

24874

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜZEY ÇATLAKLI CAM TAKVİYELİ  
PLASTİKLERDE GERİLMELİ KOROZYON

Ahmet AKDEMİR  
DOKTORA TEZİ  
MAKİNA ANABİLİM DALI  
KONYA, 1992

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜZEY ÇATLAKLI CAM TAKVİYELİ  
PLASTİKLERDE GERİLMELİ KOROZYON

Ahmet AKDEMİR

DOKTORA TEZİ  
MAKİNA ANABİLİM DALI

Bu tez ...../...../1992 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından kabul edilmiştir.

İmza

Prof.Dr.Tevfik AKSOY  
(Danışman)

İmza

(Üye)

İmza

(Üye)

**ÖZET**  
Doktora Tezi

**YÜZEY ÇATLAKLI CAM TAKVİYELİ PLASTİKLERDE  
GERİLMELİ KOROZYON**

Ahmet AKDEMİR  
Selçuk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. Tevfik AKSOY  
1992, Sayfa : 113

Jüri :

Filaman sarma metoduyla üretilmiş cam elyaf takviyeli plastikler (CTP) sürekli elyaf ve yüksek elyaf hacımsal oranlarından dolayı gerilmeli korozyona karşı birçok kompozit malzemelere göre daha duyarlıdır. Bu tezde, 0.6 N seyreltilmiş HCl asite maruz eş yönlü cam/polyester kompozitlerde yüzey çatlaklarının gerilmeli korozyon ve çatlak büyüme hızı davranışları kırılma mekaniği deneyleriyle incelendi.

Cam/polyester kompozitler filaman sarma metoduyla sürekli elyaftan elde edildi. Test numuneleri üzerine değişik a/c ve a/t oranlarında sığ yüzey çatlakları açılarak eksenel çekme altında tek taraflı gerilmeli korozyona tabii tutuldu.

Yüzey çatlaklı CTP için gerilme şiddet faktörleri Newman-Raju, Nishioka ve SEN denklemlerinden elde edildi. Çatlak büyüme hızı ve gerilme şiddet faktörleri ile alakalı A ve n malzeme sabitleri test şartlarında tesbit edildi.

Test sonuçları literatürde verilen sonuçlarla karşılaştırıldığında, yüzey çatlaklı CTP'lerde kullanılan gerilme şiddet faktörü denklemleri ile çatlak büyüme hızı davranışlarının uygun olduğu görülmüştür.

## ABSTRACT

Doctora Thesis

### STRESS CORROSION OF GLASS REINFORCED PLASTIC WITH SURFACE CRACK

Ahmet AKDEMİR  
Selçuk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Prof.Dr. Tevfik AKSOY  
1992, Page : 113

Jury :

Because of continuous fibers and high fiber volume fraction, filament winding glass fiber reinforced plastics (GRP) are more sensitive to stress corrosion than other composite materials. In this thesis the propagation behaviour of stress corrosion surface cracks and crack growth rates in a range of unidirectional glass fiber/polyester composites exposed to 0,6 N dilute HCl acid has been examined using a fracture mechanics tests.

Glass/polyester composites were produced from continuous rowings by filament winding. Tha shallow surface crack with various a/c and a/t ratios were machined on the specimen and under uniaxial tension were exposed to one side stress corrosion.

The stress intensity factors for GRP with surface cracks are obtained from Newman-Raju, Nishioka and SEN expressions. The material constants such as A and n which related crack growth rate and stress intensity factors were obtained for the test conditions.

The test results were compared with the literature. It was shown that stress intensity factor expressions and crack growth rate behaviour are suitable for GRP with surface cracks.

**KEY WORDS:** Composite Materials, Glass Fibre Polyester Composites, Stress Corrosion, Environmental Stress Carcking, Surface Crack

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında her türlü desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof.Dr. Tevfik Aksoy'a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Konu ile ilgili çeşitli yardımlarını gördüğüm Yard.Doç.Dr. Ahmet Avcı'ya, Öğr. Gör. Necmettin Tarakçıoğlu'na, tezin basılmasındaki yardımlarından dolayı Ekol Dizgi'ye ve malzeme sağlanması konusundaki yardımlarından dolayı Cam Elyaf San. A.Ş. Pazarlama Müdürlüğü yetkililerine teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca Bölümümüz Öğretim Elemanları ve Teknisyenlerine de teşekkür ederim.



## KISALTMALAR ve SEMBOLLER

|          |                              |
|----------|------------------------------|
| CTP      | : Cam Takviyeli Plastik      |
| GK       | : Gerilmeli Korozyon         |
| EY       | : Eşyönlü                    |
| NR       | : Newman-Raju                |
| NHK      | : Nishioka ve ark.           |
| SEN      | : Tek kenar çatlağı          |
| $E$      | : Elastisite Modülü          |
| $G$      | : Kayma Modülü               |
| $P$      | : Kuvvet                     |
| $\sigma$ | : Normal gerilme             |
| $\tau$   | : Kayma gerilmesi            |
| $V_f$    | : Elyaf hacimsel oranı       |
| $V_m$    | : Reçine hacimsel oranı      |
| $A, n$   | : GK malzeme sabitleri       |
| $da/dt$  | : Çatlak hızı                |
| $\phi$   | : Yüzey çatlağı merkez açısı |
| $f$      | : Elyaf (Fiber)              |
| $c$      | : Kompozit                   |
| $m$      | : Matriks (Reçine)           |
| $a$      | : Çatlak derinliği           |
| $2B$     | : Numune genişliği           |
| $2c$     | : Çatlak boyu                |
| $t$      | : Kalınlık                   |
| $\rho$   | : Yoğunluk                   |
| $T$      | : Süre                       |

## İÇİNDEKİLER

|   |    |
|---|----|
| 1. GİRİŞ .....  | 1  |
| 1.1. Kompozit Malzemeler.....   | 5  |
| 2. Cam Takviyeli Plastik .....  | 10 |
| 2.1. Cam Elyaf .....  | 11 |
| 2.2. Polyester Reçine.....  | 13 |
| 2.3. Filaman Sarma Metodu .....   | 14 |
| 3. CTP'NİN GERİLMELİ KOROZYONU .....  | 17 |
| 3.1. Giriş .....  | 17 |
| 3.2. CTP'nin Gerilmesiz Korozyonu.....  | 18 |
| 3.2.1. Termoset Reçineye Ortam Etkisi .....                                     | 18 |
| 3.2.2. Cam Elyafın Korozyonu .....  | 20 |
| 3.2.3. CTP'nin Korozyonu.....   | 21 |
| 3.3. CTP Gerilmeli Korozyonu .....  | 23 |
| 3.3.1. CTP'de Basit Gerilme-Ortam Etkileşimi .....                              | 25 |
| 3.3.2. Elyaf Kopmasıyla İlgili Gerilmeli Korozyon .....                         | 26 |
| 3.3.3. CTP'nin Asit Ortamında Gerilmeli Korozyonunun Genel Özellikleri .....    | 28 |
| 3.3.4. Asidik Gerilmeli Korozyonda Çatlak Başlama ve İlerleme Mekanizmaları ... | 32 |
| 4. KIRILMA MEKANİĞİ.....  | 37 |
| 4.1. Giriş.....   | 37 |
| 4.1.1. Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği.....                                  | 37 |
| 4.2. Yüzey Çatlağı Analizi .....  | 42 |
| 5. DENEYLER .....   | 47 |
| 5.1. Deney Setinin ve Numunelerin Hazırlanması .....                            | 47 |
| 5.1.1. Eşyönlü Levha Üretimi.....   | 47 |
| 5.1.2. Yüzey Çatlaklı Gerilmeli Korozyon Deney Numunelerinin Hazırlanması....   | 49 |
| 5.1.3. Sabit Yük Deney Seti.....  | 53 |
| 5.2. Deneylerin Yapılışı ve Sonuçlar.....                                       | 54 |
| 5.2.1. Çekme Deneyi .....   | 54 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.2.2. Yakma Deneyi .....   | 55  |
| 5.2.3. Gerilmeli Korozyon Deneyleri .....   | 56  |
| 5.2.4. Gerilmeli Korozyon Çatlak İlerleme Değerlerinin Ölçümü ve<br>Çatlak Geometrisinin Belirlenmesi ..... | 57  |
| 6. NÜMERİK SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....   | 59  |
| 7. SONUÇLAR .....   | 104 |
| 8. KAYNAKLAR .....  | 106 |





## 1. GİRİŞ

Kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanılan bir türü de Cam Takviyeli Plastiklerdir (CTP). Bu tür malzemelerde gerek statik gerekse dinamik yük altında çatlaklar meydana gelebilir. Oluşan bu çatlaklar zamanla büyüyerek ani kırılmalara ve kopmalara yol açabilirler. İmalattan kaynaklanan hatalar ile servis şartlarında ortaya çıkan çatlaklar, malzemenin yüzeyinde bulunabileceği gibi hemen yüzey altında veya iç kısımlarda, kenar ve köşelerde de bulunabilirler.

Çatlakların ilerleme davranışı iki faktörle belirlenebilir. Bunlardan birisi uygulanan yük ve diğeri de ortam etkisidir. Yükün çatlağa etki etme şekline göre ayrılma, kayma veya yırtılma gibi üç değişik hasar tarzı ortaya çıkar. Bunların her-biri ayrı ayrı veya birlikte mütalaa edilebilir. Ortamın kompozit makina veya yapı elemanındaki bir çatlağa etkisine gelince bu da başlı başına incelenmesi gereken bir problemdir. Çünkü bütün bu faktörler kompozit malzemede ani çatlak büyümesine ve dolayısıyla tehlikeli sonuçlara yol açabilirler.

Cam Takviyeli Plastiklerin (CTP) çeşitli takviye geometrileri için çatlak ilerlemesi ve gerilme şiddet faktörlerinin bulunması ile ilgili pekçok çalışma yapılmıştır. Sanford ve Stonesifer [1] eş yönlü CTP`de kırılma tokluğunu, Paris ve Sih`in [2] izotropik malzemeler için geliştirdikleri deney metodunu kullanarak elde etmişlerdir. Kompozit malzemelerin kırılma şekilleri üç adımda incelenir.

1. Mikro çatlak başlangıcı,
2. Yükün artmasıyla bu çatlağın kararlı büyümesi ve dolayısıyla çatlağın makro büyüklüğe erişmesi,
3. Kritik gerilme seviyesinde çatlak ilerlemesinin kararsız hale geçişi.

Tetelman [3, 4] elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kırılma tarzlarını inceleyerek kırılma tokluğunu üç nokta eğme deneyi ile elde etmiştir.

Çok katlı kompozit malzemelerde çatlak ilerleme davranışlarını belirlemek ve kırılma tokluğu değerini bulmak için araştırmalar yapılmıştır [5 - 9]. Bunlardan Garg [5] çapraz katlı grafit/epoksi kompozitlerin kırılmasını, değişik kalınlık ve genişlikteki kompakt çekme numuneleri ile incelemiştir. Aronsson ve arkadaşları [7,8] "Hasar Bölge Modeli"ni kullanarak çatlaklı ve delikli tabakalı kompozitlerin çekme kırılması davranışını üç nokta eğme (TBP), tek kenar çatlaklı (SEN) ve kompakt çekme (CT) deneyleriyle incelemiştir. Malzeme olarak cam elyaf/polyester kullanmışlardır. Kanninen ve ark. [10] elyaf takviyeli kompozitlerin kırılma analizini mikromekanik açıdan incelerken, Solar ve Belzunce [11], R-eğrisiyle kırılma tokluğunu elde etmiştir. Herakovich [12], açılı katlı laminatlarda elyaf oryantasyonlarının, malzeme özelliklerinin ve kenar etkilerinin hasar moduna tesirini incelemiştir.

Çapraz katlı kompozitlerde elyaf-matriks arayüzey ayrılmasının etkilerini ise Bailey ve Parvizi [13] araştırmıştır. Bunun yanı sıra CTP'lerin kırılma mekaniğine elyafın olduğu kadar kompozitin ana elemanı olan matriksin de tesiri büyüktür [14 - 17].

Bir yapı elemanındaki çatlakın yeri, şekli ve büyüklüğü o yapı elemanında ayrı ayrı tesir gösterir. Bir kenar çatlak [18] ile bir yüzey çatlak [19] veya malzemeyi boydan boya delen bir çatlak [20] davranışı aynı olamaz. Herbiri için ayrı model ve analiz gerekir. Yüzey çatlak bu çatlaklar içerisinde en kompleks olanıdır. Çünkü yüzey çatlakının ilerlemesine etki eden faktörler diğerlerine göre hem daha fazla hem de karmaşıktır. Örnek olarak yarı-eliptik veya yarı-dairesel bir yüzey çatlakına merkez açısının etkisi söylenebilir [21]. Diğer çatlaklarda böyle bir açı yoktur. Yüzey çatlakında çatlak ilerlemesi çatlak uzunluğu, çatlak derinliği ve malzemenin kalınlığına göre değişirken [22] diğerlerinde sadece çatlak uzunluğu ve malzemenin kalınlığı probleme etki eder. Ayrıca yüzey çatlakında ön ve arka yüzey magnifikasyon faktörlerinin [23] etkileri de büyüktür.

Yüzey çatlaklarının önemini belirten araştırmaların ilkinin 1960`lı yıllarda Irwin yapmıştır [24, 25]. Irwin [24] yüzey çatlakıyla ilgili gerilme şiddet faktörünün yaklaşık çözümünü düzlem şekil değiştirme halinde elde etmiştir. Irwin`in çözüm metodu baz alınarak daha sonra yüzey çatlakları hakkında birçok çalışmalar yapılmıştır. Levhalarda derin yüzey çatlakları için gerilme şiddet magnifikasyon faktörlerini Anderson ve ark. [26] çıkarmışlardır. Eliptik çatlak yaklaşımı kullanılarak yarı-sonlu elemanlarda yüzey çatlakları için gerilme şiddet faktörünü Kobayashi ve Shah [27, 28] elde etmişlerdir. Little ve Bunting [29] uçak parçalarında yüzey çatlaklarını incelerken, Collipriest [30] de yüzey çatlakları problemlerine deneysel yollarla yaklaşmıştır.

Yüzey çatlakları analizi üzerine daha sonraları yeni çalışmalar yapılarak yeni bakış açıları kazandırılmıştır. Smith [31] yüzey çatlakları problemlerine değişik bir metotla yaklaşarak arka yüzey magnifikasyon faktörünü ilave etmiştir. Rice [32] ise yüzey çatlakları problemlerini yay modeli ile çözmüştür. Bu ara daha sıhhatli sonuç almak ümidiyle birçok kırılma problemlerine uygulandığı gibi sonlu elemanlar analizi ile yüzey çatlakları problemleri incelenmiştir [33 - 38].

CTP`ler korozyona dirençli malzemeler olarak kimyasal tesislerde geniş olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden cam takviyeli plastik kompozitlere ortam etkisinin ilk fiziksel sonucu, sıvı absorpsiyonu ile şişmedir. Şişme nedeniyle oluşan iç gerilmeler elyaf matriks arayüzeyinde ayrılmaya yol açarlar. Reçine içerisindeki suda çözülebilen maddeler mevcuttur. Bu maddeler önce ozmotik basınçla mikro çatlaklar meydana getirirler [39,40]. Sonra süzülerek dışarı taşınırlar. Bu sırada matriks malzemede büzülme olur.

Dolayısıyla ortamın kompozite etkisi, difüzyon ile kontrol edilmektedir [41 - 51]. Sıvı ve gaz difüzyonunun yanında diğer bir ortam etkisi de sıcaklık değişimidir. Farklı ısıl genleşme katsayılarına sahip malzemelerin biraraya gelmiş olması sebebiyle, sıcaklık değişimi CTP`de termal iç gerilmelere ve deformasyonlara yol

açar [52, 53]. Yüksek sıcaklık, difüzyonu artırdığından kompozitin ortam performansı üzerinde etkili olmaktadır [54, 55]. Kompozitlerin ortam performansları, hızlandırılmış ortam testleri ile belirlenmeye çalışılmaktadır [56, 57]. Uzun süreli deneylerde ortam etkisi kısa süredeki etkilerden çok farklı olabilmektedir [58, 59].

CTP`lerin farklı korozif ortamlardaki performansı ortamın cinsine göre çok fazla değişebilmektedir. Dolayısıyla değişik ortamlarda CTP`nin davranışlarını belirlemek için çeşitli araştırmalar yapılmıştır [60 - 62]. CTP`nin ortam direncinin esas olarak reçineden kaynaklandığı bilinmektedir. Elyaf matris ara yüzey özelliklerinin kompozitin performansına etkilerini ise Eakins [63] ve Bascom [64] incelemiştir.

Özellikle gerilmenin de mevcudiyetiyle, sulu asit ortamlarda cam elyaf takviyenin korozyona çok duyarlı olması sebebiyle [65, 66] CTP`lerin kopma mukavemetinin çok altındaki yükleme şartlarında gerilmeli korozyon çatlaması (GK) sonucunda tehlikeli hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu yüzden sulu asit ortamda gerilmeli korozyon çatlak oluşum mekanizması ve kompozitlerin ömrüne etkileri üzerinde araştırmalar yapılmıştır [67 - 74].

Diğer taraftan oluşan GK çatlaklarının çatlak hızının belirlenmesi için muhtelif çalışmalar yapılmıştır [75 - 81]. Bu çalışmalarda çatlakın ilerlemesine etki eden faktörler ile GK`a karşı CTP`lerin dizayn parametreleri tespit edilmiştir.

Pratikte en çok karşılaşılan çatlak tiplerinden biri yüzey çatlaktır. Buna karşılık, şeklinin karmaşıklığı ve ilerleme davranışı üzerinde pek çok parametrenin etkili olmasından dolayı üzerinde çok az çalışılan konulardan biridir. Kompozit malzemelerin mühendislik malzemeleri olarak ele alınması ve araştırılmaya başlanmasının üzerinden 30-35 yıl gibi kısa süre geçmiştir. Bu nedenle, kompozitlerde yüzey çatlakları problemleri üzerinde çok az sayıda çalışma yapılmıştır.

Cam Takviyeli plastikler yapısal olarak korozyona dirençli malzemelerdir, ayrıca paslanmaz çelikler gibi korozyona dirençli diğer malzemelerden hem ucuz hem de hafif olmalarından kimya sanayiinde çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Buna karşılık CTP'ler Gerilmeli korozyona çok duyarlıdırlar. Kimya endüstrisinde kullanılan boru ve basınçlı kaplar, filaman sarma metodu ile üretilmektedirler. Mekanik dayanımının iyileştirilmesi gayesiyle cam takviye yüzdesi artırılmaktadır. Gerilmeli korozyonun özellikle cam elyaftan kaynaklanması ise, bu malzemeyi daha duyarlı hale getirmektedir.

CTP'lerin gerilmeli korozyonu konusunda gerilme şiddet faktörü ile çatlak ilerleme hızı arasındaki bağıntının belirlenmesi amacıyla farklı numune, malzeme ve ortamlarda deneyler yapılmıştır.

Bu gerilmeli korozyon konusunda yapılan çalışmalarda kullanılan malzeme ve ortam türleri aynı seçilerek sonuçlar kıyaslanmıştır.

Yüzey çatlağında gerilmeli korozyon çatlak ilerleme mikromekanizması ve çatlak ilerleme davranışı ile malzeme sabitlerinin belirlenmesi amacıyla bu çalışma başlatılmıştır. Ayrıca elde bulunan yüzey çatlağı Gerilim Şiddet Faktörü formüllerinin Gerilmeli Korozyon koşullarında kompozitlere uygunluğunun incelenmesi amaçlanmıştır.

### 1.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, fiziksel olarak birbirinden farklı ve mekanik olarak birbirinden ayrılabilen iki veya daha fazla bileşenden meydana gelir. Birbirinden farklı bu iki bileşen matriks (reçine) malzeme ve matriks içine dağıtılmış olan takviye malzemesidir. Bu bileşenler birbiri içinde çözünmezler. Birleşme genellikle fizikseldir. Kompozitin özelliği bileşenlerinin özelliklerinden daha üstündür. Yüksek mukavemet ve rijitliğe sahip elyafla, kimyasal dirençli plastik matriks malzemedir.

üretilen kompozitin mukavemet ve rijitliği elyafa, kimyasal direnci ise plastiğe yakın olur.

Yapay kompozitlerin yanında tabiatta da kompozitlere pek çok örnek mevcuttur. Kemik, yapısı itibarıyla bir kompozittir. Yine ağaçlar doğal bir kompozit olup selüloz elyaf takviye ve lignin yapı ise matriks malzeme olarak düşünülebilir. Ayrıca mikro seviyede çok fazlı metal alaşımları, plastikler, seramikler, refrakterler kompozit malzeme yaklaşımı ile incelenebilir. Örnek olarak, sade karbonlu çelik (%99.2 Fe, %0.8 C) 800°C`dan itibaren düşük hızla soğutulduğunda sünek ve yumuşak ferrit fazı ile sert ve gevrek sementit fazları tabakalar halinde dizilerek yüksek mukavemetli ve tok bir malzeme elde edilir ki bu ise kompozit malzeme yapısıdır.

Tarihte antik çağdan itibaren kompozitler kullanılmıştır. Antik Mısır`da, Anadolu`da ve bir çok eski medeniyetlerde samanla toprak bir araya getirilerek kerpiç kompozitler, bitki elyafı ile zift karıştırılarak kano yapımında kullanılmıştır. Kompozitlerin endüstriyel anlamda kullanımı 1899`da fenolformaldehit ve 1907`de fenolik plastiğin bulunmasıyla başlamıştır [82]. 1935`te cam elyafı, 1936`da polyster reçine, 1938`de ise epoksi reçine cam takviyeli plastik kompozitlerin yapımında yaygın olarak kullanılmıştır.

