dört katlı yama ile onarılmış borularda, yama kat sayısı ve uygulanan basınç artırıldıkça yama hasar alanı artmıştır. Beş, altı ve yedi katlı yama ile onarılmış borularda yamadaki hasara ilaveten yamasız bölgede de hasar oluştuğundan yama hasar alanında azalma olmuştur.
6. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlara göre yama kat sayısı ve yama genişliği artırıldıkça yamanın mukavemeti artmaktadır. Böylece çentik bölgesindeki gerilme azalmaktadır.

Yapılan deneysel ve nümerik analiz sonucunda, çentikli kompozit boruların kompozit yama ile onarımının mümkün ve etkili olduğu görülmüştür. Onarımdaki amaç çentikli borunun hasar ilerlemesini geciktirerek çalışma ömrünü uzatmaktır. Yama ile yapılan onarım sayesinde çentik bölgesindeki gerilmede azalma olmuştur. Gerilmenin azalması ile de hasar ilerlemesi geciktirilmiştir. Yapılan onarım işlemlerinde yama ne kadar fazla yük taşırsa onarım o kadar etkili olur.

Yama kat sayısının artması çentikli borunun çalışma ömrünü uzatmıştır. Yüzey çentikli kompozit borunun yama ile onarımında yama kat sayısının altı kat ve 100 mm genişliğindeki yama ile onarımının yeterli olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Bu çalışmaya ilave olarak onarımın etkinliğini araştırmak üzere farklı geometrili ve boyutlu hasar parametreleri ile yama kenarlarının konikleştirilmesi, yama malzemesi, takyiye oryantasyonu, kür sıcaklığı, yükleme koşulları gibi onarım parametreleri üzerine hem deneysel hem de nümerik çalışmalar yapılabilir.

10 KAYNAKLAR

Abdel Wahab, M.M., Ashcroft, I.A., Crocombe, A.D. ve Shaw, S.J. 2001. Prediction of Fatigue Thresholds in Adhesively Bonded Joints Using Damage Mechanics and Fracture Mechanics, Journal of Adhesion Science Technology, 15(7), 763–781.

Abrate, S. 1998. Impact on Composite Structures, Cambridge, Cambridge University Press.

Adams, R.D. ve Davies, R. 1996. Strength of Joint involving Composites, Journal of Adhesion, Vol. 59, pp. 171-182.

Alawi, H. ve Saleh, I.E. 1992. Fatigue Crack Growth Retardation by Bonded Patches, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 42, No.5, pp.861-868.

Anderson, T.L. 2005. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, 3rd ed., CRC Press LLC, Boca Raton, FL.

Armanios, E.A. 2005. Analysis of Delamination Related Fracture Processes in Composites, Preliminary Final Report, NAS 1.26184603, NASA-CR-184603.

Armstrong, K.B. ve Barrett, R.T. 1998. Care and Repair of Advanced Composites. SAE Press, Warrendale, PA.

ASTM D 2584 – 02. Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins.

ASTM D 2992 – 01. Standard Practice for Obtaining Hydrostatic or Pressure Design Basis for “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe and Fittings.

ASTM D 3039 – 00. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

ASTM D 5868 – 01. Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding.

ASTM E-399: Annual Book of ASTM Standards, Vol. 0.3.01, pp. 546-577, 1994.

Baker, A. 1997. Joining and Repair of Aircraft Composite Structures. In: Composites Engineering Handbook. P.K. Mallick, ed. Marcel Dekker, New York. pp. 671-776.

Baker, A.A. 1988. Crack Patching: Experimental Studies, Practical Applications, Bonded Repair of Aircraft Structures, A.A. Baker and R. Jones (ed.), Martinus Nijhoff Publishers, pp. 107-173.

Baker, A.A. 1987. Fibre Composite Repair of Cracked Metallic Aircraft Components-Practical and Basic Aspects, Composites, Vol. 18, No. 4, September, pp. 293-308.

Barsom, J.M. ve Rolfe, S.T. 1999. Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics, 3rd ed., U.S.A.

Chadegani, A. 2008. Strain Energy Release Rate Analysis of Adhesive-Bonded Composite Joints with a Prescribed Interlaminar Crack. M.S. Thesis, Wichita State University, Iran.

Chicken, S.H., Welburn, S. ve Reed, S. 1997. Repairing Composite Aircraft Structures-RAF Experience of Peacetime and Battle Damage Techniques. Aeronautical Journal 101 (1006), 277-285.

Chung, K.-H. ve Yang, W.-H. 2003. A Study on the Fatigue Crack Growth Behaviour of Thick Aluminum Panels Repaired with a Composite Patch, Composite Structures, Vol. 60, pp. 1-7.

Clarke, S. 2002. Field Repair of Composite Plates Using Fibre Metal Laminates, M.S. Thesis. Carleton University, Ottawa, Ontario.

Composite Repair of Aircraft Structure (CRAS), Design Manual, Release 0.2, May 2001.

De Goeij, W. C., Van Tooren, M. J. L. ve Beukers, A. 1999. Composite Adhesive Joints under Cyclic Loading, Materials and Design, Vol. 20, pp. 213–221.

Duell, J.M., Wilson, J.M., ve Kessler, M.R. 2008. Analysis of a Carbon Composite Overwrap Pipeline Repair System. International Journal of Pressure Vessels and Piping. Vol.85, pp. 782-788.

Fredell, R. 1992. PhD Dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of Deleware.

Goertzen, W.K. ve Kessler, M.R. 2007. Dynamic Mechanical Analysis of Carbon/Epoxy Composites for Structural Pipeline Repair, Composites: Part B. Vol. 38, pp. 1-9.

Handbook for Armor Plate Pipe Wrap, June 1998 Edition, Armor Plate, Inc., Pasadena, Texas.

Harris, B. 2003. Fatigue in Composites Science and Technology of the Fatigue Response of Fibre-Reinforced Plastics, CRC Press.

Hoskin, B. ve Baker, A. 1986. Composite Materials for Aircraft Structures. AIAA Education Series, AIAA, New York.

Hosseini-Toudeshky, H. 2006. Effects of Composite Patches on Fatigue Crack Propagation of Single-Side Repaired Aluminum Panels, Composite Structures, Vol. 76, pp. 243-251.

Hosseini-Toudeshky, H. ve Mohammadi, B. 2007. A Simple Method to Calculate the Crack Growth Life of Adhesively Repaired Aluminum Panels. Composite Structures. Vol. 79, pp. 234-241.

Hosseini-Toudeshky, H., Mohammadi, B. ve Daghyani, H. R. 2006. Mixed-Mode Fracture Analysis of Aluminium Repaired Panels using Composite Patches. Composites Science and Technology. Vol. 66, pp. 188-198.

Hosseini-Toudeshky, H., Sadeghi, G. ve 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.

Jacobson, G. 2003. Corrosion–a Natural but Controllable Process. AMPTIAC Quart, 7(4).

Jones, R. ve Callinan, R.J. 1981. Analysis and Repair of Flaws in Thick Structures, Advances in Fracture Research (Fracture 81), Vol. 1, D. Francois (ed.), 5th International Conference on Fracture, pp.23-32.

Kennedy, G.D. 1998. Repair of Cracked Steel Elements using Composite Fibre Patching, M.S. Thesis. University of Alberta, Edmonton, Alberta.

Kim, K.-S., Yoo, J.-S., Yi, Y.-M. ve Kim, C.-G. 2006. Failure Mode and Strength of Uni-Directional Composite Single Lap Bonded Joints with Different Bonding Methods. Composite Structures. Vol. 72, pp. 477-485.

Koch G.H., Brongers M.P., Tompson N.G., Virmani Y.P. ve Payer J.H. 2001. Corrosion Cost and Preventative Strategies in the United States. Federal Highway Administration, Office of Infrastructure Research and Development. pp. 260–311.