Cam takviyeli plastik kompozitler bu tarihten itibaren, özgül mukavemet ve rijitliklerinin yüksek olması, korozyon ve yorulmaya dirençli olmaları gibi havacılık ve uzay sanayiinde kullanılmalarına neden olmuştur. Bu kullanım alanı kompozitlerin önemini daha da arttırmış ve çalışmalar hızlanmıştır. 1958`de grafit elyaf, 1959`da bor elyaf, 1964`de "Liquid Nitrogen Processing" ilk defa kırılmış cam elyafı ile takviyeli Naylor-66 termoplastik matriks malzemeye kullanılmıştır. Böylece termoplastik matriks malzemelerin önemi anlaşılmış ve araştırmalar bu konu üzerine yoğunlaştırılmıştır. 1971`de Du Pont tarafından Kevlar (Aramid) elyaf üretilmiştir. Bu elyafın diğerlerine göre bazı üstünlükleri vardır.

Günümüzde kompozitlerin kullanımı çok genişlemiş olup, günlük hayatta her alanda görmek mümkündür. Klasik malzemelere göre avantajları bu kullanım alanlarının artmasındaki önemli faktörlerden biridir. Örnek olarak, cam-polyester kompozitler kara taşıtlarının karoser imalatında, hafiflik, korozyon direnci ve yalıtım özelliklerinden dolayı konteyner imalatında, korozyon direnci, yekpare imalat gibi sebeplerle tekne yapımında, spesifik mukavemet ve rijitlik gibi özelliklerinden dolayı havacılık ve uzay sanayiinde %90'a varan oranlarda kullanılmaktadır. Yine elektrik kontak malzemesi olarak yüksek elektrik ve termal kondüktiviteli gümüş ve bakır gibi metallere, ergime sıcaklığı yüksek refrakter metallere, metal oksitler ve grafitin kombinasyonlarından imal edilirler. Yüksek dielektrik sabitleri nedeniyle devre kesici olarak, nükleer reaktörlerde yakıt olarak ve radyasyona dirençli koruyucu imalatında; yapılarda polimer beton, sandviç konstrüksiyon şeklinde; boru ve tank olarak kimya sanayiinde kullanılmaktadır. Kompozitlerin bu kadar geniş kullanıma sebep olan özellikleri kısaca özetlenirse şunlar yazılabilir.

- Avantajlı mukavemet/ağırlık, rijitlik/ağırlık oranı, sertlik ve hafiflik,
- Sınırsız kalıplama boyutları,
- Kolay üretim,
- Uzun yorulma ömrü,
- Çok sayıda üretim tekniği,
- Küçük yatırım sermayesi,
- Düşük maliyetle az sayıda üretim imkanı,
- Tasarım esnekliği,
- Diğer malzemelerle bağdaşma özelliği,
- Mükemmel su dayanımı,

- Çok sayıda kimyasal maddeye dayanım,
- Hava koşullarına ve ultraviyole ışınlarına dayanım,
- Kendinden renklendirme olanağı,
- İstenildiği takdirde yanmazlık özelliği,
- İsteğe bağlı olarak ışık geçirgen özellikte üretilebilme,
- Çok iyi elektrik ve termik özellikler,
- Görünüş güzelliği. Kompozitler bileşenleri açısından çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler. Bileşen türü ve yapısal açıdan başlıca dört gruba ayrılabilirler.

1. Elyafli kompozitler : Takviye malzemesi elyaf halindedir.

a. Sürekli elyafli,

b. Dokuma "

c. Yönlenmiş "

d. Keçe "

e. Dağılmış "

2. Tabakalı kompozitler : Organik veya inorganik malzemeler tabakalar halindedir. Teflon ve kauçuk kaplı metalik levhalar örnek olarak sayılabilir.

3. Parçacıklı kompozitler : içerisinde mikroskopik katkı bileşenleri vardır.

a. içi boş ve dolu küreli takviyeliler,

b. Pulcuklu takviyeliler,

c. Viskerli "



4. Hibrid (çok bileşenli) kompozitler: Birden fazla takviye malzemesi birlikte kullanılır. Jüt ve cam elyafın birlikte kullanılması örnek olarak sayılabilir.

Sınıflandırmaya çalıştığımız bu kompozitler konusunda çalışmalar devam etmektedir. Haklı gerekçelerle klasik malzemeler yerine kendini kabul ettirerek kullanım alanını gün geçtikçe arttırmaktadırlar.



## 2. CTP-CAM TAKVİYELİ PLASTİK

Kompozit malzemelerin en yaygın türü, elyaf takviyeli kompozitlerdir. Elyaf takviyeli kompozitlerde ise takviye malzemesi olarak birinci sırayı cam almakta, asbetst ve karbon ise ikinci ve üçüncü sırayı takip etmektedirler. Matriks malzeme olarak plastik reçineler en çok kullanılan tür olup, bunlardan da polyester, ucuzluğu nedeniyle birinci sırayı almaktadır. Yüksek mukavemet ve kimyasal dayanımının yanısıra çekme yüzdesinin düşüklüğü, epoksi reçinenin uzay ve havacılıktan, ev ve spor aletleri yapımına kadar çok geniş bir alanda kullanımına imkan vermektedir. Bununla birlikte hem daha pahalı ve hem de imalatınının polyester reçineye göre daha zor oluşu epoksileri kullanımda ikinci sıraya düşürmüştür. Grafit ve kevlar elyaf-epoksi kompozitler "ileri kompozitler" olarak uzay ve havacılık sahasının temel malzemeleridir.

Vinilester reçineleri, polyester reçineler içerisinde de sınıflandırılabilir. Vinilester reçinenin ana zincir bağı epoksi, polyester veya ürethan reçineden meydana gelebilir. Bu iskelet yapının uç kısımlarında akrilat veya metakrilat çift bağı bulunuşu reçineyi asit, baz ve çözücülere karşı daha dayanıklı yapar.

Cam takviye ile kullanılan diğer bir reçine türü furandır. Furan reçineler, kimyasal dayanımlı kiremit, tuğla ve çimento yapımında bağlayıcı olarak kullanılır. Oksidasyon haricinde diğer reçinelere göre kimyasal dayanımı daha iyidir.

Yüksek sıcaklıklarda, poliamid reçine diğerlerine göre en dayanıklı reçine türüdür. Mekanik özellikleri de oldukça iyidir. Su absorpsiyonunun yüksek olması kullanımda dikkat gerektirmektedir.

CTP'nin imalat esnekliği ve kolaylığı bu malzemenin üstünlüklerinden biridir. En çok kullanılan imalat şekli el yatırmasıdır. Püskürtme, reçine enjesiyonu, köpük kalıplama, soğuk ve sıcak pres, elyaf sarma (filaman sarma), savurma döküm, profil çekme, devamlı levha üretimi, hazır levha ve hamur bileşimiyle üretim (prepreg) gibi pek çok imalat yöntemi kullanılmasına rağmen ikinci bölümde konu ile ilgisi nedeniyle kısaca elyaf sarma yönteminden bahsedilecektir.

CTP malzeme içerisinde elyaf ve matriks reçineden başka dolgu maddeleri, pigmentler (boya malzemesi), özel amaçlı katkılar (viskozite artırıcı, alev geciktirici, yağlayıcılar, ışık stabilizatörleri vb. ) bulunmasına rağmen cam takviyeli plastiklerin fiziksel özellikleri, esas olarak cam elyaftan kaynaklanmaktadır. CTP'nin türüne göre kompozitin %25-85'ini cam elyaf oluşturabilmektedir.

### 2.1. Cam Elyaf

Cam elyaf, termoset reçinelerde en çok kullanılan takviye malzemesidir. İnorganik sentetik elyafın en yoğunu olmasına rağmen spesifik mukavemeti oldukça yüksektir. Cam elyafın yanmaması ve 370° C'da mukavemetinin %70'ini, 540° C'da ise %25'ini koruması en önemli tercih sebeplerindendir [85].

Cam elyaf takviye türlerinin imalatında ilk adım sürekli elyafın elde edilmesidir. Sürekli elyaf, sonsuz uzunlukta münferit liflerin birleşmesinden meydana gelmiştir. Bu elyafın üretimi ise ısı altında camın çok ince gözenekli (0.8-3.2 mm) platin eleklerden belirli bir hızla çekilmesiyle elde edilir. Elyafın kalınlığı çekme hızıyla değişir. Elyaf, çekme işlemi sonrasında bir bağlayıcı maddeyle kaplanır. Bağlayıcı malzemenin görevleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Elyafın yüzeyini kullanıma kadar dış etkilere korumak,
2. Yağlama işlemi yaparak kayma yüzeyi oluşturmak,

3. Organik reçine ile inorganik elyaf arasında kimyasal bağ teşkil etmek. Bu işlem sonrasında bobin üzerine sarılan elyaf demetine KEK adı verilir. bobinler kurutma fırınlarında kurutulduktan sonra, elyaf demetleri bükülerek veya bükülmeden bir arada sarılarak değişik çaplarda demetler meydana getirilir. Liflerin çapı teks sayısı ile karakterize edilir. Teks sayısı 400 liften oluşan 1000 m uzunluğundaki elyaf demetinin gram olarak ağırlığını gösterir. Cam elyaf, kullanım amacına göre değişik bileşimlerde üretilir. Kimyasal olarak cam,  $\text{SiO}_2$  iskeletine sahip  $(-\text{SiO}_4-)$  n polimer yapısındadır. Bir  $\text{SiO}_2$  molekülü merkezdeki Si iyonu 4 tane O iyonuyla çevrilmiş tetrahedral konfigürasyona sahiptir. Saf  $\text{SiO}_2$  yani kuvarsın ergime sıcaklığı çok yüksek olduğundan, işlenebilme sıcaklığını düşürmek için cam şebekesini kesintiye uğratabilen veya değiştirebilen "şebeke modifikatörleri" kullanılır. Bu amaçla kullanılan en yaygın katkıları metal oksitlerdir. İlk imal edilen cam, A camı olarak adlandırılan alkali soda-kireç camıdır. A camının elektrik ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için üretilen düşük alkalili alumino-borosilikat E camı, en çok kullanılan cam tipidir. Özel uygulamalar için değişik kompozisyonlarda cam elyaf üretilmiştir. Kimyasal dayanım amacıyla, sodyum-borosilikat C camı kullanılır. Bu camın en yaygın kullanım şekli, CTP laminatlarda korozyona dirençli bir bariyer tabakası elde etmek amacıyla jelkot reçine takviyesi olarak kullanılan yüzey tülüdür.

Yüksek mukavemetli magnezyum-aluminosilikat S camı, özellikle uzay ve havacılık sanayiinde, özgül mukavemetinin yüksekliği nedeniyle tercih edilir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda mukavemetini E camına göre daha iyi korur. Yüksek elastisite modüllü M camı, düşük dielektrik ve düşük yoğunluklu D camı ve radyasyona karşı uygulamalar için L camları da üretilmiştir.

CTP kompozitin dizaynında cam elyafın kimyasal bileşimi ve elyaf çapının seçimi ile birlikte en önemli kriter takviye malzemesinin geometrisidir. Bu amaçla cam takviye, bükülmüş veya düz sürekli elyaf, keçe, kumaş ve kırılmış kısa elyaf (3-5 mm) gibi değişik tiplerde üretilir.

Cam fitil, bir veya daha fazla cam elyaf demetinin bükümsüz olarak mandrel üzerine sarılması ile oluşur. Değişik uygulamalar için değişik özelliklerde üretilirler. Kullanılacak sürekli elyaf yumuşak ve ince liflerden meydana gelmeli, fitili oluşturan demetler paralel ve eşit uzunlukta olmalıdır.

Keçe, kırılmış elyafın tesadüfi bir dağılımla birbirine bağlanarak tek düze bir yapı meydana getirmesiyle oluşur. Genellikle kırılmış elyaf boyu 50 mm'dir. Keçe ağırlığı 200-600 g/m<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Reçine yüzdesi yüksek, korozyona dirençli katların üretiminde keçe malzeme kullanılmaktadır.

Cam kumaş, düz fitillerden veya bükülmüş elyaftan hazırlanmış olarak iki sınıfa ayrılabilirler. Bükümlü iplik esaslı kumaşlar ve dokumalar, tekstil bağlayıcı uygulanmış ve bobin üzerine sarılmadan önce bükülmüş, devamlı cam elyafından dokunurlar. Cam kumaşlar, elektrik tesisatında, baskılı devrelerde, devre kesici tüplerde, taşıt gövdeleri tank, tekne gibi birçok alanlarda kullanılır.

Kırılmış kısa elyaf daha çok termoplastiklerin takviyesinde kullanılmaktadır. Bazı uygulamalarda diğer takviye malzemeleri ile birlikte de kullanılabilir.

## 2.2. Polyester Reçine

Polyesterler termoplastik ve termoset olmak üzere iki ana grupta toplanırlar. Termoplastik polyesterler, doymuş polyesterler olup PET-Polietilen teraftalat, terilen türü, enjeksiyon kalıplama gibi sıcak şekillendirilebilen plastiklerdir. Termoset polyesterler ise doymamış halde olup uygun bir katalizör vasıtasıyla üç boyutlu zincir (cross-link) şebekesi oluşturarak sertleşen reçinelerdir. CTP kompozitlerde yaygın olarak kullanılan tür termoset polyester reçine olduğundan termoplastik polyesterlerden bahsedilmeyecektir.

Termoset polyester reçine, reaktif monomer içerisinde çözünmüş, doymamış haldeki bir zincir yapıdan meydana gelmiştir. bu zincir yapı, doymuş ve doymamış asitlerle bir veya birkaç tane glikol ihtiva eder. Reaktif monomer olarak genellikle

stiren kullanılır. Genel amaçlı ortoftalik reçinelerde doymamış asit olarak ortaftalik asit kullanılır. İzofthalik reçineler daha pahalı olmalarına karşılık, bunların korozyon dirençleri daha iyidir. Korozyon direnci en yüksek olan reçineler bisfenol-A/fumarat reçineleri ve vinilester reçinelerdir. Bisfenol-A/glikol polyesterin stiren içerisindeki çözeltisinden meydana gelir. Vinilesterler ise epoksi reçineleri akrilik esterlerinin stiren monomerindeki çözeltisidir.

Polyester reçine seçiminde gözönüne alınacak faktörler şunlardır:

1. Doymuş ve doymamış asit türleri,
2. Doymamışlık oranı, yani doymamış asit miktarının doymuş asit miktarına oranı,
3. Glikol türü,
4. Polimerizasyon derecesi, yani molekül zincirinin boyutu,
5. Reçine/monomer oranı,
6. Hızlandırıcı ve inhibitör yüzdeleri.

### 2.3. Filaman Sarma Metodu

Elyaf sarma yöntemi, uçak sanayiinde, roket namluları, kapalı uçlu silindir, küre, toroid ve basınçlı borular gibi özel üretimlerde yüksek basınç dayanımı sağlamak için kullanılır. Genel prensibi reçine banyosundan geçen elyafın döner bir kalıp üzerine belirli açılarda sarılması ve kalıp üzerinde sertleşmesinin sağlanmasından ibarettir. İstenilen sarım açısında sarım yapılabilmesi için döner kalıp tahrik ünitesiyle elyafı ileri geri taşıyan arabanın tahrik ünitesinin kontrollü ve birbiriyle belli bir orantıda çalıştırılması gerekir. Filaman sarma metodunda mekanik olarak her sarım açısının oluşturulması oldukça zordur. Bu bakımdan kontrol ünitesinin sayısal denetimli bilgisayar kontrollü olması universal çalışma (sarım) için

gerekmektedir. Bu bakımdan modern filaman sarım tezgahları bilgisayar denetimli olarak yapılmıştır. Başlıca iki tür sarımdan söz edilebilir.

- a. Kuru sarım,
- b. Islak sarım.

Kuru sarımda, elyaf belirli bir gerginlikte istenilen sarım açısında kalıp (mandrel) üzerine sarılır. Sarım işlemi  $+\theta$  ve  $-\theta$  açılı katlar şeklinde oluşturulur. Kaç kat oluşturulacaksa veya istenilen kalınlığa göre sarım işlemi tamamlanır. Daha sonra reçine emdirme işlemi rulolarla hava kabarcığı kalmayacak şekilde yapılır. Bu işlem tamamlandıktan sonra, mandrelle birlikte reçine çeşidine uygun süre ve sıcaklıklarda sertleştirme işlemi yapılır. Mandrelden çıkarıldıktan sonra post-cure işlemi ile yapıya nihai sertlik ve mukavemet kazandırılır. Bu sarım metodunun mahzurlu tarafı kuru sarımdan dolayı elyaf hasarının fazla olmasıdır.

Islak sarım metodunda, kalıbın dönmesiyle reçine banyosuna giren elyaf, sıyırıcı arasından ve germe tamburlarından dolaşarak kalıp üzerine sarılmaya başlar. Reçine banyosuna, reçine beslemesi elle veya otomatik olarak yapılır. Islanmış elyafın 20 N dan daha fazla gerilmemesi gerekir. Çünkü aşırı germe elyafın hasara uğramasına veya kopmasına neden olur. Sarım işlemi tamamlandıktan sonra yine reçine cinsine bağlı olarak mandrelle veya mandrelden çıkarıldıktan sonra iki kademedede yapıya yeterli sertlik kazandırılır.

GKu hızlandırmaları açısından malzeme hataları büyük önem taşımaktadır. Boşluklar, kuru noktalar, zengin reçineli bölgeler, önceden hatalı bölgeler, sınırlı hasar bölgeleri ve düzensiz sertleşme görünür hatalar olarak sayılabilir. Reçine dağılımı ile miktarı ağırlık ve kalınlık kontrolü açısından önemlidir. Ağırlık ve kalınlıktaki düzensizlik ise uzay ve havacılıkta düzensiz gerilim konsantrasyonları sebebiyle önemlidir.

Reçinenin ağırlık toleransı  $\% \pm 2$  alınır. Elyaftaki tolerans ise  $\% \pm 1.5$  'i geçmemelidir. Reçine miktarı sarma gerilimi ile doğrudan bağlantılıdır. Sarma gerilimi fazla olursa aşırı sıkışmadan dolayı iç ve dış tabakalarda elya ile reçine arasında önemli farklılıklar olur. Fazla gergin sarma ayrıca elyafa bir ön gerilme etkisi yapacağından yük taşıma kabiliyetini azaltır ve mandrelde çökmelere sebep olabilir. Sarma gerilimi düşük olursa boşluk miktarı artar. Bu da tabakalar arası kayma mukavemetini azaltır. Dolaylı olarak basma ve burkulma direncini düşürür. Optimum elyaf demeti, elyafın bir arada olmasını gerektirir. Demeti oluşturan her elyaf düzgün olarak reçine ile kaplanmalı ve gerginlikleri de aynı olmalıdır. Fakat bunu sağlamak teknolojik olarak zordur. Demet genişliğinin kontrolü de zordur. Bu ise elyaf gerilimi ile ancak kontrol edilebilir. Sarım bant genişliği 1.3 - 3.2 mm arasında değişir. Bant genişliğindeki değişimler, reçinece zengin bölgeler demek olduğundan mukavemeti azaltırlar.

Elyaf bantının pozisyonu ve sarım açısı sarım tezgahı ile mandrelin hassasiyetine bağlıdır. Elyafın düzgün sarılamaması mukavemetçe zayıf olan dengesiz bölgelerin oluşmasına neden olur.



### 3. CTP`LERİN GERİLMELİ KOROZYONU

#### 3.1. Giriş

Malzeme seçimi ve dizaynda, üzerinde durulması gereken önemli konulardan biri de korozyondur. Özellikle metalik malzemelerde, büyük ölçüde hasar ve zarara yol açan bu olaydan korunmak için ciddi boyutlarda çalışmalar devam etmektedir. Katodik koruma, korozyona dayanıklı malzeme ile kaplama ve alaşımlama gibi önlemlerin yanında en etkili koruma yapı ve makina elemanının antikorozif malzemeden imalidir.

Korozyona dirençli malzemelerin en yaygın kullanım alanı kimya sanayiidir. Kimyasal maddelerin taşınması ve üretimi alanında, mükemmel kimyasal dayanımı ile birlikte hafiflik, imalat kolaylığı ve esnekliği, diğer antikorozif malzemelere nazaran ucuzluğu gibi faktörler CTP`leri bu alanda rakipsiz kılmaktadır. Bunun yanında korozyonun önemli olduğu deniz ve kara taşımacılığı, denizaltı çalışmaları, nükleer araştırmalar ve okyanus mühendisliği alanlarında CTP malzeme ön plana çıkmaktadır [83].

CTP`lerin korozyon direnci esas olarak takviye malzemesini ortam etkilerinden koruyan polyester ve epoksi reçineden kaynaklanmaktadır [84]. Cam takviyeli polyesterler alkalilerin polyesteri sabunlaştırmalarına ve kuvvetli asitlerin ise reçinenin yapısını bozmalarına karşılık [85] çoğu korozif ortamlarda inerttirler. Sıvı ve gaz ortamın ilk etkisi absorpsiyon sonucu şişme ve bunun sonucunda da elyaf-matrix ayrılmasıdır. Absorpsiyon ve şişme sonucunda malzemede tersinir ve kalıcı özellik kayıpları görülmektedir [86].

CTP bir elemanın ortam performansının "hızlandırılmış yaşlandırma deneyi" [87] ile belirlenmesi oldukça hatalı ve tehlikeli sonuçlar doğurabilmektedir. Bu deneyde CTP parça 2 saat süre ile kaynar suda bekletildikten sonra görsel ve mekanik özellik değişimlerine göre karar verilmektedir. Gerilme reçinenin geçirgenliğini artırdığından korozyonu hızlandırır [88, 89]. Şişme sonucu ortaya çıkan gerilmeler ise arayüzey ayrılmasına yol açarlar [90]. Arayüzey çatlaklarına bağlı sürünme olayı, korozyonun arayüzey bağına etkisi nedeniyle hızlanmaktadır. Ortam-gerilme etkileşimi sonucu cam liflerin kopması halinde korozyonun etkisi çok daha şiddetli olmaktadır. Bu etki saf suda, eş yönlü, sürekli cam elyafı takviyeli polyester levhalarda açık olarak görülmüştür [91]. En şiddetli gerilmeli korozyon sulu asitte oluşmaktadır [92].

### 3.2. CTP'nin Gerilmesiz Korozyonu

Gerilme uygulanmaksızın korozyon, ortamın matriks ve elyafa etkisi ile meydana gelir [85]. Ayrıca ortamın matriks-elyaf arayüzey yapısına etki derecesi de korozyon ortamında kompozitin özelliklerinin korunumunu belirleyen en önemli faktördür [86].

#### 3.2.1. Termoset reçineye ortam etkisi

Cam elyaf takviye ile kullanılan en yaygın reçine türü polyesterdir. Daha pahalı olması nedeniyle ikinci sırayı epoksi reçine almaktadır. CTP'nin kimyasal direnci, korozyona duyarlı cam elyafı ortam etkisinden koruyan reçinenin yapısına oldukça bağlıdır. Polyester reçinede bu özellik, reçine formülasyonunda kullanılan doymuş ve doymamış asit bileşen yüzdeleriyle ayarlanmaktadır. Ortam etkisi çözücü, buhar, nem, gaz, sıcaklık, rüzgar ve ultraviyole ışınlarından meydana gelmektedir [93]. Ultraviyole ışınları reçine yüzeyinde ilave sertleşmeyle yüzeyin gevrekleşmesine, dolayısıyla yüzey çatlaklarına yol açarak, malzemeyi ortama daha duyarlı hale getirirler [94, 95].

Çözücülerin reçineye etkisi hem fiziksel hem de kimyasal olabilir [85]. Kimyasal atak genellikle ester bağlarının hidrolizi, çift bağların oksidasyonu ve halojenizasyonu ile sınırlıdır. Alkaliler polyestere diğer çözeltilere nazaran daha saldırgandır. Oksidasyon olayı, kuvvetli oksitleyici bir asit veya hipoklorit bir ortamda görülebilir ve polimer zincirindeki herhangi bir kalıntı doymamışlığa yönelir [85 - 96].

Çözücü absorpsiyonunun ilk fiziksel sonucu şişmedir. Polyester ve epoksi reçine önemli derecede non-polar karakter sergiler. Bu yüzden sulu ve organik polar çözeltilere nazaran, non-polar çözeltileri daha fazla absorbe ederler [90]. Toluen gibi organik çözücülerde, çözücü ağırlığına bağlı olarak emilme %16 ya kadar çıkabilir. Sulu çözeltiler için genelde emilme yüzde birkaç mertebesindedir [51]. Çözücüler reçineyi plastikleştirerek rijitlik ve mukavemetini azaltırlar [86]. Başlangıçta süzülme olmadığından bu etki tersinir olabilir. Sulu çözeltilerde düşük sıcaklıklarda, özellik kaybının fazla olmadığı Bunsell ve ark. tarafından gösterilmiştir [97]. 25 °C da suda bekleyen epokside %1 ağırlık azalması meydana gelmiştir. Yüksek sıcaklıklarda ise şişme, süzülme ve kimyasal atak sonucu önemli derecede özellik kaybı oluşmaktadır. Kaynar suya maruz polyester ve epoksi reçinelerin ağırlık ölçümünde, başlangıçta şişme, daha sonra çekme ve ağırlık azalması gözlenmiştir [86 - 98].

Süzülebilen düşük molekül ağırlıklı bileşenler ya başlangıçta reçine içerisinde bulunmakta veya kimyasal reaksiyon sonucunda (hidroliz) ile ortaya çıkmaktadırlar. Süzülme ile belirgin disk şeklinde iç çatlaklar oluşmaktadır [40]. Bu çatlakların, reçine içerisindeki ince paketlerde bulunan yüksek konsantrasyonlu çözünmüş inorganik impüritelere suyla çözülerek atılması sonucu oluştuğu sanılmaktadır. Reçine burada yarı geçirgen bir zar görevi yapmaktadır [85]. Su paketleri çatlak oluşturacak kadar bir osmotik basınç geliştirebilirse kırılma dayanımını düşürürler. Süzülme sonucu, sıcak suya maruz polyesterin rijitlik ve mukavemetine ek olarak kırılma tokluğu da azalma göstermiştir [99].

### 3.2.2. Cam elyafın korozyonu

Amorf silikadaki  $\text{SiO}_2$  şebekesi, kuvvetli bazlardan etkilenebilmesine rağmen oldukça inert sayılabilir. Silikat camlarının üretiminde, şebeke modifikasyon oksitlerinin katılması bu tür malzemeleri suya ve sulu çözeltilere duyarlı hale getirir. Su, alkali ve asitlerin cama etkileri aşağıdaki gibi gösterilebilir [100].

1. Alkali silikatlar su ile dealkalize olurlar.  $\text{Si - ONa} + \text{H}_2\text{O} = \text{Si - OH} + \text{Na}^+ + \text{OH}^-$  Alkaliler Si-O-Si bağlarına da etki ederler. Yüzeydeki iyonlar su ile ayrılırlar. Na yerine Al-oksit iyonlarının katılması camın duyarlılığını azaltır.

2. Asitlerin etkisi ile silika şebekesindeki alkali çözeltiler, çözünerek silikayı yalnız bırakırlar. Camda silika oranı artarken şebeke tahrip olur.  $\text{Si - OM} + \text{H}^+ = \text{Si - OH} + \text{M}^+$

3. Alkali çözeltileri ise silika şebekesine atak yaparak doğrudan camın kendisini çözerler.

$\text{Si - O - Si} + \text{OH}^- = \text{Si - O}^- + \text{Si - OH}$  Alkali dirençli camlar için  $\text{ZrO}_2$  modifikatör kullanılır.

Wiederhorn ve ark. [101], sabit yük altında gevrek durumdaki hataların büyümesine, gerilmenin artırdığı kimyasal atağın neden olduğunu öne sürdüler.

Cam elyafı yapımında kullanılan boro-silikat E-camı gerilmeli korozyon çatlamasına çok fazla duyarlı değildir [102]. Hasar için oldukça uzun süre ve yüksek gerilme gereklidir. Su ve alkaliler mukavemeti büyük ölçüde düşürürler. Oda sıcaklığında sulu çözeltilere daldırılan elyafta birkaç saat sonunda önemli mukavemet azalması görülür. Daldırma süresi uzarsa liflerde tabii spiral çatlaklar oluşur [66]. Lif çatlamasının başlangıcının camdaki alkali iyonlarının konsantrasyonuna bağlı

olduđu, camdaki Na ve K iyonlarıyla asitteki H iyonlarının deđiřimi sonucunda, deđiřmemiř bir i kısım ve bořaltılmıř bir kabuk meydana geldiđi dūřunūlūyordu. Bořaltılmıř dıř kabukta, molar hacimdeki azalma iç kısım tarafından sınırlandırılan būzūlmeye yol açar. Bu ise uygulanan dıřgerilmeye ek olarak, oluřan yūzeysel çekme gerilmesinin etkisiyle elyafın çatlamasına yol açar. Elmer, ozeltideki camdan sūzūlmūř oksitlerin incelenmesiyle normalite sırasıyla CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve MgO bileřiklerinin bulunduđunu belirlemiřtir [103]. Ayrıca Caddock ve ark. elyafın demineralizasyonunun difūzyonla kontrol edildiđini, bunun da cam elyafın dıřyūzey yapan oldukça bađımlı olduđunu rapor etmiřlerdir [65]. Oluřan yūzeysel çatlak ilerleyerek elyafı tamamen koparabilir. Uygulanan dıřgerilmenin būyūklūđu ile proses daha da hızlanır. Organik ozeltelerde dođrudan elyaf korozyonu gōrūlmemesine rađmen, cam liflerini havadakine gōre daha gevrekleřmesiyle kırılma yūzey enerjisinin deđiřimi mūmkündür [104].

### 3.2.3. CTP'nin Korozyonu

ozūcū, özellikle su, CTP parçanın yūzeyinde ve iç kısmında arayūzey ayrılması, kabarcıklanma ve çatlama gibi çeřitli hatalar meydana getirir. Malzemedeki zellik kaybı, absorbe edilen sıvının cins ve miktarına bađlıdır. Ayrıca kompozit malzeme açısından reçine ve elyafın özelliklerine, elyaf hacim yūzdesi ve oryantasyonuna, sertleřme derecesine dolayısıyla hızlandırıcı ve sertleřtirici yūzdelerine, sertleřme sıcaklıđı ve sūresine, elyaf ıslanma kalitesine, bořluk muhtevası gibi üretim deđiřkenlerine ve genel laminat kalitesine bađlıdır.

Dūřuk sıcaklıklarda CTP`ye solvent difūzyonu Fickean (tařınan tūrler arasında hiçbir kimyasal reaksiyon olmaz) gōrūnmektedir [97, 50, 51]. Daha yūksek sıcaklıklarda kimyasal reaksiyon oluřabileceđi ve uzun sūrelerde (laminatta hasar meydana gelebileceđinden) Fickean olmayan difūzyon gōrūlebilir [49].

Pritchard ve Speake 30-100°C arasında cam/polyester laminatta su difūzyonu ve mekanik özellikleri test etmiřlerdir [49]. Cam polyester kompozitte, tersinir su

absorbsiyonun Fickean difüzyon ile meydana geldiğini, ikinci adım olarak kalıcı laminat hasarından sonra absorbsiyonun non-Fickean difüzyonla meydana geldiğini göstermişlerdir.

Difüzyon derecesi sıcaklığa kuvvetle bağımlı olduğundan, özellikle reçinenin termal distorsiyon sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklardaki deneylerle, malzemenin uzun süre ve düşük sıcaklıklardaki davranışı tam olarak belirlenemez. Üç yıla varan süre ile su içerisinde test edilen laminatların test süresi sonundaki mekanik özelliklerinin "gerçek absorbe edilen su miktarına" bağlı olduğu ifade edilmiştir. Bu çalışmada su ile süzülerek atılan maddeler de hesaba katılarak su absorbsiyon miktarı yeniden hesaplanmıştır [49].

Kompozit bir malzemeye bir solvent veya çözeltinin emilmesi reçine ile dolgu fazlarının özelliklerine ve arayüze bağlıdır. CTP`de cam dolgu, solventi absorbe etmediğinden difüzyon yolunu uzatarak geçirgenliği azaltır [50]. Difüzyonu azaltmak için parça yüzeyinin cam pulcuklarla kaplanması da olumlu sonuçlar vermektedir [105]. Elyaf hacim yüzdesi ve oryantasyonu da aynı nedenlerle geçirgenliği büyük ölçüde etkilemektedir [97]. Menges ve Gitschner [90], CTP`nin mukavemetine su emilmesi sonucu matriks şişmesinin etkisini incelediler:

Eş yönlü takviye halinde lif doğrultusunda şişmenin son derece sınırlı olmasına karşılık, enine doğrultuda şişme oldukça fazla görülmektedir. Benzer etkiler ince numunelerde, su emilme hızı ve miktarını yüzeye göre elyaf oryantasyonunun kontrol ettiğini bulan Bunsell ve ark. tarafından da gözlenmiştir [97].

Menges ve Gitschner [90], enine matriks şişmesiyle oluşan iç gerilmelerin arayüzeyde büyük gerilme yığılmalarına yol açarak çatlama neden olduklarını ileri sürdüler. 60°C`un altında bile herhangi bir dışgerilme olmaksızın çatlama olacağı modelini kurdular. Yüksek sıcaklıklarda ise reçine şişmesinden sonra süzülme [49, 98] sebebiyle çekme olduğundan bu değişiklikler için ilave modeller gereklidir.

Reçine ve elyaf içerisindeki suda çözünbilir tuzlar arayüzeyde su ceketleri halinde birikerek osmotik basıncı artırır [39, 40] ve ayrılmayı elyaf boyunca ilerletebilirler. Su atağı ile arayüzeydeki ayrılma, çıplak cam elyaf halinde çok daha hızlı olmaktadır [64]. Silan, CTP'nin özellikle ortam performansını iyileştirmektedir. Silan ayrıca elyaf reçine arasındaki bağlanmayı kuvvetlendirdiğinden boşluk miktarını azaltarak mukavemette ve korozyon dayanımında da iyileşme sağlamıştır [106].

CTP kompozitte ortam etkisi yüzeyde daha şiddetli olmaktadır. Reçine süzülmesini takip eden çekme (büzülme) elyaf eksenini boyunca yüzey çatlaklarına yol açmaktadır [42]. Yüzey atağı özellikle, tam sertleşmemiş reçinede daha etkilidir. Zayıf sertleşme hem oksijen gecikmesi hem de stiren buharlaşmasının ortak sonucu olmaktadır. Düşük sertlikteki reçine kaynar suda hızla bozulmaktadır.

Denizcilik sahasında çok sık görülen diğer bir yüzey etkisi de kabarcıklanmadır (blistering). Uzun sürede yüzeyin hemen altında blisterler oluşabilir. Reçine, elyaf ve arayüzeydeki suda eriyebilen maddeler osmotik basınç etkisi ile reçine disk çatlağına benzer çatlaklar oluştururlar [40]. Korozyona dirençli bir bariyer tabakası kullanılması düşünüldüğünde, bariyerin geçirgenliğinin yapısal laminattan daha düşük olması bir kriter olarak verilebilir. Böylece bariyer ile laminat arasında sıvı toplanması engellenerek hasar önlenmektedir.

### 3.3. CTP'nin Gerilmeli Korozyonu

Bir CTP laminat korozif ortama maruz kaldığında, elyaf, reçine ve arayüzeyin etkilenmesi sonucu, özellik kaybı incelendikten sonra ikinci olarak, gerilme ve ortamın birlikte etkisi incelenmelidir. Gerilme ve ortamın birlikte etkisi gerilmeli korozyon olarak adlandırılmaktadır. CTP'nin gerilmeli korozyonunda gerilme ve ortam, ya ayrı ayrı yahutta müşterek olarak yeni hasar mekanizmaları oluşturarak olayı hızlandırabilmektedirler. Buna örnek olarak çekme gerilmesi altındaki cam elyafın korozyonu sonucu elyaf kopması ve bununla ilgili gerilmeli korozyon

mekanizmasıdır. Dolayısıyla CTP`de gerilmeli korozyonun anlaşılabilmesi için ilk adım gerilme-ortam etkileşiminin incelenmesidir.





### 3.3.1. CTP`de basit gerilme-ortam etkileşimi

Kompozit malzemelerin sürünme davranışları, öncelikle kompoziti meydana getiren bileşenlerin sürünmelerine bağlıdır. Takviye türü, hacim yüzdesi ve oryantasyonda sürünme davranışı üzerinde büyük rol oynar. Matrikse göre cam elyafın sürünmesi oldukça küçük değerlerde olduğundan sürünme olayı büyük ölçüde matriks reçine özellikleri ve arayüzeyle belirlenmektedir. Sürünmeye matriksin ve elyafın etkisi geniş olarak araştırılmıştır. CTP`lerde de termoset reçinenin uzay zincir yapıda olmasına rağmen matriks kayması sebebiyle önemli ölçüde sürünme meydana gelmektedir [69]. Matriksin görevlerinden birincisi, lifler arasında gerilme iletimi olduğundan sürekli cam elyaf kompozitlerde lif doğrultusunda sürünme çok az oluşmaktadır. CTP`lerde solvent absorpsiyonu ile reçine plastikleşmesi ve kimyasal atak sebebiyle matriks rijitliğindeki azalma sürünmeyi hızlandırmaktadır [85, 86, 98]. Oda sıcaklığında reçine deformasyonu fazla olmadığından sürünme olayında en önemli faktör arayüzey ayrılması ve elyaf boyunca oluşan çatlamlardır. Uçları açık veya kapalı filaman sarma CTP borular, iç basınç testine tabi tutulmuşlardır [108-110]. Kısa süreli deneylerde sarım açısının artışına bağlı olarak patlama basıncına yakın gerilme değerlerinde damlacıklar halinde sızıntının oluştuğu ve basıncın azaldığı gözlenmiştir. Jones ve Hull bu olayı, içten itibaren elyafa paralel oluşan enine çatlakların, katlar arasındaki elyaf kesişme noktasında bir sızıntı yolu oluşturmalarıyla açıklamışlardır. Sürünmenin, kısa süre sızıntı gerilmesinin altındaki gerilmelerde çok uzun sürelerde meydana geldiği, bu olaya esasen enine çatlamanın yol açtığı bilinmektedir .

Enine çatlak oluşumu ve ilerlemesinin, gerilmeli korozyonla hızlanması iki şekilde olmaktadır. Birincisi, matriksin şişmesi ile arayüzeyde oluşan gerilmelerin arayüzey ayrılmasına yol açması [90], diğeri de arayüzeye difüze olan çözücülerin arayüzey bağına tahrip etmesidir. Arayüzey bağının, dinamik bir bağ sistemi olduğu Plueddeman tarafından ileri sürülmüştür [64]. Bu modelde, silan kuplaj maddesi ve cam yüzeyi arasındaki bağlanmanın sürekli bir halde olduğu, ortama su

moleküllerinin girişiyle bağın yeniden şekillendiği açıklanmıştır. Arayüzey bağının değişimi ile sınırlı bir gerilme azalması oluşur. Bir dış yük uygulanması halinde sürünme, arayüzey bağının yeniden oluşumunu engelleyerek kimyasal bağın etkisini zayıflatmaktadır.

Dış yükün varlığı ile korozyon mekanizmasının hızlanması iki yolla olabilir. Bunlardan ilki, gerilme etkisiyle kompozit malzemeyi hasara uğratan kimyasal reaksiyonların hızlanmasıdır. Diğeri ise, hem gerilmenin difüzyon hızını artırması ile hem de gerilmenin oluşturduğu mikro çatlaklarla kompozite sıvı giriş yollarının oluşumu sonucunda korozyon etkisinin hızlanmasıdır.

Dewimille ve ark. [97], reçine içerisine elyaf katmanın sıvı emilmesini ve şişmeyi azalttığını rapor ettiler. Janas ve McCullough [50], gerilmenin difüzyon hızını artırdığını ortaya koymuşlardır. Elyaf yerine cam bilya kullanıldığında difüzyon hızının azalmasına karşılık emilen su miktarı artmaktadır.

Pritchard ve ark. [88], CTP laminatta %0.3 değerinin üzerinde şekil değiştirme meydana geldiğinde su emilmesinin hızla arttığını buldular. Bu etki, matriks çatlaması ve arayüzey ayrılması sebebiyle laminat hasarının başladığı kritik şekil değiştirme değeridir. Gerilme ve ortamın birlikte etkisiyle mukavemette azalma veya sürünme hızında artma görülür. Fakat bu olayların, CTP malzemenin sürünme kopmasını hızlandıracağı sonucunu çıkarmak doğru olmaz. Sürünme kopması, özellikle sürekli elyaf takviye edilmiş CTP'de esas olarak elyaf kopmasına bağlıdır. Eğer gerilme ve ortam, elyaf kopma süresini de kısaltıyorsa sürünme kopma ömrü azalacaktır.

### 3.3.2. Elyaf kopması ile ilgili gerilmeli korozyon

CTP basınçlı borularda sızıntının artışı [108-111] gibi tehlikeli olmayan hasarlar görülebileceği gibi, sürünme kopması gibi çok tehlikeli hasarlar da ortaya çıkabilir. Sürünme kopmasının araştırılmasında sadece ortam, sıcaklık ve gerilme

şartları değil takviye türü ve gerilmeye göre oryantasyon da önemlidir. Eş yönlü laminatın enine yüklenmesi halinde arayüzey hasarı ve enine çatlama kopmaya yol açar. Bunun dışındaki yükleme ve laminat oryantasyonlarında, elyaf arayüzey ayrılması reçine mikroçatlakları, enine çatlama ve kayma çatlama gibi değişik mekanizmalar ile hasarın artması sonucu, elyaf mukavemetini aşan bölgesel gerilme konsantrasyonları ile, sürünme kopmasına yol açan elyaf kopmaları meydana gelebilir. Sıcak su içerisinde, cam keçe/polyester levhanın sürünme hızı ve mukavemet kaybı havadakine göre oldukça fazladır. Sıcak suda, sıcaklık ve ortam etkisiyle reçinenin mukavemet kaybı ve arayüzey atağı fazla olmaktadır. Lyons ve Phillips [112], keçe laminatın 20°C ta su içinde ve havadaki sürünme davranışının çok benzer olduğunu rapor ettiler. Deney sonuçlarına göre 108 s lik (3.2 yıllık) bir ömür için maksimum çekme gerilmesinin yarısı kadar bir gerilme uygulanması gerekir. BS 4994 gibi standartlar, keçe CTP parçaların çekme mukavemetinin %50 sinden daha düşük gerilme değerlerinde yüklenmesi şartını getirdiğinden sulu ve nemli ortamlarda düşük sıcaklıklarda sürünme kopması çok yavaş meydana gelir ve fazla önemli değildir. Gerilmeli korozyon ile elyaf kopması halinde tehlikeli sürünme kopma mekanizmaları oluşabilir.

Su ve sulu ortamlarda gerilmeli korozyon oda sıcaklığında meydana gelebilir [101, 75]. Aveston ve ark. [91], saf suda, kısa sürede elyaf hasarı için büyük gerilme ve şekil değiştirme (> %0.5) gerektiğini göstermiştir. Bununla birlikte eş yönlü kompozitlerde ulaşılan %0.5 lik şekil değiştirme değeri, tabaka ayrılması ve matriks çatlama olmaksızın keçe malzemede elde edilemez. Dolayısıyla keçe laminatların sürünme kopma deneylerinde düşük gerilme değerleriyle çalışıldığından, bu düzeydeki gerilmelerin meydana getirdiği gerilmeli korozyon sürünme davranışı üzerinde fazla etkili değildir. Buradan, sulu ortamda elyaf kopmasını ilgilendiren gerilmeli korozyon mekanizması daha fazla gerilme taşıyan ve daha anizotrop takviyeli kompozitlerde önem taşıdığı sonucu çıkarılabilir.