Kumar, A.M. ve Hakeem, S.A. 2000. Optimum Design of Symmetric Composite Patch Repair to Centre Cracked Metallic Sheet, Composite Structures, Vol. 49, pp. 285-292.

Lee, W.-Y. ve Lee, J.-J. 2004. Successive 3D FE Analysis Technique for Characterization of Fatigue Crack Growth Behavior in Composite-Repaired Aluminum Plate. Composite Structures. Vol.66, pp. 513-520.

Li, G., Davis, D., Stewart, C., Peck, J. ve Pang, S.-S. 2003. Joining Composite Pipes using Hybrid Prepreg Welding and Adhesive Bonding, Polymer Composites, ProQuest Science Journals, Vol. 24, No.6, pp. 697.

Liu, X., Wang, G. 2007. Progressive Failure Analysis of Bonded Composite Repairs. Composite Structures. Vol. 81, pp. 331-340.

Mall S ve Yun K. T. 1987. Effect of Adhesive Ductility on Cyclic Debond Mechanism in Composite-to-Composite Bonded Joints, Journal of Adhesion, Vol. 23, pp. 215–231.

Mall, S. 1997. Laminated Polymer Matrix Composites. In: Composites Engineering Handbook. P.K. Mallick, ed. Marcel Dekker, New York. pp.811-890.

Mallick, P.K. 2007. Fiber-Reinforced Composites, Materials, Manufacturing and Design, 3rd ed. CRC Press, Taylor&Francis Group, LLC., United States of America.

Mazumdar, S.K. 2002. Composites Manufacturing Materials, Product and Process Engineering, CRC Press, United States of America.

Nagaswamy, V., Pipkins, D.S. ve Atluri, S.N. An FEAM based Methodology for Analyzing Composite Patch Repairs of Metallic Structures. Struct Integrity Aging Aircraft, ASME 1995;AD-Vol. 47:273-300.

Niu, M.C.Y. 1992. Composite Airframe Structures: Practical Design Information and Data. Conmilt Press, Hong Kong.

Okafor, A.C., Singh, N., Enemuoh, U.E. ve Rao, S.V. 2005. Design, Analysis and Performance of Adhesively Bonded Composite Patch Repair of Cracked Aluminum Aircraft Panels. Composite Structures. Vol. 71, pp. 258-270.

Ong, C.L., ve Shen, S.B. 1991. Repair of F-104 Aircraft Nosedome by Composite Patching, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 15, pp. 75-83.

Ong, C.L., Chu, R.C., Ko, T.C., ve Shen, S.B. 1990. Composite Patch Reinforcement of a Cracked Upper Longeron: Analysis and Specimen Simulation, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 14, pp. 13-26.

Ouinas, D., Bouiadjra, B. B., Serier, B. ve SaidBekkouche, M. 2007. Comparison of the Effectiveness of Boron/Epoxy and Graphite/Epoxy Patches for Repaired Cracks Emanating from a Semicircular Notch Edge, Composite Structures, Vol. 80, pp. 514-522.

Pang, S.-S., Li, G., Jerro, H. D., Peck, J. A. ve Stubblefield, M. A. 2004. Fast Joining of Composite Pipes using UV Curing FRP Composites, Polymer Composites, ProQuest Science Journals, Vol. 25, No.3, pp. 298.

Patrick, A.J. 2004. Composites-Case Studies of Pipeline Repair Applications, Pigging Products and Services Association, Clock Spring Company, L.P, Huntingdon, UK.

Peck, J.A., Jones, R.A., Pang, S.-S., Li, G. ve Smith, B.H. 2007. UV-Cured FRP Joint Thickness Effect on Coupled Composite Pipes, Composite Structures, Vol. 80, pp. 290-297.

Potter, K.D., Guild, F.J., Harvey, H.J., Wisnom, M.R. ve Adams, R.D. 2001. Understanding and Control of Adhesive Crack Propagation in Bonded Joints Between Carbon Fibre Composite Adherends I. Experimental, International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 21, pp. 435–443.