Hasar mekanizmasının, elyaf oryantasyonuna ve dağılımına bağımlılığı yorulma deneylerinde de belirlenmiştir. Carswell ve ark. [113], cam keçe/polyester çekme kuponlarının havada ve suda yaklaşık aynı çevrim sayısında benzer tarzda kırıldığını ifade ettiler. Özellikle sürekli elyafla takviye edilmiş kompozitlerde korozif ortamda yorulma kırılması elyaf kopmasını gerektirdiğinden, en çabuk kırılma asit ortamda görülmektedir [114]. Gerilmesiz su ve asit ortamda korozyon etkisi yaklaşık aynı olmaktadır. Elyaf kırılmasıyla kontrol edilen gerilmeli korozyon, gerilmeye hızlanan diğer sürünme proseslerinden hem daha etkilidir hem de hasar mekanizması daha farklıdır.

CTP kompozitler, hava ortamda birkaç çatlak körleştirme mikromekanizmasının varlığı sebebiyle tok malzeme olarak bilinmektedirler [115]. Halbuki gerilmeli korozyon sonucu elyaf kopması durumunda, küçük, keskin mikroçatlaklar oluşur [68,114].

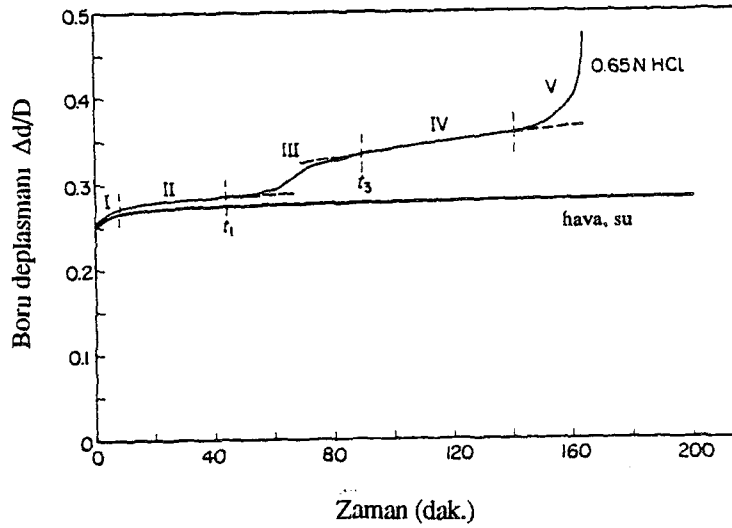
Bunun sonucunda ise ortam etkisi çatlak ucunda yoğunlaşır. Mikroçatlakların oldukça düşük gerilme seviyesinde oluşmaları, çatlak körleştirme mekanizmalarının ise daha büyük gerilme gerektirmeleri sebebiyle, çatlaklar gevrek tarzda ilerleyerek tehlikeli kırılmalara yol açarlar.

### 3.3.3. CTP'nin Asit Ortamda Gerilmeli Korozyonunun Genel Özellikleri

Cam takviyeli plastiklerin gerilmeli korozyon davranışlarını belirlemede en çok kullanılan deney metotları, basitlikleri sebebiyle korozif ortama daldırılmış numunelerin sabit yük altında kopma sürelerinin ölçülmesidir [68, 75, 76]. Böyle sürünme kopması deneyleri havada yapıldığında hasar kontrolsüz oluşmaktadır [115]. Aynı durum korozif ortamda da görülebilmektedir. Oluşan gerilmeli korozyon çatlağı hızla ilerleyerek kararsız hale gelip tehlikeli hasara yol açmaktadır. Korozif ortamda sürünme kopması deneyleri ile CTP'nin gerilmeli korozyon davranışının belirlenmesinde bazı belirsizlikler, hatalı yorumlara ve sonuçlara yol açmaktadır. Bu tür deneylerde "hasar" kavramı olarak test numunesinin kopması anlaşılmaktadır.

Gerçek yapılarda hasar kriteri ise yapının özelliklerine göre değişik özellikler arz etmektedir. Ortama daldırılmış çekme ve eğme kuponları çift taraftan ortama maruz kaldığından ve ayrıca kenar etkilerinden dolayı [117] problemlere ve hatalı sonuçlara yol açmaktadırlar. Ayrıca gerçek CTP yapılarda çatlak ilerleme davranışı farklı olmaktadır. Kararlı çatlak ilerlemesinden kararsız hale geçiş daha yavaş meydana gelmektedir [ 92 ]. Depo, basınçlı kap ve boruların test edilmesi için başka metotlar da geliştirilmiştir. ASTM D 3262 ve ASTM D 3681 standartlarında içerisine belli bir seviyede test sıvısı konmuş ve yanları kapatılmış kap veya boru parçasına sabit bir deformasyon verilerek hasar süresi ölçülmektedir Bu testleri esas alarak şekil değiştirme korozyon deneyleri de geliştirilmiştir [71]. Asidik ortamda CTP borunun çapsal basma yükü altında çatlak oluşumu ve ilerlemesiyle kontrollü bir hasar görülür. Borunun iç yüzeyinde mikroçatlak görülmesi veya cidardan sıvı sızıntısı olması kriter olarak alınır.

Bu deney, test parçasının gerçek malzemedan alınması, korozyon ortamının gerçekte olduğu gibi tek taraftan etki etmesi ve hasarın kontrollü olması gibi sebeplerden dolayı çok pratiktir. Sabit deformasyon yerine sabit yük altında da deneyler yapılabilmektedir. Deney özellikle açılı katlı ve kalın borularda hasar kriteri ve mikromekanizmasının çok açık olmaması gibi mahzurlar da taşımaktadır. Hogg, ASTM 3262'yi esas alan sabit yükte boru basma deneyinde borunun çapsal deformasyonunu yani halka kompliyansını ölçtüğünde beş ayrı davranış belirledi (Şekil 3.1) [114].



Şekil 3.1 Sabit basma yükü altında cam/polyester düz sarım borunun su, hava ve HCl ortamdaki davranışı

Bu deneyde boru kompliyansı olarak çap değişiminin boru çapına oranı alınmıştır ve bu değişim zamana göre belirlenmiştir. Deneyde, II. kademede oluşan çatlak, III. kademede hızla ilerleyerek kompliyansı artırır. Araştırmacıların bazıları hasar kriteri olarak  $t_1$ -çatlak ilerleme başlangıç süresini alırken diğerleri III. kademe sonunu ( $t_3$  süresi) almaktadırlar [80,118].  $t_3$  süresi sızıntının başladığı süreye karşılık gelmektedir. Boru basma deneyinde oluşan çekme gerilmesi nedeniyle gerilmeye dik yönde (boru eksenine paralel) başlayan çatlak epeyce düzgün şekilde ilerlemektedir. Çatlak maksimum çekme deformasyonunun meydana geldiği boru iç yüzeyinde tabanda ve tepede oluşmaktadır. Hogg ve ark. [71], artan asit konsantrasyonunun hasar ömrünü azalttığını gösterdiler. Gerilmeli korozyon başlangıç ve ilerleme davranışına reçine matriksin etkisi de cam elyaf kadar önem taşımaktadır. Yapılan deneylerde [72, 81], kimyasal dirençli izoftalik reçine teraftalik reçineye nazaran bir miktar iyileşme sağlarken, epoksiyle modifiye edilmişbisfenolik reçine daha iyi performans göstermiştir. En üstün özellik ise esnekleştirilmiş teraftalik reçine ile elde edilmiştir [72]. Hogg, 1990 da yaptığı çalışmada matriks reçinenin

etkisini birkaç reçine türüyle denemiştir.[81] Bu çalışmada, çatlak ucunda reçine deformasyonu meydana geldiğini farz ederek, çatlak ilerleme hızı ve gerilme arasında bir bağıntı bulmuştur. Çalışmasının en önemli sonucu ise reçinenin, gerilmeli korozyon çatlak ilerleme direncini, yalnızca çatlak ucunda elyafa iletilen gerilmelerle kontrol edildiğidir [81]. Dolayısıyla CTP`nin gerilmeli korozyon direnci için reçine kimyasal direncinin yüksek olması istenmekle beraber daha da önemlisi çatlak oluşumu ve ilerlemesini geciktirebilmesidir.

Açılı katlı boruların basma deneyinde sarım açısına bağlı olarak hem elyafa paralel hem de dik gerilmeler oluşmaktadır. Bu tür boruların gerilmeli korozyonunda oluşan çatlak mikroskopik düzeyde elyafa dik doğrultudadır ve elyaf kopmasıyla ilgilidir . Bu borularda elyafa paralel gerilmeler hesaplanarak hasar süresi grafiği çizildiğinde düz sarımlılara benzer bir bağıntı elde edilmektedir. Eğrilerin eğimlerinin aynı fakat pozisyonlarının kaymış olması, laminatın başlangıç yüklemesinden oluşan ve alt katlarda elyafa paralel gerilmeyi bölgesel olarak artıran ayrıca asit girişine yol açan arayüzey çatlaklarından kaynaklanmaktadır [111].

Hogg, aynı normalitedeki farklı mineral asitlerin boruyu aynı sürede hasara uğrattığını tespit etmiştir [71]. Sulu asetik asitin etkisi ise oldukça azdır. Buradan da gerilmeli korozyon mekanizmasında elyaf kopmasının önemi anlaşılmaktadır.

Sürünme ve gerilmeli korozyon arasındaki etkileşmenin anlaşılması için düz ve açılı sarılmış boruların incelenmesi yeterli olabilir. Keçe ve açılı katlı levha veya borularda reçine akması ve enine çatlama büyük ölçüde meydana gelebilir. Düz sarım boruda veya boyuna çekilen eş yönlü çekme kuponunda ise sürünme hemen hemen yoktur. Sürünme davranışındaki farklılıklar gerilme ve şekil değiştirme korozyonu arasında önemli farklılığa yol açabilmektedir. Helisel sarılmış boruların şekil değiştirme korozyonunda, zamanla gerilmenin azalması nedeniyle hasar süresi, gerilmeli korozyona nazaran daha uzun olmaktadır. Gerçekte, gerilmeli korozyonu



hızlandıran sürünme olayı, şekil değiştirme korozyonunda gerilme gevşemesi etkisiyle hasar süresini uzatmaktadır. Boru basma deneyinde, boru kalınlığı da farklı sonuçlar vermektedir. Boru kalınlığının artmasıyla tabakalar arası gerilme ve delaminasyon arttığından kalın boru inceye göre daha hızlı hasara uğramaktadır. Kalın cidarlı basınçlı kaplarda şekil değiştirme gradyanının, hasar süresini etkilemesi yüzünden, basit deney sonuçlarının kullanılması tehlikeli olabilecektir. İki eksenli gerilme halinde korozyon davranışının belirlenmesi için, açılı katlı boruların iç basınç testine benzer deneyler yapılabilir [109,110]. İç basınç uygulandığında iki eksenli gerilme sebebiyle oluşan enine çatlaklar, halka basma deneyinde ulaşılan hasar süresinden daha kısa sürede hasara yol açacaktır. Korozif ortam bulduran basınçlı kap ve boruların gerilmeli korozyon davranışının daha açık belirlenmesi ve daha gerçekçi dizayn değerleri elde edilebilmesi için bu konuda deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

#### 3.3.4. Asitik Gerilmeli Korozyonda Çatlak Başlama ve İlerleme Mekanizmaları

CTP'lerde reçine tipi ve elyaf oryantasyonunun gerilmeli korozyona etkisinin iyi anlaşılabilmesi için çatlak başlama ve ilerleme mekanizmaları dikkatle incelenmelidir.

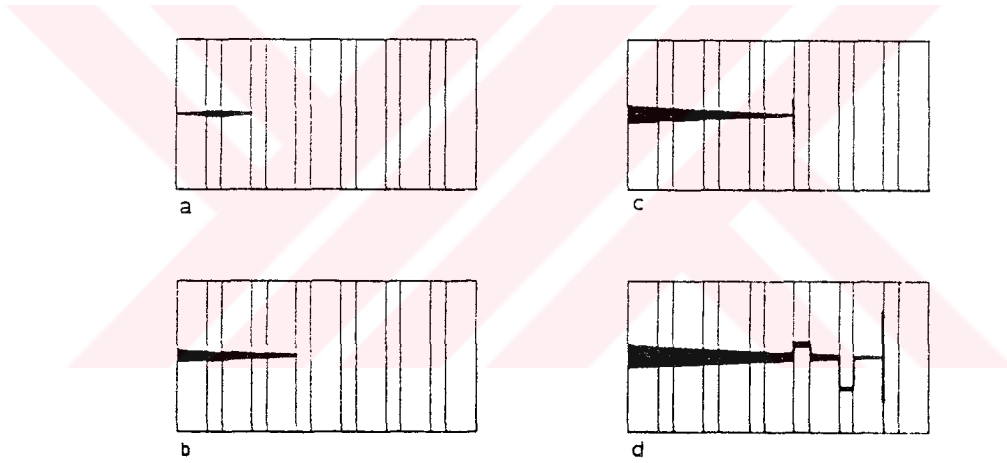
Havada, çatlak ilerlemesi (elyafa dik doğrultuda) arayüzey ayrılması, elyaf kopması ve sıyırılması sonucu oluşmaktadır [73, 84, 94]. Kırılma prosesi, poisson büzülmesi ve çatlak ucu kayma gerilmelerinin sebep olduğu boyuna çatlama ve delaminasyon ile daha karmaşık bir hale gelmektedir [73]. Elyaf sıyırılması sebebiyle kırık yüzeyi fırçaya benzemektedir. Asit ortamda ise kırılma daha düşük gerilme düzeyinde olmaktadır. Kırık yüzeyi ise çok daha düzgündür [74, 80].

Eş yönlü bir levha elyaf doğrultusunda gerilmeye maruz kaldığında, çatlak, levha yüzeyi civarında ve elyaf doğrultusuna dik açıda oluşmaktadır [74]. Oluşan bu çatlaklar genellikle düz şekildedir, yüzeye bağlı olarak basamaklar da görülmektedir. Çatlak ilerlemesi, çatlak ucunda delaminasyona yol açabilir. Bu proses boru basma



deneyinde olduğu gibi, laminatta belli bir derinlikte, eğilme gerilmesi oluşumu halinde meydana gelebilir. Yüzeydeki şekil değiştirmenin şiddetine bağlı olarak delaminasyon çekirdeklenebilir [74]. Boru basma testinde kırık yüzeyi, uygulanan gerilmenin şiddetine göre değişiklik arzeder. Gerilme değeri büyüdükçe, yüzey daha kaba ve basamaklı bir hal alır. Gerilmeli korozyon kırık yüzeyi, havada kırılan yüzeylere nazaran daha pürüzsüzdür [77]. Çatlak başlama bölgelerinde elyaf kırılma yüzeyleri büyük aynamsı bölgeler göstermektedir [74]. Çatlak ilerlediğinde aynamsı bölge boyutları azalarak nehir çizgi izleri daha etkili olmaktadır. Aynamsı bölge boyutları elyaf kırılma gerilmesinin bir göstergesi olmaktadır [129].

Hogg ve Hull [74], eş yönlü bir levhada oluşan, gerilmeli korozyon kırılması ile ilgili bir mekanizma ileri sürdüler:



Şekil 3.2. EY CTP levhada GK çatlak ilerleme mekanizması

Havadaki kopma ve arüüzey ayrılmasının başladığı gerilme seviyesinin çok altındaki değerlerde, yüzeye yakın bir bölgede asit difüzyonu ile bir lifin kopması sonucunda çatlak oluşur. Matrikste diğer elyafa kadar ilerleyen çatlak, asitin bu elyafa da etkimesine yol açar. Asit etkisi çatlakla sınırlandırılmış olduğundan, asitle zayıflatılmış elyaf kırılması görülür. Zayıflama iyon değişim mekanizması sonucudur. Çatlak daha fazla ilerlediğinde, GŞF büyüyerek sınırlı arayüzey ayrılması oluşur ve bu ilerleyen çatlak boyu ile orantılı olarak artar. Bu durumda asitin zayıflattığı elyaf boyu da artarak çatlak boyunun artmasıyla arayüzey ayrılması

daha da artar. Kırılma düzlemi artan bir şekilde, elyaf boyunca tesadüfi hata dağılımına bağımlı olduğundan, çatlak başlangıcından itibaren düzlem dışı elyaf kırılması tedrici bir şekilde artar.

Boru basma deneyinden ölçülen gerilmeli korozyon çatlak ilerleme miktarı, elyafa paralel gerilme bileşeninin yüksek mertebeden kuvveti ile bağıntılıdır. Çatlak ilerleme hızı ile elyafa paralel gerilme bileşeni arasındaki bağıntının bulunması için CT numune ve sabit yükte deneyler yapılmıştır [89]. Çatlak ilerleme hızı  $da/dt$ , GŞF  $K_I$ 'e kuvvetle bağımlıdır.

Düz sarımlularla eşdeğer paralel gerilme değerindeki açılı katlı borularda enine çatlaklar kopma süresini kısaltmaktadır. Çatlak ilerleme hızı  $da/dt$  nin gerilme şiddet faktörü  $K_I$ 'e bağımlılığı, herhangi bir çatlak oluştuğunda, çatlak ucundaki ilerleme etkisinin ilave çatlak başlatan etkilerden daha büyük olduğu anlamına gelmektedir. CTP malzemedeki arayüzey ayrılması ile çatlak körleştirilmesi mekanizması gerilmeli korozyon esnasında meydana gelemediğinden, dengesizlik çatlak ilerlemesini artırmaktadır. Sonuçta birkaç büyük çatlak, çok sayıdaki küçük çatlakla göre daha hızlı ilerlemektedir. Bu durum Carswell ve Roberts [68] tarafından keçe malzemenin yorulmasında tespit edilmiştir. Asit ortamda oluşan mikro çatlaklara nazaran havada çok sayıda mikroçatlak görülmektedir. Asit ortamda ise bu çatlaklar çok az oluşmaktadır.

Gerilmeli korozyon çatlak nükleasyonu bir levhada iki yolla oluşabilir. CTP'lerde, bir reçine mikroçatlağından; asit girişiyle çatlak ucunda ilk elyaf kopması görülür. Burada bir gerilmeli korozyon çatlakları çekirdeklenerek ilerlemeye başlar.

Benzeri safhalar, enine çatlaklarda gerilmeli korozyon çatlakları çekirdeklendiğinde açılı katlı laminatlarda da meydana gelebilir.

Bununla birlikte Hogg ve Hull [74, 80], asitle zayıflatılan elyafın kırılmasıyla başlayan gerilmeli korozyon çatlak çekirdeklenmesinin, reçine mikroçatlaması

olmaksızın laminat yüzeyinin altında da oluşabileceğini gösterdiler. Filaman sarma bir borunun tarama elektron mikrofotografında yüzeye yakın bölgede bir çatlak çekirdeklenme alanı görülmektedir. Kırık yüzey izlerinden, başlangıçtaki elyaf kopmasının yüzey altında birkaç elyaf çapında olduğu ve elyaf kopması sonucunda reçine çatlağının başladığı anlaşılmaktadır. Böyle durumlarda, herhangi bir yüzey çatlağı bulunmadığında, elyaf kırılma başlangıcının reçineden asit difüzyonu ile kontrol edildiği sonucu çıkarılmaktadır.

Gerilmeli korozyon hasarına reçine matriksin etkisi, çatlak başlama ve ilerlemesi açılarından incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır:

Hiçbir yüzeysel hata bulunmadığı durumda, reçine asit difüzyonunu engelleyerek çatlak başlangıcını geciktirmektedir. Düşük difüzyon hızı, reçinenin kimyasal parametrelerinin değişimi ile sağlanabilir. İlerleyen elyaf kopması için matriksin de çatlama gerektiğinden, elyaf eksenine dik doğrultuda çatlak başlangıcı ve ilerlemesinde matriksin tokluğu önemli rol oynamaktadır. Bir lifin kopmasıyla başlayan bir çatlak diğer elyafa geçemezse, kırılma prosesi difüzyonla sınırlı olacaktır. Esnekleştirilmiş reçineden üretilmiş bir borunun TEM mikrofotografında çatlaktan çok sayıda elyaf kopması gözlenmektedir [78]. Liflerin çevresindeki matrikste plastik deformasyon izlerinden bu durum anlaşılmaktadır. Esnekleştirilmiş reçine, kimyasal dayanımının daha az, difüzyon katsayısının daha yüksek olmasına rağmen borunun gerilmeli korozyon mukavemetini, gevrek ve kimyasal dirençli reçineye göre daha fazla artırmaktadır.

Elyafa paralel ve dik gerilme bileşenlerinin, gerilmeli korozyon çatlak ilerlemesini kontrol ettiğini ifade eden iki görüş vardır. Bailey [75] çapraz katlı levhada çekme gerilmesi ile, klasik enine çatlaklardan farklı bir tarzda ilerleyen enine çatlakların görüldüğünü rapor etti. Bu enine çatlaklar elyafa asit atağı sebebiyle elyaf büzülmesi sonucunda arayüzey ayrılması ile oluşmaktadır. Çatlak ilerlemesi uzun süre aldığında kılcal olayla asit difüzyonu sonucu, kırılan elyaf tamamen

ayrılmaktadır. Asit, çatlaksız katlara difüze olduğunda, elyafın tüm boyunda oluşan büzülme sonucunda, arayüzeyde büyüyen gerilmeler enine çatlama yol açmaktadır. Böyle yavaş ilerleyen enine çatlaklar asit ortamda çekmeye maruz eş yönlü düz sarım borularda da görülmektedir. Servis şartlarında uzun sürelerde oluşabilen enine çatlaklar, elyafın boyuna gerilmesini artırıp, gerilmeli korozyon çatlamasını hızlandırarak parçayı tahrip edebilirler.



## 4. KIRILMA MEKANIĞI

### 4.1. Giriş

İkinci Dünya Savaşı sırasında yük gemilerinin bazılarında kaynak bölgelerinde oluşan gevrek kırılmalar Kırılma Mekaniği konusunun başlangıcını teşkil etmiştir. Kırılma mekaniği iki ana bölüme ayrılır. LEKM Lineer elastik kırılma mekaniğinin gevrek malzemelere uygulanmasıyla oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Sünek malzemeler için ise elastik kırılma mekaniği geliştirilmiştir.

Kırılma mekaniğinin ana ögesi yapı elemanlarında bulunan çatlak ucundaki gerilme bölgesidir. Bu bölge gerilme şiddet faktörü adı verilen ve  $K$  ile gösterilen bir parametre ile ifade edilir.  $K$  hem çatlak geometrisi ile hem de nominal gerilme ile alakalıdır.

CTP'ler gevrek kırılmaya eğilimli malzemeler olduğundan bu çalışmada LEKM prensipleri kullanılmıştır.

#### 4.1.1. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği

Lineer elastik kırılma mekaniği, gerilme bölgesinin büyüklüğünü, gerilmenin çatlak ucundaki dağılımını, çatlağın şeklini, boyutlarını, oryantasyonunu ve malzeme özelliklerini temel teşkil eden analitik işlemlere dayanır.

Yapı elemanlarında gevrek kırılmaya sebep olan sıcaklık, tokluk, dizayn, kalıcı gerilme, yorulma gibi birçok faktörler mevcuttur. Bunun yanısıra genel olarak bu faktörleri üç grupta toplamak mümkündür.

##### 1. Tokluk

Bir malzemenin tokluğu malzemedeki çatlak mevcutken yük taşıyabilme kapasitesi veya plastik olarak deforme olabilmesi diye tanımlanabilir. Malzeme tokluğu, düzlem gerilme şartlarında ( $K_c$ ), düzlem deformasyon şartlarında ( $K_{Ic}$ ) kritik gerilme şiddet faktörü ile ifade edilir. bu tanımlar lineer elastik davranışta ve

yavaş yüklemeye geçerlidir. Elastik-plastik davranışlar için tokluk, R-eğrisi J-integral ve çatlak açılma miktarı (COD) cinsinden ifade edilir.

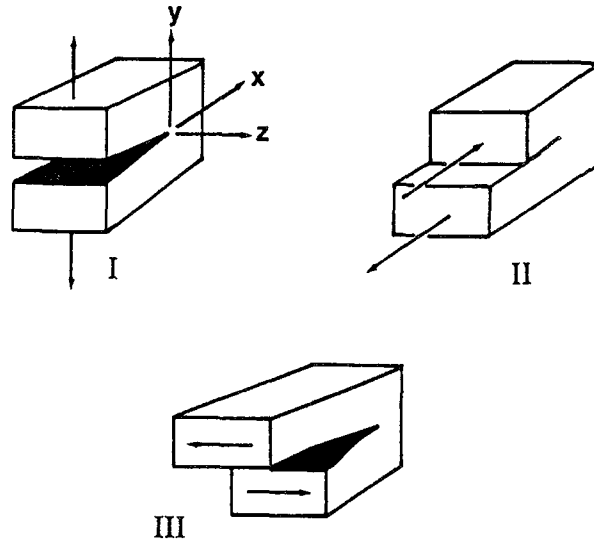
## 2. Çatlak boyu

Gevrek kırılmalar muhtelif cinsteki süreksizliklerden başlar. Bu süreksizlikler çok küçük çatlak veya hatalardan çok büyük yorulma çatlaklarına kadar değişebilir. Malzemede imalattan gelen veya yorulma sonucu başlayan çok küçük çatlaklar servis sırasında, yorulmayla veya korozyonla kritik boyuta erişebilirler.

## 3. Gerilme

Gevrek kırılmanın olabilmesi için çekme gerilmesi şarttır. Bu gerilme klasik gerilme analizleri ile tespit edilebilir. Yukarıda saydığımız üç faktör gevrek kırılmaya maruz yapıların kontrolünde ana kriterlerdir. Sıcaklık, yükleme hızı, gerilme konsantrasyonu, kalıcı gerilmeler v.s. daha az etkili olan faktörlerdir.

Elastik cisimlerdeki çatlakların gerilme analiz metodunu kurmak için çatlak yüzeylerinin bağıl hareketinin bilinmesi gerekir. Çatlak ilerleme davranışı üç tip halinde analiz edilebilir. Bir elemanda çatlak ilerleme davranışı bu üç tipden herhangi birine benzeyebildiği gibi, her üçünü de içerebilir. Şekil 4.1'de üç tip davranış görülmektedir.



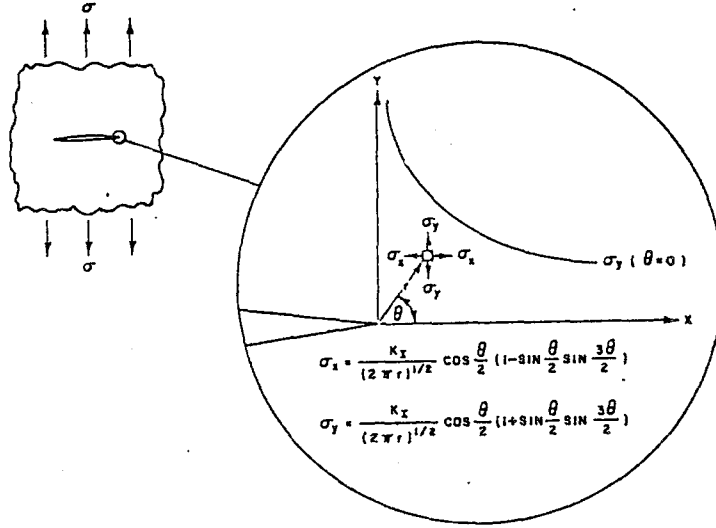
Şekil 4.1. Çatlak ilerleme modları I. Açılma modu II. Kayma modu III. Yırtılma modu

Tip I, en çok görülen ve diğerlerine göre daha kritik olan açılma modudur. İki kırılma yüzeyi birbirine zıt yönde ve dik olarak ayrılır. II. tip kayma modu olarak adlandırılır. Çatlak yüzeyleri x-z düzlemi üzerinde zıt yönde hareket ederler. III tip yırtılma modunda ise çatlak x-y ve x-z düzlemlerine göre ters simetrik olarak ilerler. İki kırılma yüzeyi birbirlerine göre çatlak önündeki bir doğru ile paralel yönde kayarlar.

İzotropik malzemeler için, çatlak ucu civarında oluşan gerilme deformasyonları Westegaard [123] ve Irwin [124] tarafından bulunmuştur. Çatlak ucundaki GŞF'leri, her üç mod için aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$K_I = \sigma_I \sqrt{\pi a}, \quad K_{II} = \tau_{II} \sqrt{\pi a}, \quad K_{III} = \tau_{III} \sqrt{\pi a} \quad (4.1)$$

Kompozit malzemelerde kırılma olayı izotropik malzemelere göre çok da karmaşıktır. Çatlak ucu gerilme dağılımları Sih ve ark. [125] tarafından çıkarılmıştır. Şekil 4.2.'de ise bir çatlak ucundaki elastik gerilme dağılımı dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Kompozit malzemelerde çatlak ucu gerilme bölgesi dağılımı

Gerilme şiddet faktörleri yaygın ve temel numune geometrileri için muhtelif denklemlerden elde edilmektedir. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

a) Kalınlık boyunca çatlaklar

Şekil 4.3. de görüldüğü gibi üzerinde  $2a$  uzunluğunda bir çatlak bulunan sonsuz genişlikli bir levha,  $\sigma$  gibi düzgün bir gerilmeye maruz kalmış ise GŞF ifadesi

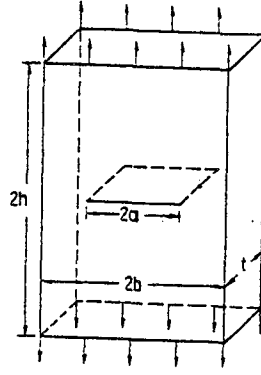
$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4.2.)$$

bağıntısıyla verilir. Genişliği  $b$  olan bir levhada ise şekil faktörü (tanjant düzeltme faktörü) kullanıldığında ifade

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left[ \frac{2b}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2b} \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

halini alır.





Şekil 4.3. Bir levhada kalınlık boyunca çatlak

## 2. Çift-Kenar Çatlağı

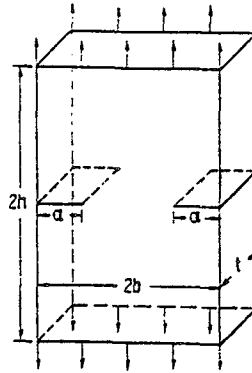
Düzgün çekmeye maruz çift kenar çatlaklı bir numunede gerilme şiddet faktörü aşağıdaki gibidir.

$$K_I = 1.12 \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4.4.)$$

Burada 1.12 katsayısı kenar çatlakları için serbest yüzey düzeltme katsayısıdır (Şekil 4.4)

Boydan boya çatlakta verilen tanjant-düzeltilme faktörü çift kenar çatlağına da uygulanırsa gerilme şiddet faktörü daha hassas olarak elde edilir.

## 3. Tek kenar çatlağı



Şekil 4.4. Çift kenar çatlağı

Tek kenar çatlağı için Gerilme Şiddet Faktörü, çift kenar çatlağı ifadesinden çıkarılmıştır. Burada ayrıca, çatlağın tek taraflı olması nedeniyle eğilme gerilmelerinin etkisi de gözönünde bulunudurulur.

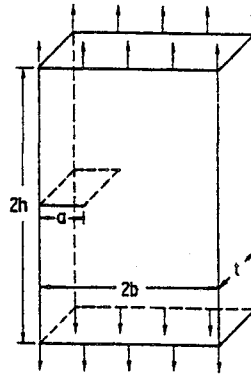
Tek kenar çatlaklı levhalar için düzeltme faktörü de eklenerek GŞF aşağıdaki şekli alır.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} f(a/b) \quad (4.5.)$$

$f(a/b)$  faktörü;  $a/b$  değerine bağlı olarak 1.15 - 2.86 arasına değişen bir değerdir ve tablodan alınabilir [123]

#### 4. 2. Yüzey Çatlağı Analizi

1945 yıllarında Kırılma Mekaniğinin geliştiği dönemlerde çatlak ucu gerilme bölgesi ile ilgili yapılan çalışmalar genellikle üç boyutlu çatlak problemlerini içerdiği dikkati çekmektedir. Özellikle bunlardan Sneddon [124] düz dairesel çatlakları, yine Green ve Sneddon [125] düzlemsel eliptik çatlakları incelemiştir. Bu tür çatlakları ihtiva eden test levhalarının, pratik olmaması ve analitik zorluklardan dolayı, levhayı boydan boya delen çatlaklar üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Halbuki servis anında meydana gelen en yaygın çatlak tiplerinden biri yüzey çatlağıdır. Dolayısıyla yüzey çatlağı içeren makina ve yapı elemanlarında çatlak kinetiğinin yani; çatlak ilerleme hızı, gerilme şiddet faktörü ve kırılma mukavemeti gibi temel parametrelerin doğru olarak tesbit edilmesi gereklidir.



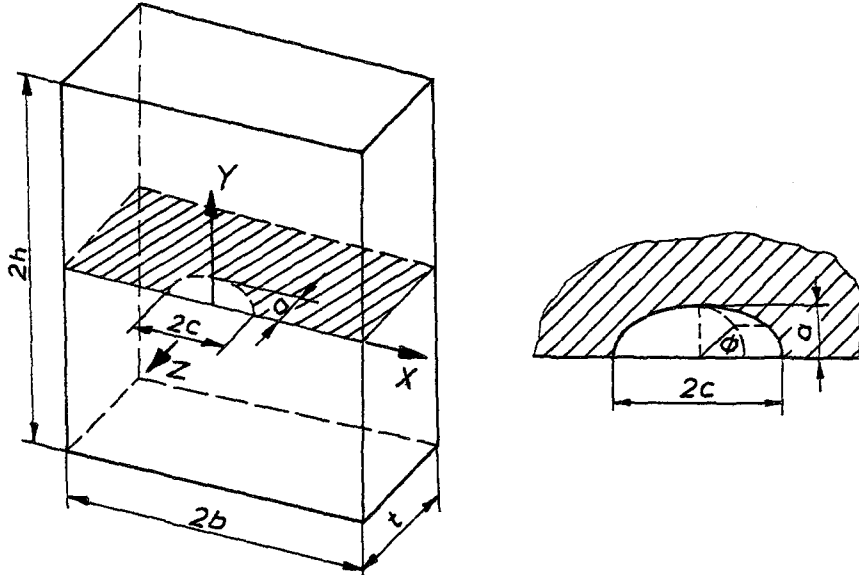
Şekil 4.5. Tek kenar çatlağı

Bir levhada yüzey çatlağından dolayı oluşan gerilme şiddet faktörleri levhanın kalınlığına, levhanın genişliğine, çatlağıın derinliğine ve çatlağıın uzunluğuna bağılı olduğu gibi, çatlak kenarlarını süpüren merkez açısına da bağılıdır. Çatlak ilerlemesi hem çatlak boyunca hem de çatlak derinliğince meydana gelmektedir. Çekme yükü altında izotropik malzemelerde yarı eliptik bir çatlağıın ilerlemesi de yarı eliptik olarak kabul edilmektedir.

Yaklaşık analitik metodlar kullanarak Irwin [24.25] Paris ve Sih [2] yüzey çatlakları için GŞF bağıntıları elde etmişlerdir. Her iki ifade arasında çok küçük bir farklılık bulunmakta, Şekil 4.6'daki gibi bir levha üzerine çatlak uzunluğu  $2c$ , çatlak derinliği  $a$  olan yarı eliptik bir çatlak açılmış olsun.  $y$  yönünde uygulanan çekme yükünün tesirinde çatlak çevresinde ModI gerilme şiddet faktörü meydana gelir.

Irwin, çekme gerilmesi etkisindeki yüzey çatlağıında oluşan GŞF denklemini aşağıdaki gibi vermiştir.

$$K_I = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{E_k} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{a^2}{c^2} \right) \cos^2 \theta \right]^{1/4} \quad (4.6)$$



Şekil 4.6. Yüzey çatlağı geometrisi

$$E_k = \int_0^{\pi/2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{a^2}{c^2} \right) \sin^2 \theta \right]^{1/2} d\theta \quad (4.7)$$

olup ikinci tür komple eliptik integraldir.  $\sigma$  nominal gerilme,  $a$  ve  $c$ , çatlak boyutlarıdır ve Şekil 1'de gösterilmiştir.

$\theta$  açısı ise karakteristik açıdır.

Paris ve Sih [2] in geliştirdiği gerilme şiddet faktörü denklemi ise

$$K_I = \sigma \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{a^2}{c^2} \right) \cos^2 \theta \right]^{1/4} \quad (4.8)$$

burada

$$Q = E_k^2 - 0.212 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{ak}} \right)^2 \quad (4.9)$$

$\sigma_{ak}$  malzemenin akma mukavemetidir. Denklem (4.8) ve (4.9) dan Irwin'in denkleminde farkının, denklem (4.9) daki ikinci terim olduğu görülmektedir.

Yüzey çatlaklarının gerilme şiddet faktörlerini veren bu denklemler baz alınarak muhtelif çalışmalarla magnifikasyon katsayı (büyütme katsayısı) ilave edilmiştir[125.126] Bunlardan Kobayashi ve Moss [125] aşağıdaki düzeltme faktörünü elde etmişlerdir.

$$M_e = \left[ 1 + (0.12) \left( 1 - \frac{a}{2c} \right)^2 \right] \sqrt{\sec \frac{\pi a}{2t}} \quad (4.10)$$

Burada  $t$  levha kalınlığıdır.

yukarıda verilen denklem (4.8) denklem (4.9) ve denklem (4.10)u Nishioka ve arkadaşları [126] birleştirerek muhtelif çeliklerin yorulma çatlak ilerleme davranışlarında kullanmışlardır. Bu denklem şöylece yazılabilir.

$$K_I = M_e \sigma \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{a^2}{c^2} \right) \cos^2 \theta \right]^{1/2} \quad (4.11)$$

Bugüne kadar, yüzey çatlakları ile ilgili muhtelif çalışmaların yapılmasına rağmen gerçek sonuçları veren bir gerilme şiddet faktörü denklemi elde edilememiştir. Şu ana kadar elde bulunan en etkili sonuçlar Newman ve Raju [130] tarafından tesbit edilmiştir.

Bu iki araştırmacı, üzerinde yarı eliptik yüzey çatlakları bulunan, çekme ve basma yükünün tesirindeki izotropik levhalarda gerilme şiddet faktörlerini üç boyutlu sonlu eleman analizi ile nodal kuvvet metodundan hesaplamışlardır.

Üzerinde yarı eliptik yüzey çatlakları bulunan sonlu genişlikteki çekme levhasında GŞF ifadesini aşağıdaki şekilde vermiştir.

$$K_I = \sigma \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F(a/t, a/c, c/b, \phi) \quad (4.12)$$

Burada  $\sigma$  uygulanan nominal çekme gerilmesi  $a$  çatlak derinliği,  $Q$  ise ikinci tip komple eliptik bir fonksiyon olup çatlak şekil faktörüdür.

Newman ve Raju, formülün  $0 < a/c \leq 1.0$ ,  $0 < a/t < 1.0$ ,  $c/b < 0.5$  ve  $0 \leq \phi \leq \pi$  aralığında kullanılabileceği sınırını getirmişlerdir.  $a/c > 0.2$  değerlerinde metodlarının daha uygun olduğunu, sınır değer olan  $a/c$  sıfır civarında Gross ve Srawley'in tek kenar çatlakları (SEN) ifadesinin kullanılmasının uygun olacağını rapor etmişlerdir.)

$Q$  çatlak şekil faktörünü Rawe tarafından  $a/c < 1$  değerleri için verilen bağıntıdan almışlardır.

$$Q = 1 + 1.464 (a/c)^{1.65} \quad a/c \leq 1 \quad (4.13)$$

$F$ , düzeltme faktörü olup  $a/t$ ,  $a/c$ ,  $c/b$  ve  $\phi$  nin fonksiyonudur.

$$F = M f_1 f_2 f_3 \quad (4.14)$$

Burada

$$M = M_1 + M_2 (a/t)^2 + M_3 (a/t)^4 \quad (4.15)$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09 \frac{a}{c} \quad (4.16)$$

$$M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \frac{a}{c}} \quad (4.17)$$

$$M_3 = 0.5 - \frac{1}{(0.65 + \frac{a}{c})} + 14 (1 - \frac{a}{c})^{24} \quad (4.18)$$

$$f_1 = 1 + [ 0.1 + 0.35 (a/t)^2 ] (1 - \sin\phi)^2 \quad (4.19)$$

$f_2$  fonksiyonu gömülmüş eliptik çatlak çözümünden alınan açısız bir fonksiyondur.

$$f_2 = [ (a/c)^2 \cos^2\phi + \sin^2\phi ]^{1/4} \quad (4.20)$$

$f_3$  ise sonlu genişlikteki levhalar için düzeltme faktörüdür [123].

$$f_3 = \left\{ \sec \left[ \frac{\pi c}{2b} \sqrt{\frac{a}{t}} \right] \right\}^{1/2} \quad (4.21)$$

Yüzey çatlağı ile ilgili çalışmaların çoğu izotrop malzeme kabulü ile yapılmıştır. kompozit malzemelerde hava ortamında çatlaklar, genellikle elyaf-matriks arayüzey ve reçine dayanımlarının düşük olması nedenleriyle elyaf boyunca oluşmakta ve ilerlemektedir. Yüzey çatlağı problemlerinin yukarıda açıklandığı gibi karmaşıklığının yanısıra, kompozit yapılarda gerilme dağılımının ve kırılma tokluğunun oryantasyona büyük ölçüde bağımlı olması, problemi çok daha güç hale getirmektedir. Bununla birlikte bu çalışmada gerilmeli korozyon oluşumunun, havadaki hasara göre çok daha düşük gerilme değerlerinde görülmesi ve malzeme türü olarak EY kompozitlerin seçimi ile izotropik çözüm kullanılmıştır.