Rao, V.V., Singh, R. ve Malhotra, S.K. 1999. Residual Strength and Fatigue Life Assessment of Composite Patch Repaired Specimens. Composites: Part B. Vol. 30, pp. 621-627.

Reis, P.N.B., Antunes, F.J.V., ve Ferreira, J.A.M. 2005. Influence of Superposition Length on Mechanical Resistance of Single-Lap Adhesive Joints. Composite Structures. Vol. 67, pp. 125-133.

Renaud, G. 2003. Advanced Optimal Design Concepts for Composite Material Aircraft Repair, Ph.D. Thesis, University of Toronto.

Roberts, P.D. 1995. Crack Growth Retardation by Carbon Fibre Composite Patching: An Application to Steel Pressure Vessel Repair. M.S. Thesis. University of Alberta, Edmonton, Alberta.

Rose, L.R.F. 1988. Theoretical Anaysis of Crack Patching, Bonded Repair of Aircraft Structures, A.A. Baker and R. Jones (ed.), Martinus Nijhoff Publishers, pp. 77-106.

Samancı A. 2004. Yüzey Çatlaklı Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Etkisi Altında Yorulma Davranışı, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Schubbe. J.J. 1997. Thickness Effects on a Cracked Aluminum Plate with Composite Patch Repair, Ph.D. Thesis, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio.

Sennet, M.S. 1989. Field Repair of Composite Materials in Army Service: Planning for the Future. US Army Materials Technology Laboratory. MTL TR 89-45.

Sinha, P.K. 2006. Composite Materials and Structures, Composite Centre of Excellence, AR&DB, Department of Aerospace Engineering I.I.T. Kharagpur.

Soutis, C., Duan, D-M. ve Goutas, P. 1999. Compressive Behaviour of CFRP Laminates Repaired with Adhesively Bonded External Patches. Composite Structures. Vol. 45, pp. 289-301.

Sun, C.T. ve Klug, J.A. 1996. Analysis of Cracked Aluminum Plates Repaired with Bonded Composite Patches. AIAA J. Vol. 34(2), pp. 369-74.

Tarakcioglu, N., Gemi, L. ve Yapici, A. 2005. Fatigue Failure Behavior of Glass/Epoxy $\pm 55^{o}$ Filament Wound Pipes under Internal Pressure, Composite Science and Technology, Vol. 65. pp. 703-708.

Tarakcioglu, N. Samanci, A., Arikan, H. ve Akdemir, A. 2007. The Fatigue Behavior of $(\pm 55^{o})_3$ Filament Wound GRP Pipes with a Surface Crack under Internal Pressure, Composite Structures, Vol. 80, pp.207-211.

Uyaner M. ve Kara M. 2007. Dynamic Response of Laminated Composites Subjected to Low-Velocity Impact, Journal of Composite Materials, Vol.41, No. 24.

Wang, Q. Y. ve Pidaparti, R. M. 2002. Static Characteristics and Fatigue Behaviour of Composite-Repaired Aluminum Plates, Composite Structures, Vol. 56, pp. 151-155.

Wang, Q. Y., Sriraman, M. R., Kawagoishi, N. ve Chen, Q. 2006. Fatigue Crack Growth of Bonded Composite Repairs in Gigacycle Regime, International Journal of Fatigue, Vol. 28, pp. 1197-1201.

Wild, P.M. ve Vickers, G.W. 1997. Analysis of Filament-Wound Cylindrical Shells under Combined Centrifugal, Pressure and Axial Loading. Compos Part A, Vol. 28(1), pp. 47-55.

Wilson, J. M. 2006. Characterization of a Carbon Fiber Reinforced Polymer Repair System for Structurally Deficient Steel Piping, Ph.D. Thesis. University of Tulsa.

Hu, Y.-Q, Li, P.-N, Ju, D.-Y ve Hong-Liang, Pan, H.-L. 1990. Experimental Investigation on a Cracked Body with Adhesive Bonded Reinforcement, International Journal of Pressure Vessel and Piping, Vol. 41, pp.193-206.