## 5. DENEYLER

### 5.1. Deney Setinin ve Numunelerin Hazırlanması

#### 5.1.1. Eşyönlü Levha Üretimi

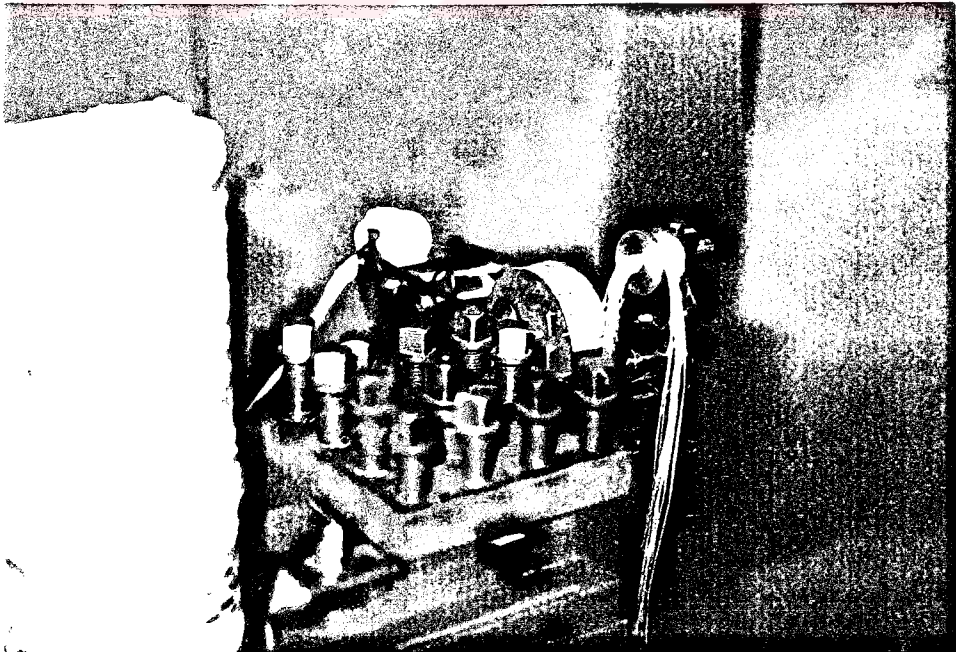
TS3783 esas alınarak yüzey çatlaklı çekme deney numunelerinin hazırlanmasında ilk adım kompozit levhaların üretimidir. Eşyönlü CTP levhalar Cam elyaf San. A.Ş.'nin ürettiği S3 EF240 kodlu sarım fitili ve neoxil 266 reçine ile üretilmiştir. Cam elyaf, ortalama 15 mikron çapında elyaflardan oluşan 3 uçlu, kromsilon bağlayıcılıdır. E camından üretilen düz cam fitilin tex sayısı 2400 (gr/1000m) dir. Neoxil 266 reçine ise yüksek molekül ağırlıklı, korozyon direnci iyi olan tok izoftalik bir reçinedir. Reçine ve elyaf seçimi ile imalat özelliklerinin belirlenmesinde, daha önce yapılan çatlak ilerleme hızı çalışmalarında kullanılan numune özelliklerine uygun levhalar üretilmeye çalışılmıştır. Kompozit malzeme üretiminin ülkemizde henüz çok yeni olması seri ve standard üretimin yapılamaması ayrıca malzeme özelliklerinin üretim parametrelerine büyük ölçüde bağımlı olması nedenleriyle, deney sonuçlarının karşılaştırılabilmesi gayesiyle literatürde anılan türde malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir.

CTP levhalar, (0,5x0,2m) boyutlarında, polietilen film kaplı ahşap kalıpların torna tezgahında ayna-punta arasında döndürülmesi ile üretilmiştir. Vida açma operasyonuna benzer şekilde yapılan sarımda, istenilen cam/reçine oranı, levha kalınlığı ve sarım açısı elde edilecek şekilde, devir başına ilerleme ve sarım kat sayısı değişmektedir. Devir başına ilerleme ve sarım sayısı yeterli kalınlıkta levha elde edilecek şekilde deneme yanılma yoluyla belirlenmiştir. Tex sayısı ve öngörülen cam/reçine oranında hesaplanan teorik levha kalınlığı, üretim

koşullarından oldukça fazla etkilenmektedir. Deneylerde dört ve iki katlı olmak üzere iki tür levha üretilmiştir.

Levha üretiminde kuru sarım ve reçine emdirme metodunda; sarım esnasında aşırı elyaf hasarı oluşumu yüzünden daha karmaşık olmasına rağmen ıslak sarım metodu tercih edilmiştir. Sarım işlemi için Şekil 5.1'de görülen reçine emdirme aparatı imal edilerek torna tezgahının kalemlığıne monte edilmiştir. İmalat esnasında reçine besleme elle yapılmıştır.

Önceden hızlandırıcısı ve sertleştiricisi karıştırılan reçine uygun sürelerde aparatın haznesine ilave edilmiştir. Sarım işleminde en önemli parametre elyaf gerilimidir. Aşırı germe elyafın kuru kalmasına ve yeterli ıslanmamasına yol açtığından levha içerisinde kuru elyaf bölgeleri ve aşırı hava kabarcığı bulunmaktadır. Gevşek sarım ise aşırı reçine emilmesine ve cam/reçine oranının düşmesine neden olmaktadır. Sarımdan sonra presleme esnasında gevşek lifler kısmen dönebildiğinden elyaf paralelsizliği de oluşabilmektedir. Sarım gerilimindeki homojensizlik üretim sonrası düzensiz elyaf kalıntı gerilmelerine yol açabilmektedir. Düzensiz ve aşırı elyaf gerilmesi ise GK deneylerinde dağınık sonuçlar vereceğinden



Şekil 5.1. Reçine emdirme aparatı.



bu parametrenin seçilmesi ve imalat esnasında korunması büyük önem taşımaktadır. Aşırı reçinenin sıyırılması ve elyaf geriliminin düzenli olması amacıyla elyaf iki yün keçe parçası arasından geçirildi. Keçelerin zamanla reçine ile doyması sonucu sıyırma ve germe işleminde yetersiz kalmasıyla germe işlemi sarım aparatına monte edilen germe tamburlarıyla gerçekleştirildi.

Reçinenin sertleşme süresi 14 dakika olarak verildiğinden (100 gr reçineye 25°C de %2 oranında MEK sertleştirici ve %0,25 oranında %6'lık kobalt naftanat hızlandırıcı katılmasıyla jelleşinceye kadar geçen süre), hem jelleşme süresini uzatmak hem de literatürde verilen değerlere uymak amacıyla %1 Katalyst M Scott-Bader MEK ve %0,25 Acceleratör E katalizör sistemi kullanılmıştır.

4 kat olarak sarılan ilk grup levhalarda kalıp ayırıcı olarak kullanılan polietilen film, sertleşme esnasında açığa çıkan ısı etkisiyle buruşarak levha yüzeyinin hatalı çıkmasına yol açtığından bu yöntem terkedilmiştir. Ahşap kalıpların paslanmaz çelik levha ile kaplanıp, PVA kalıp ayırıcı uygulanması sonucu temiz ve düzgün yüzeyler elde edildi. PVA'nın şeffaflığının yanında suda çözünür olması kalıbın açılmasını kolaylaştırmakta ve bu esnada oluşabilecek yüzey çatlaklarının önüne geçilmektedir. Daha sonraki üretimlerde alüminyum ve galvanizli sac kalıplarla da temiz ve düzgün yüzeyler elde edilmiştir.

#### 5.1.2. Yüzey Çatlaklı GK Deney Numunelerinin Hazırlanması

Üretilen levhalar jeolojik numune hazırlanmasında kullanılan elmas diskle basınçlı su altında kesilerek paralel kenarlı çekme kuponları elde edildi.

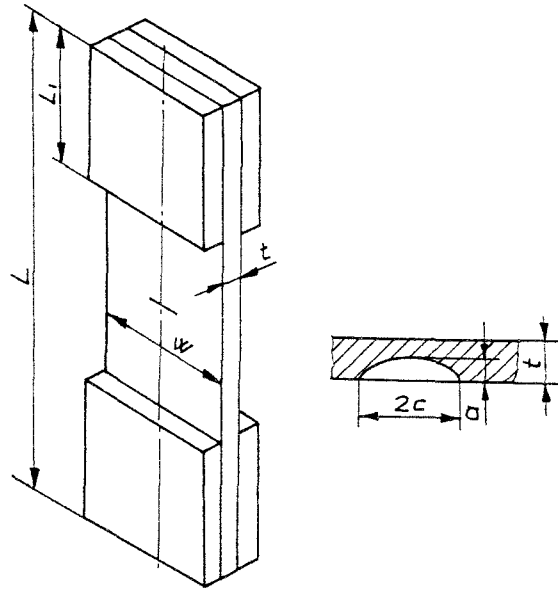
Yarı eliptik yüzey çatlakları için daha önceden belirlenen a/c ve a/t oranlarını verecek şekilde hesaplanan dışı separeleri, istenilen taş çapını elde etmek amacıyla bilerek çapı düşürüldü. Kalınlığı 1 mm den daha az olan bu kesme taşları, özel bir aparat yardımıyla torna tezgahının aynasına bağlandı. Çekme kuponları ise suport üzerine bağlanmış bir mengeneyle tesbit edilerek istenilen derinliklerde çatlaklar açıldı. İnce levhalarda hesaplanan taş çapları çok küçük olduğundan çatlaklar elde mikromotor yardımıyla açıldı. Açılan çatlaklar, orjinal

çatlak boyutlarının daha kolay ayırdedilebilmesi amacıyla boyandı. CTP kompozitlerde ön yorulma çatlağının düzgün olarak açılması mümkün olmadığından çatlaklar bistüri ile keskinleştirildi. [77]

Şekil 5.2.'de üç tür levha elde edilen yüzey çatlaklı çekme kupon boyutları verilmektedir. Boyutların seçiminde ASTM E740 yüzey çatlağı standardı dikkate alınmıştır .

Kuponların uç kısımlarına soğukta sertleşen epoksi reçine ile asitte temizlenmiş alüminyum levhalar yapıştırılarak preslendi. Keçe kompozitle uç levha kullanılmasına gerek olmadığı halde, EY malzemede yapıştırma kalitesindeki herhangi bir eksiklik ya sıyrılmaya yahutta boyuna çatlaklara yol açmaktadır.

EY levhalardan çekme kuponu kesilmesi sırasında; kupon ekseni ile elyaf doğrultusu arasındaki birkaç derecelik bir fark, çok küçük yüklerde bile boyuna çatlama yol açarak deneyi başarısız kılmaktadır. Bu problem EY kompozitlerde kayma ve elyafa dik dayanımın, elyafa paralel dayanıma göre çok düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı nedenlerle, kuponların yüklenmesi sırasında çekme çenelerindeki küçük eksen kaçıklıkları da boyuna çatlak oluşum ile deney



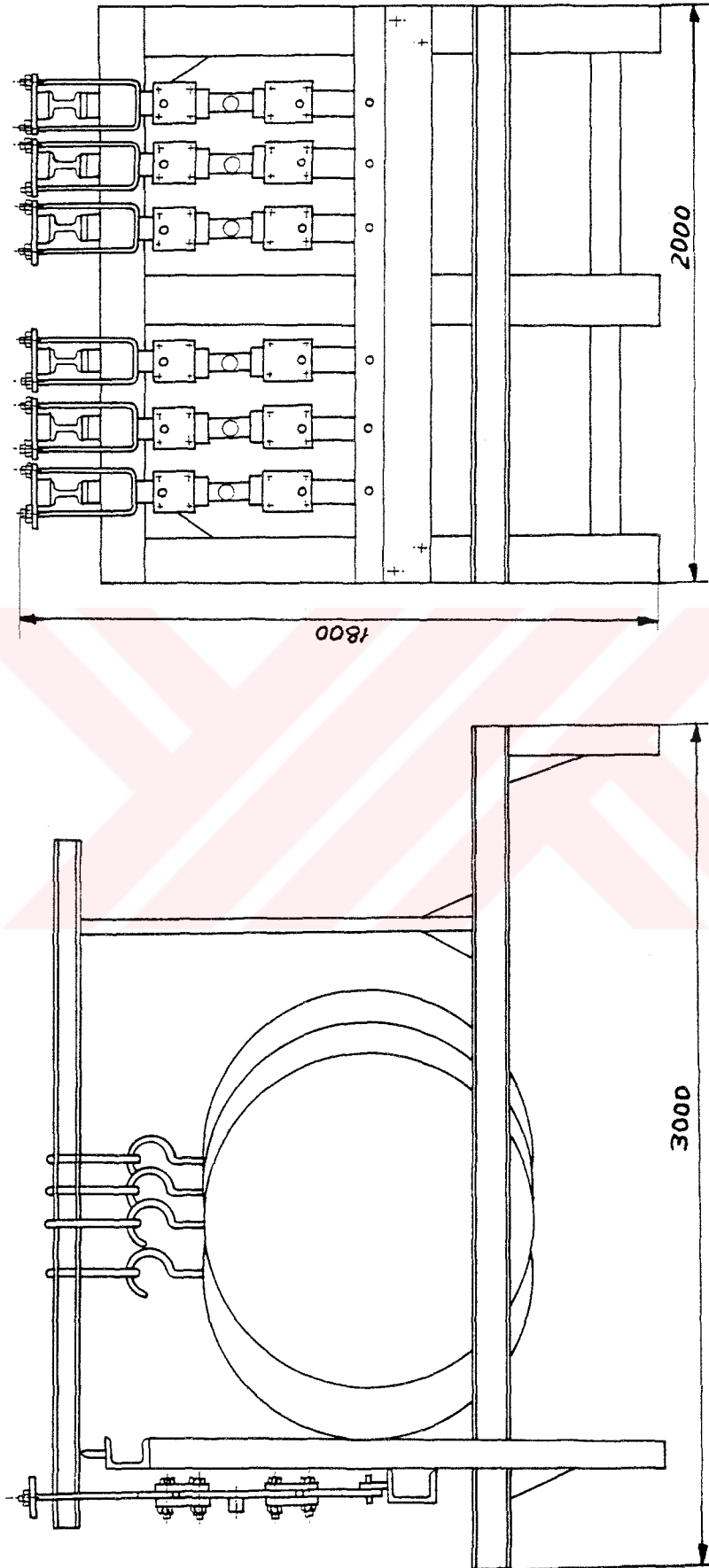
Şekil 5.2. Yüzey çatlaklı çekme deney numunesi

numunesini henüz yükleme tamamlanmadan bile tahrip edebilmektedir.

Yüzey çatlaklı GK numunelerinin hazırlanmasındaki son adım korozyon hücresinin oluşturulmasıdır. Bu amaçla ince levhalara plastik enjektörler silikon yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Diğer kalın numunelerde cam ve plastik halkalar ile korozyon hücreleri oluşturulmuştur. Daha sonra hücreler 0,6 N seyreltik HCl asit çözeltisiyle tamamen doldurulmuştur. Koroziyon ortamı olarak, literatürde belirtilen değerlerle karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla 0.6 N HCl asit çözeltisi seçilmiştir. Epoksi gibi sert yapıştırıcılar kuponun deformasyonu esnasında ayrılarak sızıntıya yol açmaktadır. Vazelin sürülmüş lastik conta ile de sızdırmazlık sağlanabilmektedir. Fakat contanın kayma ihtimali ve ilave bağlama aparatı gerektirdiğinden silikon kauçuk kadar verimli olmamaktadır.



Şekil 5.3. a. Sabit Yük Deney Seti



Şekil 5.3.b. Sabit yük deney seti boyutları

### 5.1.3. Sabit Yük Deney seti

Sabit yük altında GK deneyleri için iki ayrı deney seti imal edilmiştir. Şekil 5.3. a ve b. de görülen deney setine aynı anda 8 numune bağlanabilmektedir. Uygulanan max. Çekme yükü ise 20000 N civarındadır. Çekme kuponları çenelere 4 adet M10 civata ile bağlanmaktadır. Çekme çenelerinin iç kısmına diş açılmış olmasına rağmen büyük yüklerde çenelerde kayma görülebilmektedir. Çekme yükünün uygulanması esnasında çekme gerilmesinin yanında kayma ve eğilme gerilmelerinin oluşmaması için Şekil 5.4.'de görülen pimli bağlantı dşnlmştir. Kaldıraç kolunun tam paralel halde tutulması için vida ve su terazisi ile ayarlama yapılmıştır. Deney sırasında karşılaşılan en büyük zorluk numunelerin çenelere eksenel olarak bağlanmasıdır.



Şekil 5.4. Seri numune bağlanabilen sabit yük deney seti

Numune eksenine ile çenelerdeki pim delik eksenine arasındaki birkaç mm. kaçıklık halinde, numune üzerinde kayma ve eğilme gerilmeleri oluşacaktır. EY cam/polyester kompozitin çekme dayanımının yanında kayma ve enine dayanımın çok düşük olması nedeniyle henüz yük uygulama işlemi tamamlanmadan boyuna çatlama ile numuneler iki parçaya ayrılabilir.

Şekil 5.4.'de ise aynı çekme yükü altında birkaç numune bağlanabilmesi amacıyla dizayn edilen deney seti görülmektedir. 15000 N kapasiteli bu deney seti ile aynı çekme gerilmesi altında değişik ortamlarda deneyler yapılması planlanmıştır.

## 5.2. Deneylerin yapılışı ve sonuçlar

### 5.2.1. Çekme deneyi

CTP deney levhalarının hazırlanması ve deney levhalarından çekme özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili deneyler TS3783 ve TS3860'da standart olarak verilmiştir.

Deneyler Şekil 5.2.'de görülen çentiksiz çekme numuneleri ile D.E. Üniversitesi Müh.-Mim. Fak. Uygulamalı Mek. Lab. da Instron Universal Çekme Tezgahında yapılmıştır. Elastisite modülü uzama ölçerler yardımıyla üç ölçme ortalaması olarak bulunmuştur. Çekme hızı 0,1 cm/dak olarak seçilmiştir. Duyulabilir ilk çatlama sesi kopma mukavemetinin %40'ında duyuldu. Cam keçe polyester kompozitlerde ilk çatlama %0,3 şekil değiştirme değerinde oluşmaktadır. Deneylerde, ilk çatlamanın duyulduğu şekil değiştirme değeri %0,50-0,55 arasındadır. Bu değer kuvvet- şekil değiştirme eğrisinde bir dirsek noktası oluşturmaktadır. Keçe kompozitte enine çatlak oluşumu daha düşük deformasyonlarda başlamaktadır.

Cam elyaf ve reçinenin elastisite modülleri ve ortalama cam hacim yüzde değerleri sırasıyla  $E_f=70$  GPa,  $E_m=3,5$  GPa  $v_f=0,52$  bileşenler kuralına göre

$$E_c = E_f \cdot V_f + (1 - V_f) E_m \quad (5.1.)$$

formülünden hesaplanırsa kompozitin elastisite modülü 38,08 GPa olarak bulunur. Deneylerden elde edilen modül  $E_c=37.31$  GPa olup aradaki fark fazla değildir. Bu farklılık hesapta kullanılan değerlerin ideal değerler olmasından kaynaklanmaktadır. Bileşenlerin üretimi ve kompozitin yapımı sırasında oluşabilecek elyaf hasarı, ıslanmamış veya fazla reçineli bölgeler, hızlandırıcı ve sertleştirici oranlarının doğru seçilememesi ve düzgün karıştırılmaması gibi pek çok hatadan kaynaklanmaktadır.

Kompozitin çekme dayanımının imalat özelliklerine çok bağımlı olması yüzünden bileşenler kuralı pratikte dayanım hesabında kesin değerler vermemektedir. EY cam/polyester kompozit levha için ( $V_f = 0.50$ ) Kopma dayanımı 500-900 MPa olarak verilmektedir [121].

Deneylerde karşılaşılan asıl zorluk çekme uç levhalarının deney numunesine gevrek özellik gösteren epoksi reçine ile yapıştırılmış olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden eksantrik sıkma çeneleri ile yapılan deneylerin büyük çoğunluğunda uç levhaları sıyrılmıştır. Dolayısıyla uç levhası yapıştırılan deneylerde kendiliğinden sıkışan eğimli çeneler kullanılmalıdır.

Kompozit çekme özellikleri aşağıda Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. *Laminatın Çekme Özellikleri*

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| Elast. Modülü         | 37.01 MPa |
| Çekme dayanımı        | 520 MPa   |
| Kopma şekil değişimi  | %1,3      |
| İlk çatlama           | %0,53     |
| İlk çatlama gerilmesi | 200 MPa   |

### 5.2.2. Yakma Deneyi

Elyaf takviyeli kompozitlerin elyaf/reçine oranının belirlenmesi için iki farklı yöntem kullanılmaktadır. bunlardan ilki, kompozitin yoğunluğunun ölçülmesidir.



Polimer esaslı kompozitlerin çoğunda, yapıdaki gaz boşluk miktarı %1'in altında olduğundan, malzeme boşluksuz kabul edilerek aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$V_f = (\rho_c / \rho_m) / (\rho_f / \rho_m) \quad (5.2)$$

Burada  $\rho_c$ ,  $\rho_m$ ,  $\rho_f$  sırasıyla kompozit, matriks ve elyafın yoğunluklarını tanımlamaktadır.

Daha kesin bir deney metodu ise elyaf etkilemeyen fakat matriksi çözebilen bir çözücü ile matriksin uzaklaştırılmasıdır. CTP de en pratik yöntem reçinenin 600 °C civarında fırın içerisinde yakılarak uzaklaştırılmasıdır. Düşük sıcaklıklarda plastik matriksin yakılması cam elyafta herhangi bir fiziksel değişime yol açmamaktadır. Bu deney yakma deneyi (Burn-off) olarak adlandırılmaktadır. Deney işleminde kondüsyonlanmış numuneler hassas olarak tartıldıktan sonra yakılmaktadır. Reçine tamamen yandıktan sonra kalan camın tartılmasıyla aşağıdaki yüzdesi fazla olduğundan 5.2. bağıntısı kullanılmamalıdır

$$V_f = (W_f / \rho_f) / (W_c / \rho_c) \quad (5.3)$$

Burada  $W_f$  ve  $W_c$  elyaf ve kompozitin ağırlıklarıdır. Epoksi gibi viskoz reçinelerde malzeme içerisinde tutulan gaz boşluk yüzdesi ise aşağıdaki formülden bulunmaktadır.

Çekme deney numunelerinin çıkarıldığı levhanın orta ve kenar kısımlarında cam yüzdesi değişebileceğinden çatlağın bulunduğu kısımdan alınan numuneler kullanıldı. Kontrol için ayrıca levhanın kenar kısımlarından da parça alınarak yakıldı. Kompozitin yoğunluğu havada ve su içerisinde tartma sonucu aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

$$\rho_c = W_{ch} / (W_{ch} - W_{cs}) \quad (5.4)$$

Burada  $W_{ch}$  ve  $W_{cs}$ , kompozitin havada ve sudaki ağırlıklarıdır.

Yoğunluk tayini için diğer bir metod prizmatik yakma numune boyutlarının, 1/20 lik duyarlılıkla ölçümü sonucu hacminin bulunması ve 1/10 gr.lık terazide tartılmasıdır.



### 5.2.3. Gerilmeli Korozyon Deneyleri

CTP'lerde gerilmeli korozyon mekanizması elyafın korozyona uğrayarak kopması sonucu çatlak ilerlemesinden oluşmaktadır. Cam elyaf ise özellikle mineral asitlere karşı çok duyarlıdır. Bu yüzden cam takviyeli kompozitlerde korozif ortam olarak sulandırılmış mineral asitler üzerinde çalışmalar yoğunlaştırılmıştır.

Daha önce yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlarla karşılaştırma yapabilmek için deney ortamı olarak 0,6-N HCl asit seçilmiştir. Deney sıcaklığı ise  $20\pm 4^{\circ}\text{C}$  olarak belirlenmiştir.

Deney numunelerinin yanında, ortamında referans çalışmalarla aynı seçilmesindeki amaçlardan biri de hasar mikromekanizmasının benzerliği sağlanarak yüzey çatlaklı deney numunelerinin uygunluğunun araştırılmasıdır.

Korozyon hücresi, çatlağı tamamen örtecek şekilde sulandırılmış asit ile dolduruldu. Deneyler çok uzun sürmediğinden ve korozyon hücresinin de tamamen kapalı olmasından dolayı asit konsantrasyonunda önemli bir değişim olmamıştır. Ayrıca ortamla malzeme arasında konsantrasyonu değiştirecek derecede reaksiyon oluşmamıştır.

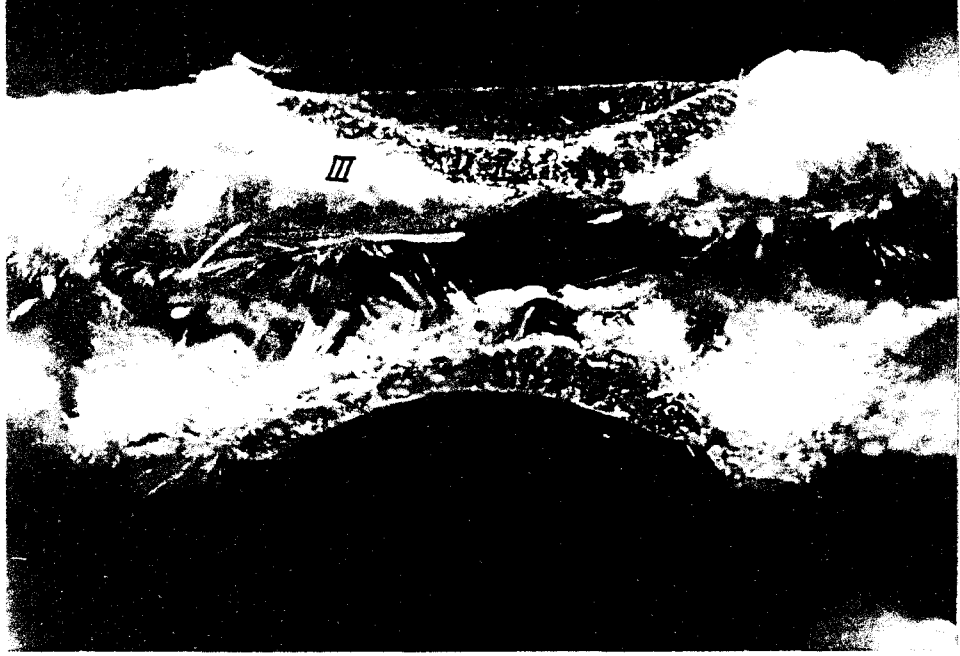
Yakma testi sonucunda deneylerde kullanılan EY CTP levhaların elyaf hacimsel yüzdeleri, ince ve kalın levhalar için sırasıyla 0.48-0.56 ile 0.37-0.40 olarak elde edilmiştir.

### 5.2.4. Gerilmeli Korozyon Çatlak İlerleme Değerlerinin Ölçümü ve Çatlak

#### Geometrisinin Belirlenmesi

Sabit yük altında yüzey çatlağının gerilmeli korozyon davranışını belirlemek amacıyla, belirli sürelerde tek taraflı korozyona maruz bırakılan numuneler daha sonra deney setinden alınarak çatlak bölgesinden kırıldı.

Gerilmeli korozyonda çatlak ilerlemesi, oldukça düşük gerilme değerlerinde görülür. Gerek EY levhada gereksiz keçe kompozitte oluşan GK çatlak yüzeyleri oldukça pürüzsüzdür ve çekme doğrultusuna diktir [104]. Havada kopma halinde ise arayüzey ayrılması, enine çatlama ve delaminasyonu takiben elyaf kopması görülür. Arayüzey dayanımına bağlı olarak elyaf sıyrılması sonucu kırık yüzeyi fırçamsı bir görünüş verir. Havada ve gerilmeli korozyondaki bu farklı çatlak ilerleme davranışı



Şekil 5.5. Yüzey çatlağının gerilmeli korozyon mikro fotoğrafı

gerilmeli korozyon çatlağının sınırlarını çok açık ve kesin bir şekilde belirler. Şekil 5.5.'de çatlak düzleminde kırılmış bir GK çatlağı görülmektedir. Renklendirilmiş kısım (I. Bölge) orjinal çatlak bölgesidir. Bunu takibeden düzgün ilerlemiş bölge GK çatlak bölgesidir (II. Bölge). Havada kırılmış olan (III. bölge) ise, elyaf kopmaları tesadüfi dağılmış olduğundan oldukça pürüzlüdür.

Çatlak boyutları 40 büyütmeli seyyar mikroskopla elips merkez açısına bağlı olarak değişik doğrultularda ölçüldü. Ayrıca çatlak bölgelerinin KTÜ Makina Müh. Bölümü'nde 30 büyütmeli stereoskopik mikroskopda mikrofotografı alındı.

## 6. NÜMERİK SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada sıg yüzey çatlağının kısa sürelerde ( $T \leq 180$  saat) ilerleme davranışı incelenmiş ve ortalama çatlak hızları belirlenmiştir.

Malzeme türü olarak EY cam/polyester CTP kompozit levha kullanılmıştır. Deney seti kapasitesi ve uygulanacak gerilme değerleri gözönünde tutularak levha kalınlığı ortalama 2 mm seçilmiştir. İmalat özelliklerine bağlı olarak levha kalınlığı 1.6-2.3 mm arasında değişmektedir. Buna karşılık elyaf hacimsel yüzdesi ise 0.48-0.56 arasındadır. Reçine ve elyaf türleri ile üretim metodu seçiminde bu konuda yapılan deneysel çalışmalar esas alınarak, izoftalik reçine ve E cam elyafından filaman sarma ve presleme metoduyla levhalar üretilmektedir.

CTP'lerde gerilmeli korozyon esas olarak ortamın elyafa etkisinden kaynaklanmaktadır. Gerilmeli korozyonda çatlak ilerleme kinetiği konusunda birkaç değişik yeni model ortaya konulmuştur.

Cam/polyester kompozitler gevrek davranış gösterdiklerinden 1980'de Hogg ve Hull [104] CTP borular üzerinde deneyler yaparak buldukları sonuçları lineer elastik kırılma mekaniği prensipleriyle analiz etmişlerdir. 1982'de Hull ve Price [78] çatlak ilerleme hızı ile GŞF arasındaki bağıntıyı GK mikromekanizması ile daha açık bir şekilde ifade ettiler.

GK mekanizmasında ortam, gerilme etkisindeki elyafa ya matriks çatlağıyla doğrudan veya difüzyonla ulaştığında elyafı hasara uğratmaktadır. Ortamın elyafa etkisi iki türlü olmaktadır. Birincisi cam elyaf içerisinde bulunan metal iyonlarının asit içerisindeki hidrojen iyonları ile değişiminin yanında cam içerisindeki bileşenlerin ortamla süzülerek uzaklaştırılmaları sonucu dış yüzeydeki hacimsel küçülme sonucu elyafı spiral çatlaklar oluşmaktadır. Daha sonra oluşan bu çatlakla zayıf bir noktada ilerleyerek elyafı koparmaktadırlar.

Reçinenin etkisi konusunda 1987'de Price ve Hull, 1990'da hogg değişik GK modelleri ortaya koymuşlardır. Price ve Hull matriks tokluğunun gerilmeli korozyon çatlak ilerleme hızını azalttığını tesbit ettiler. Modellerinde yüksek tokluktaki reçineden imal edilen levhada çatlak ilerlemesinin gevrek reçineliye göre daha farklı olduğunu ileri sürdüler. Elyaf kopmasından sonra reçineye ulaşan çatlak bu bölgede durdurulmaktadır. Dolayısıyla ortamın kopmamış elyafa etkisi sadece difüzyon yolu ile olmaktadır. Çatlak ucundan iç kısımdaki elyafın da kopmasından daha sonra reçine hasara uğramaktadır.

Hogg daha önce yapılan deneysel çalışmaları yorumlayarak yeni bir model kurmuştur. Modelde gerilmeli korozyon çatlak ilerleme davranışının, sadece çatlak ucunda elyafın taşıdığı gerilme ile kontrol edildiğini ileri sürmüştür. Reçinenin gerilmeli korozyon çatlak ilerleme hızına katkısı ise çatlak ucunda elyafın taşıdığı gerilmenin değişimidir. Sünek ve tok reçine, çatlak düzlemine dik doğrultuda sınırlı düzeyde akma göstererek elyaf gerilmesini azaltacaktır. Dolayısıyla gerilmeli korozyon açısından reçine seçiminde kriterin, reçinenin kayma modülü ve kayma mukavemetinin olduğunu açıklamıştır.

CTP'lerde gerilmeli korozyon çatlak oluşumu ve ilerlemesi, havada hasar oluşturan gerilme seviyesinin çok altındaki değerlerde görülmektedir. Basıncı kaplar, kimyasal proses kazanları, basınçlı borular yeterli mekanik dayanımı sağlayabilmeleri amacıyla yüksek elyaf hacimsel oranlarında sürekli cam elyaftan üretilmektedirler. Sürekli elyaf takviyeli CTP'ler gerilmeli korozyona en duyarlı malzemelerdir. Çapraz ve açık katlı kompozitlere göre, hasar mikromekanizması daha basit olduğundan, CTP'lerin kırılma davranışlarının incelenmesi EY malzemeler üzerinde başlamış ve yoğunlaşmıştır.

CTP elemanların dizaynında gerilmeli korozyon etkisini belirlemek amacıyla yapılacak çalışmalarda ilk adım gerilme, ortam ve malzeme parametrelerine göre çatlak oluşum ve ilerleme sürelerinin belirlenmesidir. Yapılan çalışmalarda

[68,77,78,81,114] çatlak ilerleme hızı ile gerilme şiddet faktörü arasında aşağıdaki bağıntı araştırılmıştır.

$$da/dt=A.K_I^n \quad (6.1)$$

Burada a-çatlak uzunluğu,  $K_I$ -mod I gerilme şiddet faktörü, A ve n ise malzeme sabitleridir. Gerilmeli korozyon oluşumu  $K_I=2\text{MNm}^{-3/2}$  değerinde başlamaktadır. Düşük  $K_I$  değerlerinde düzlemsel olarak ilerleyen gerilmeli korozyon çatlakları  $K_I$  artışıyla daha pürüzlü bir hal almaktadır.  $K_I= 10-12 \text{MNm}^{-3/2}$  değerinden sonra ise basamaklı ilerleme davranışı artarak çatlak düzlem dışı ilerleme gösterebilmektedir. Bu nedenle numune geometrilerine göre  $K_I$  değerleri 3 -10  $\text{MNm}^{-3/2}$  olacak şekilde, bir basic programı yapılarak deney yükleri belirlenmiştir.

Kompozit bileşenlerin türlerinin , yüzdelerinin ve oryantasyonun A ve n gibi malzeme sabitlerine etkileri, gerilmeli korozyon mikromekanizmasının analizi yapılarak belirlenir. Çalışmaların ana gayesi gerilmeli korozyon açısından malzeme dizayn parametrelerini ve kriterlerini belirlemektir.

Daha önceki çalışmalar deneylerin basitliği sebebiyle boru basma ve kompakt çekme numuneleri üzerinde yoğunlaşmıştır.

Kırılma mekaniği deneylerinde kullanılan numune tipleri çok çeşitlidir. Gerek izotropik gerekse kompozit malzemeler açısından bulunan kırılma toklukları ve gerilme şiddet faktörleri numune tiplerine göre oldukça farklı sonuçlar vermektedir. Kırılma mekaniği çalışmaları, kırılma tokluğu gibi malzeme özelliklerinin deney numune etkilerinden arındırılması konusunda hala sürdürülmektedir.

Kompozit malzemelerde yüzey çatlaklarının analizi konusunda yapılan çalışmalar çok sınırlıdır. Yüzey çatlak geometrisinin karmaşık olması hem gerilme şiddet faktörü parametre sayısının fazla olmasına hem de hasar mekanizmasının çok daha karmaşık olmasına neden olmaktadır. Gerilmeli korozyonda havada kırılmada karşılaşılan arayüzey ayrılması, enine çatlama, elyaf sıyrılması gibi olaylar [131]

etkili olarak oluşmadığından CTP malzemenin yüzey çatlaklarının analizinde izotrop çözümleri kullanmak daha uygundur.

Boru basma deneyinde, ortamın gerçekte olduğu gibi tek taraftan etki etmesine rağmen, çatlakların çok sayıda ve kontrolsüz oluşumu çatlak hızı-gerilme şiddet faktörü arasındaki bağıntının çıkarılmasında düşük korelasyon katsayısı ve dağınık değerler vermektedir. Kompakt çekme, tek ve çift kenar çatlakları gibi numunelerle yapılan deneylerde ise her ne kadar jel kat, vazelin ve gres gibi koruyucu tabakalar kullanılsa bile ortam etkisi çok taraflı olmaktadır. Ayrıca çatlakların çekme doğrultusuna paralel ilerlemesini sağlayabilmek amacıyla kanal açılarak kesitin inceltilmesi, deney sonuçlarına kesinlik kazandırmasına rağmen sonuçlar endüstriyel uygulamadan uzaklaşmaktadır. Dolayısıyla bu deneylerden elde edilen parametrelerin dizayn değeri olarak kullanılması sakıncalar doğuracaktır.

Mühendislik uygulamalarında ortam çatlaklara tek yönden etki edeceğinden yüzey çatlaklarının gerilmeli korozyonu gerçek sonuçları verecektir. Bu nedenle bu çalışmada yüzey çatlaklı CTP ler tercih edilmiştir.

Yüzey çatlaklarında gerilme şiddet faktörünü tam olarak veren kesin bir denklem olmadığından Ayrıca kompozit malzemeler için bir denklem geliştirilmediğinden, bu çalışmada Newman-Raju [125], Nishioka [126] ve tek kenar çatlakları (SEN) denklemleri kullanılarak yüzey çatlaklı CTP'lerde gerilme şiddet faktörleri bulundu.  $a/c$ 'nin 0,20 den düşük değerlerinde tek kenar çatlakları için geliştirilmiş olan denklem izotropik malzemelerde iyi sonuç verdiği için kompozitlerde de iyi sonuç verebileceği düşünülerek,  $a/c < 0,20$  için ilave olarak tek kenar çatlakları denklemi kullanıldı. Gerilme şiddet faktörlerinin  $a/c$ ,  $a/t$  ve parametrik açı  $\phi$  ye göre değişimi Tablo 6.1-6.6'da verildi. Herbir numunenin gerilme şiddet faktörlerinin parametrik açıya göre değişiminin grafiği gereksiz yer işgalini önlemek için verilmedi. Ancak  $a/c$  nin 0,13 den itibaren belli aralıktaki artan değerlerinin grafiği Şekil 6.1-6.11'de gösterildi. Şekil 6.1-6.11'deki grafikler seçilirken artan  $a/c$

oranlarına karşılık a/t sabit tutulmaya çalışıldı. Bununla birlikte a/c= 0.20 ve a/c=0.32 de a/t nin değişen değerlerindeki grafikleri de çizilerek a/t ye göre gerilme şiddet faktörlerinin değişimi incelendi (Şekil 6.4-6.6, 6.10, 6.11).

Çatlak geometrisi z eksenine göre simetrik olduğundan  $K_I$  hesaplanırken parametrik açının 0 dereceden 90 dereceye kadar olan değişimi alındı.  $90^\circ - 180^\circ$  arası tekrar edeceğinden işleme konmadı. Dolayısıyla grafiklerde de  $0^\circ - 90^\circ$  lerde  $K_I$ 'in değişimi çizildi. Gerilme şiddet faktörleri her bir a/c oranında gerek Newman-Raju gerek Nishioka denklemlerine göre açıyla birlikte artış göstermektedir. Bu artış küçük açılarda hızlı iken, açı değeri büyüdükçe yavaşlamaktadır. a/c nin ve a/t nin bütün değerlerinde Newman-Raju'ya göre  $K_I$  değerleri Nishioka'ya göre ortalama %12 büyük çıkarken,  $K_I$  eğrileri paralellik arz etmektedir.

$K_I$  değerleri  $\phi=0^\circ$  de en düşük değerden  $\phi=90^\circ$  de en yüksek değer çıkmaktadır. Buradan hasarın çatlak dibinden itibaren ilerlemeye başladığı doğrulanmıştır. Bu husus derin olmayan çatlaklar için geçerlidir. Derin çatlaklarda çatlakın  $\phi=0^\circ$  de ilerlemeye başlaması gerekir [129].

Tek kenar çatlak denkleminin parametrik açı  $\phi$  ile değişmediğinden a/c<0.2 oranlarında her numune için sadece bir değer bulunmuştur. a/c=0,13 den a/c=0,2 ye doğru artarken SEN'e göre  $K_I$  değerleri de büyümektedir. SEN değerleri Newman-Raju ve Nishioka değerleriyle kıyaslanınca  $\phi=90^\circ$  de yaklaştıkları görülmektedir. Çünkü SEN değerleri ancak  $\phi=90^\circ$  de geçerlidir. a/c oranı 0,2 ye yaklaştıkça SEN değerleri Newman-Raju'nun altına inmektedir. Buradan a/c<0,2 oranlarında, izotropik malzemelerde olduğu gibi kompozit malzemelerde de tek kenar çatlak denkleminin gerilme şiddet faktörleri için geçerli olduğu sonucuna varılır.

a/c=0.20 de a/t değerleri artarken parametrik açı  $\phi$  nin  $0^\circ$  den  $90^\circ$  ye ilerlemesiyle  $K_I$  değerleri hem Newman-Raju'da hem de Nishioka'da azalmaktadır. Bu husus herhangi bir sabit a/c oranında a/t nin artışıyla  $K_I$  in azaldığını gösterir. Aynı olayı Şekil 6.10-6.11' den a/c=0.32 değerinden de görebiliriz.



Tablo 6.1.  $\phi=0^\circ$  Çatlak İlerleme Hızı ve Gerilme Şiddet Faktörleri

| NU.NO | a/c  | a/t  | St<br>(MPa) | v<br>(m/s) | KI.NR<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) | KI.NHK<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) |
|-------|------|------|-------------|------------|----------------------------|-----------------------------|
| 5     | 0.25 | 0.30 | 202.44      | 2.34E-09   | 5.26                       | 4.20                        |
| 8     | 0.27 | 0.30 | 215.84      | 1.93E-09   | 5.84                       | 4.71                        |
| 10    | 0.20 | 0.27 | 192.85      | 1.19E-09   | 4.40                       | 3.56                        |
| 22    | 0.34 | 0.48 | 166.79      | 6.89E-09   | 6.83                       | 5.18                        |
| 24    | 0.27 | 0.40 | 143.26      | 1.02E-09   | 4.92                       | 3.74                        |
| 25    | 0.28 | 0.36 | 173.10      | 2.33E-09   | 5.48                       | 4.27                        |
| 26    | 0.22 | 0.32 | 260.86      | 9.97E-10   | 6.81                       | 5.43                        |
| 27    | 0.24 | 0.40 | 160.94      | 1.11E-09   | 4.90                       | 3.72                        |
| 28    | 0.23 | 0.29 | 166.39      | 1.50E-09   | 4.28                       | 3.43                        |
| 30    | 0.23 | 0.31 | 106.26      | 5.46E-10   | 3.34                       | 2.62                        |
| 32    | 0.38 | 0.57 | 164.24      | 3.06E-09   | 8.06                       | 6.16                        |
| 33    | 0.24 | 0.29 | 133.41      | 1.31E-09   | 3.79                       | 3.01                        |
| 34    | 0.22 | 0.44 | 108.27      | 1.48E-09   | 3.77                       | 2.73                        |
| 35    | 0.22 | 0.39 | 124.61      | 8.73E-10   | 3.85                       | 2.89                        |
| 36    | 0.26 | 0.46 | 126.64      | 1.53E-09   | 4.76                       | 3.50                        |
| 38    | 0.26 | 0.29 | 281.77      | 5.21E-09   | 7.35                       | 6.01                        |
| 39    | 0.25 | 0.28 | 254.14      | 4.15E-09   | 6.48                       | 5.28                        |
| 40    | 0.25 | 0.27 | 282.79      | 1.72E-09   | 6.93                       | 5.74                        |
| 41    | 0.23 | 0.24 | 271.96      | 2.24E-09   | 6.03                       | 5.02                        |
| 42    | 0.26 | 0.33 | 180.95      | 2.71E-09   | 6.23                       | 4.67                        |
| 44    | 0.26 | 0.40 | 210.37      | 1.56E-09   | 7.02                       | 5.39                        |
| 45    | 0.29 | 0.40 | 209.63      | 1.12E-08   | 7.02                       | 5.51                        |
| 47    | 0.20 | 0.26 | 242.22      | 2.30E-09   | 5.34                       | 4.39                        |
| 48    | 0.32 | 0.41 | 260.67      | 4.77E-09   | 9.28                       | 7.25                        |
| 49    | 0.20 | 0.30 | 246.20      | 6.90E-09   | 5.74                       | 4.63                        |
| 50    | 0.19 | 0.22 | 263.32      | 5.69E-09   | 5.10                       | 4.29                        |
| 51    | 0.19 | 0.33 | 192.74      | 4.33E-09   | 4.81                       | 3.75                        |
| 53    | 0.23 | 0.51 | 217.58      | 4.47E-09   | 8.99                       | 6.46                        |
| 54    | 0.27 | 0.59 | 196.98      | 2.38E-09   | 10.08                      | 7.15                        |
| 55    | 0.26 | 0.60 | 184.77      | 2.98E-09   | 9.59                       | 6.71                        |
| 56    | 0.17 | 0.42 | 193.62      | 2.98E-09   | 5.94                       | 4.30                        |
| 57    | 0.16 | 0.31 | 212.05      | 2.58E-09   | 4.83                       | 3.78                        |
| 58    | 0.13 | 0.28 | 189.17      | 1.97E-09   | 3.81                       | 3.01                        |
| 60    | 0.10 | 0.20 | 163.59      | 1.86E-09   | 2.28                       | 1.89                        |
| 61    | 0.14 | 0.29 | 192.27      | 2.16E-09   | 4.14                       | 3.25                        |
| 62    | 0.18 | 0.39 | 151.22      | 1.84E-09   | 4.62                       | 3.40                        |
| 63    | 0.13 | 0.24 | 239.82      | 1.90E+01   | 4.18                       | 3.44                        |
| 65    | 0.14 | 0.28 | 232.68      | 1.60E-09   | 4.84                       | 2.66                        |
| 66    | 0.18 | 0.35 | 183.49      | 1.77E-09   | 5.01                       | 3.82                        |
| 67    | 0.22 | 0.45 | 178.14      | 3.32E-09   | 6.37                       | 4.65                        |
| 68    | 0.16 | 0.23 | 287.64      | 1.39E-08   | 6.22                       | 4.39                        |
| 70    | 0.18 | 0.51 | 154.17      | 7.43E-09   | 5.58                       | 3.81                        |



| NU.NO | a/c  | a/t  | St<br>(MPa) | v<br>(m/s) | KI.NR<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) | KI.NHK<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) |
|-------|------|------|-------------|------------|----------------------------|-----------------------------|
| 71    | 0.19 | 0.31 | 204.15      | 7.12E-09   | 5.28                       | 4.15                        |
| 72    | 0.21 | 0.31 | 293.35      | 2.70E-09   | 7.32                       | 5.92                        |
| 73    | 0.24 | 0.38 | 268.23      | 4.88E-09   | 8.22                       | 6.42                        |
| 74    | 0.13 | 0.24 | 167.51      | 1.81E-09   | 2.97                       | 2.41                        |
| 75    | 0.20 | 0.38 | 171.78      | 4.72E-10   | 5.07                       | 3.81                        |
| 76    | 0.29 | 0.52 | 156.19      | 2.65E-09   | 7.19                       | 5.25                        |
| 77    | 0.18 | 0.34 | 176.08      | 1.94E-09   | 4.45                       | 3.43                        |
| 78    | 0.16 | 0.28 | 165.69      | 8.17E-10   | 3.81                       | 3.01                        |
| 79    | 0.23 | 0.33 | 202.55      | 3.29E-09   | 5.53                       | 4.34                        |
| 80    | 0.20 | 0.31 | 195.55      | 1.43E-09   | 4.79                       | 3.78                        |
| 81    | 0.20 | 0.32 | 211.54      | 2.03E-09   | 5.23                       | 4.12                        |
| 82    | 0.18 | 0.34 | 131.19      | 6.09E-10   | 3.42                       | 2.59                        |
| 84    | 0.32 | 0.52 | 172.14      | 2.35E-09   | 7.91                       | 5.91                        |
| 85    | 0.25 | 0.34 | 265.09      | 1.10E-08   | 6.24                       | 4.94                        |
| 86    | 0.26 | 0.45 | 239.11      | 1.72E-09   | 7.28                       | 5.47                        |
| 87    | 0.28 | 0.39 | 206.98      | 3.03E-09   | 7.02                       | 5.41                        |
| 88    | 0.18 | 0.35 | 132.48      | 1.84E-09   | 3.62                       | 2.76                        |
| 89    | 0.18 | 0.26 | 142.83      | 5.04E-10   | 2.91                       | 2.32                        |
| 90    | 0.17 | 0.35 | 193.85      | 1.12E-09   | 4.77                       | 3.63                        |
| 92    | 0.18 | 0.32 | 171.11      | 5.34E-09   | 4.17                       | 3.24                        |

Tablo 6.2.  $\phi=30^\circ$  Çatlak İlerleme Hızı ve Gerilme Şiddet Faktörleri

| NU.NO | a/c  | a/t  | St<br>(MPa) | v<br>(m/s) | KI.NR<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) | KI.NHK<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) |
|-------|------|------|-------------|------------|----------------------------|-----------------------------|
| 5     | 0.25 | 0.30 | 202.44      | 9.65E-10   | 7.08                       | 6.21                        |
| 8     | 0.27 | 0.30 | 215.84      | 1.24E-09   | 7.59                       | 6.70                        |
| 10    | 0.20 | 0.27 | 192.85      | 1.48E-09   | 6.50                       | 5.74                        |
| 22    | 0.34 | 0.48 | 166.79      | 5.36E-09   | 7.90                       | 6.77                        |
| 24    | 0.27 | 0.40 | 143.26      | 1.02E-09   | 6.33                       | 5.35                        |
| 25    | 0.28 | 0.36 | 173.10      | 1.99E-09   | 6.98                       | 6.01                        |
| 26    | 0.22 | 0.32 | 260.86      | 9.97E-10   | 9.64                       | 8.44                        |
| 27    | 0.24 | 0.40 | 160.94      | 7.43E-10   | 6.59                       | 5.57                        |
| 28    | 0.23 | 0.29 | 166.39      | 8.31E-10   | 5.94                       | 5.21                        |
| 30    | 0.23 | 0.31 | 106.26      | 6.55E-10   | 4.62                       | 3.97                        |
| 32    | 0.38 | 0.57 | 164.24      | 2.04E-09   | 8.76                       | 7.71                        |
| 33    | 0.24 | 0.29 | 133.41      | 1.09E-09   | 5.23                       | 4.55                        |
| 34    | 0.22 | 0.44 | 108.27      | 1.73E-09   | 5.25                       | 4.27                        |
| 35    | 0.22 | 0.39 | 124.61      | 6.55E-10   | 5.39                       | 4.50                        |
| 36    | 0.26 | 0.46 | 126.64      | 1.20E-09   | 6.14                       | 5.08                        |
| 38    | 0.26 | 0.29 | 281.77      | 5.21E-09   | 9.71                       | 8.69                        |
| 39    | 0.25 | 0.28 | 254.14      | 4.75E-09   | 8.75                       | 7.80                        |
| 40    | 0.25 | 0.27 | 282.79      | 1.38E-09   | 9.32                       | 8.42                        |
| 41    | 0.23 | 0.24 | 271.96      | 1.92E-09   | 8.55                       | 7.73                        |
| 42    | 0.26 | 0.33 | 180.95      | 2.41E-09   | 8.51                       | 6.81                        |
| 44    | 0.26 | 0.40 | 210.37      | 1.30E-09   | 9.10                       | 7.77                        |
| 45    | 0.29 | 0.40 | 209.63      | 5.45E-09   | 9.10                       | 7.62                        |
| 47    | 0.20 | 0.26 | 242.22      | 4.59E-09   | 7.98                       | 7.14                        |
| 48    | 0.32 | 0.41 | 260.67      | 3.67E-09   | 11.12                      | 9.67                        |
| 49    | 0.20 | 0.30 | 246.20      | 6.37E-09   | 8.44                       | 7.46                        |
| 50    | 0.19 | 0.22 | 263.32      | 2.23E-09   | 7.91                       | 7.21                        |
| 51    | 0.19 | 0.33 | 192.74      | 3.25E-09   | 7.24                       | 6.21                        |
| 53    | 0.23 | 0.51 | 217.58      | 4.47E-09   | 11.99                      | 9.80                        |
| 54    | 0.27 | 0.59 | 196.98      | 3.27E-09   | 12.52                      | 10.27                       |
| 55    | 0.26 | 0.60 | 184.77      | 2.58E-09   | 12.07                      | 9.80                        |
| 56    | 0.17 | 0.42 | 193.62      | 1.79E-09   | 9.23                       | 7.45                        |
| 57    | 0.16 | 0.31 | 212.05      | 2.21E-09   | 8.00                       | 6.86                        |
| 58    | 0.13 | 0.28 | 189.17      | 1.78E-09   | 6.81                       | 5.89                        |
| 60    | 0.10 | 0.20 | 163.59      | 1.45E-09   | 4.89                       | 4.40                        |
| 61    | 0.14 | 0.29 | 192.27      | 1.80E-09   | 7.18                       | 6.17                        |
| 62    | 0.18 | 0.39 | 151.22      | 1.53E-09   | 7.07                       | 5.78                        |
| 63    | 0.13 | 0.24 | 239.82      | 2.60E+01   | 7.75                       | 6.93                        |
| 65    | 0.14 | 0.28 | 232.68      | 1.33E-09   | 8.55                       | 5.13                        |
| 66    | 0.18 | 0.35 | 183.49      | 2.03E-09   | 7.71                       | 6.49                        |
| 67    | 0.22 | 0.45 | 178.14      | 2.65E-09   | 8.83                       | 7.24                        |
| 68    | 0.16 | 0.23 | 287.64      | 1.19E-08   | 8.69                       | 7.95                        |

| NU.NO | a/c  | a/t  | St<br>(MPa) | v<br>(m/s) | KI.NR<br>(Mpa $\bar{m}$ ) | KI.NHK<br>(Mpa $\bar{m}$ ) |
|-------|------|------|-------------|------------|---------------------------|----------------------------|
| 70    | 0.18 | 0.51 | 154.17      | 6.86E-09   | 8.33                      | 6.47                       |
| 71    | 0.19 | 0.31 | 204.15      | 4.58E-09   | 8.01                      | 6.91                       |
| 72    | 0.21 | 0.31 | 293.35      | 4.86E-09   | 10.56                     | 9.37                       |
| 73    | 0.24 | 0.38 | 268.23      | 3.90E-09   | 11.06                     | 9.58                       |
| 74    | 0.13 | 0.24 | 167.51      | 1.47E-09   | 5.42                      | 4.78                       |
| 75    | 0.20 | 0.38 | 171.78      | 1.13E-09   | 7.44                      | 6.20                       |
| 76    | 0.29 | 0.52 | 156.19      | 2.46E-09   | 8.78                      | 7.30                       |
| 77    | 0.18 | 0.34 | 176.08      | 1.26E-09   | 6.90                      | 5.86                       |
| 78    | 0.16 | 0.28 | 165.69      | 8.17E-10   | 6.22                      | 5.38                       |
| 79    | 0.23 | 0.33 | 202.55      | 4.60E-09   | 7.70                      | 6.66                       |
| 80    | 0.20 | 0.31 | 195.55      | 1.43E-09   | 7.17                      | 6.20                       |
| 81    | 0.20 | 0.32 | 211.54      | 2.03E-09   | 7.74                      | 6.70                       |
| 82    | 0.18 | 0.34 | 131.19      | 1.22E-09   | 5.35                      | 4.47                       |
| 84    | 0.32 | 0.52 | 172.14      | 1.29E-09   | 9.26                      | 7.87                       |
| 85    | 0.25 | 0.34 | 265.09      | 1.34E-08   | 8.33                      | 7.26                       |
| 86    | 0.26 | 0.45 | 239.11      | 1.50E-09   | 9.42                      | 7.95                       |
| 87    | 0.28 | 0.39 | 206.98      | 1.85E-09   | 8.96                      | 7.66                       |
| 88    | 0.18 | 0.35 | 132.48      | 1.49E-09   | 5.53                      | 4.65                       |
| 89    | 0.18 | 0.26 | 142.83      | 1.64E-09   | 4.59                      | 4.00                       |
| 90    | 0.17 | 0.35 | 193.85      | 2.25E-09   | 7.62                      | 6.40                       |
| 92    | 0.18 | 0.32 | 171.11      | 1.39E-08   | 6.49                      | 5.54                       |

Tablo 6.3.  $\phi=45^\circ$  Çatlak İlerleme Hızı ve Gerilme Şiddet Faktörleri

| NU.NO | a/c  | a/t  | St<br>(MPa) | v<br>(m/s) | KI.NR<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) | KI.NHK<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) |
|-------|------|------|-------------|------------|----------------------------|-----------------------------|
| 5     | 0.25 | 0.30 | 202.44      | 9.65E-10   | 8.02                       | 7.18                        |
| 8     | 0.27 | 0.30 | 215.84      | 1.38E-09   | 8.55                       | 7.71                        |
| 10    | 0.20 | 0.27 | 192.85      | 1.04E-09   | 7.42                       | 6.69                        |
| 22    | 0.34 | 0.48 | 166.79      | 5.36E-09   | 8.71                       | 7.68                        |
| 24    | 0.27 | 0.40 | 143.26      | 8.49E-10   | 7.11                       | 6.17                        |
| 25    | 0.28 | 0.36 | 173.10      | 2.16E-09   | 7.84                       | 6.91                        |
| 26    | 0.22 | 0.32 | 260.86      | 1.16E-09   | 10.96                      | 9.82                        |
| 27    | 0.24 | 0.40 | 160.94      | 9.28E-10   | 7.45                       | 6.45                        |
| 28    | 0.23 | 0.29 | 166.39      | 1.50E-09   | 6.75                       | 6.04                        |
| 30    | 0.23 | 0.31 | 106.26      | 6.55E-10   | 5.24                       | 4.61                        |
| 32    | 0.38 | 0.57 | 164.24      | 2.38E-09   | 9.51                       | 8.66                        |
| 33    | 0.24 | 0.29 | 133.41      | 1.09E-09   | 5.94                       | 5.27                        |
| 34    | 0.22 | 0.44 | 108.27      | 1.97E-09   | 5.95                       | 4.97                        |
| 35    | 0.22 | 0.39 | 124.61      | 8.73E-10   | 6.12                       | 5.23                        |
| 36    | 0.26 | 0.46 | 126.64      | 1.31E-09   | 6.89                       | 5.87                        |
| 38    | 0.26 | 0.29 | 281.77      | 5.35E-09   | 10.97                      | 10.02                       |
| 39    | 0.25 | 0.28 | 254.14      | 4.75E-09   | 9.92                       | 9.02                        |
| 40    | 0.25 | 0.27 | 282.79      | 1.38E-09   | 10.56                      | 9.73                        |
| 41    | 0.23 | 0.24 | 271.96      | 1.92E-09   | 9.74                       | 8.98                        |
| 42    | 0.26 | 0.33 | 180.95      | 2.71E-09   | 9.13                       | 7.87                        |
| 44    | 0.26 | 0.40 | 210.37      | 1.43E-09   | 10.24                      | 8.97                        |
| 45    | 0.29 | 0.40 | 209.63      | 4.54E-09   | 10.24                      | 8.74                        |
| 47    | 0.20 | 0.26 | 242.22      | 4.59E-09   | 9.13                       | 8.33                        |
| 48    | 0.32 | 0.41 | 260.67      | 3.67E-09   | 12.35                      | 11.02                       |
| 49    | 0.20 | 0.30 | 246.20      | 7.43E-09   | 9.64                       | 8.70                        |
| 50    | 0.19 | 0.22 | 263.32      | 2.23E-09   | 9.08                       | 8.43                        |
| 51    | 0.19 | 0.33 | 192.74      | 3.61E-09   | 8.27                       | 7.26                        |
| 53    | 0.23 | 0.51 | 217.58      | 4.47E-09   | 13.50                      | 11.37                       |
| 54    | 0.27 | 0.59 | 196.98      | 3.17E-09   | 13.93                      | 11.84                       |
| 55    | 0.26 | 0.60 | 184.77      | 2.18E-09   | 13.45                      | 11.32                       |
| 56    | 0.17 | 0.42 | 193.62      | 1.79E-09   | 10.54                      | 8.74                        |
| 57    | 0.16 | 0.31 | 212.05      | 2.21E-09   | 9.20                       | 8.07                        |
| 58    | 0.13 | 0.28 | 189.17      | 1.58E-09   | 7.87                       | 6.94                        |
| 60    | 0.10 | 0.20 | 163.59      | 1.45E-09   | 5.69                       | 5.21                        |
| 61    | 0.14 | 0.29 | 192.27      | 1.80E-09   | 8.28                       | 7.26                        |
| 62    | 0.18 | 0.39 | 151.22      | 1.53E-09   | 8.08                       | 6.77                        |
| 63    | 0.13 | 0.24 | 239.82      | 1.83E-08   | 8.97                       | 8.17                        |
| 65    | 0.14 | 0.28 | 232.68      | 1.74E-09   | 9.87                       | 6.04                        |
| 66    | 0.18 | 0.35 | 183.49      | 2.03E-09   | 8.82                       | 7.60                        |
| 67    | 0.22 | 0.45 | 178.14      | 3.32E-09   | 10.00                      | 8.42                        |
| 68    | 0.16 | 0.23 | 287.64      | 1.21E-08   | 10.02                      | 9.34                        |

| NU.NO | a/c  | a/t  | St<br>(MPa) | v<br>(m/s) | KI.NR<br>(Mpa√m) | KI.NHK<br>(Mpa√m) |
|-------|------|------|-------------|------------|------------------|-------------------|
| 70    | 0.18 | 0.51 | 154.17      | 8.00E-09   | 9.46             | 7.57              |
| 71    | 0.19 | 0.31 | 204.15      | 5.09E-09   | 9.16             | 8.08              |
| 72    | 0.21 | 0.31 | 293.35      | 4.86E-09   | 12.04            | 10.92             |
| 73    | 0.24 | 0.38 | 268.23      | 4.15E-09   | 12.50            | 11.10             |
| 74    | 0.13 | 0.24 | 167.51      | 1.47E-09   | 6.27             | 5.64              |
| 75    | 0.20 | 0.38 | 171.78      | 1.23E-09   | 8.47             | 7.24              |
| 76    | 0.29 | 0.52 | 156.19      | 2.46E-09   | 9.77             | 8.38              |
| 77    | 0.18 | 0.34 | 176.08      | 1.36E-09   | 7.90             | 6.86              |
| 78    | 0.16 | 0.28 | 165.69      | 8.17E-10   | 7.16             | 6.32              |
| 79    | 0.23 | 0.33 | 202.55      | 4.60E-09   | 8.75             | 7.73              |
| 80    | 0.20 | 0.31 | 195.55      | 1.33E-09   | 8.20             | 7.24              |
| 81    | 0.20 | 0.32 | 211.54      | 2.03E-09   | 8.84             | 7.82              |
| 82    | 0.18 | 0.34 | 131.19      | 1.68E-09   | 6.13             | 5.24              |
| 84    | 0.32 | 0.52 | 172.14      | 1.29E-09   | 10.22            | 8.96              |
| 85    | 0.25 | 0.34 | 265.09      | 1.34E-08   | 9.41             | 8.40              |
| 86    | 0.26 | 0.45 | 239.11      | 1.07E-09   | 10.59            | 9.17              |
| 87    | 0.28 | 0.39 | 206.98      | 1.68E-09   | 10.06            | 8.81              |
| 88    | 0.18 | 0.35 | 132.48      | 1.61E-09   | 6.33             | 5.44              |
| 89    | 0.18 | 0.26 | 142.83      | 1.39E-09   | 5.27             | 4.68              |
| 90    | 0.17 | 0.35 | 193.85      | 1.97E-09   | 8.75             | 7.51              |
| 92    | 0.18 | 0.32 | 171.11      | 1.23E-08   | 7.44             | 6.49              |

Tablo 6.4.  $\phi=60^\circ$  Çatlak İlerleme Hızı ve Gerilme Şiddet Faktörleri

| NU.NO | a/c  | a/t  | St<br>(MPa) | v<br>(m/s) | KI.NR<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) | KI.NHK<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) |
|-------|------|------|-------------|------------|----------------------------|-----------------------------|
| 5     | 0.25 | 0.30 | 202.44      | 1.10E-09   | 8.71                       | 7.87                        |
| 8     | 0.27 | 0.30 | 215.84      | 1.38E-09   | 9.27                       | 8.43                        |
| 10    | 0.20 | 0.27 | 192.85      | 1.19E-09   | 8.09                       | 7.35                        |
| 22    | 0.34 | 0.48 | 166.79      | 5.36E-09   | 9.36                       | 8.35                        |
| 24    | 0.27 | 0.40 | 143.26      | 8.49E-10   | 7.70                       | 6.75                        |
| 25    | 0.28 | 0.36 | 173.1       | 1.99E-09   | 8.49                       | 7.55                        |
| 26    | 0.22 | 0.32 | 260.86      | 1.33E-09   | 11.93                      | 10.78                       |
| 27    | 0.24 | 0.40 | 160.94      | 9.28E-10   | 8.08                       | 7.07                        |
| 28    | 0.23 | 0.29 | 166.39      | 1.50E-09   | 7.34                       | 6.63                        |
| 30    | 0.23 | 0.31 | 106.26      | 7.64E-10   | 5.70                       | 5.05                        |
| 32    | 0.38 | 0.57 | 164.24      | 2.38E-09   | 10.14                      | 9.37                        |
| 33    | 0.24 | 0.29 | 133.41      | 1.20E-09   | 6.46                       | 5.78                        |
| 34    | 0.22 | 0.44 | 108.27      | 1.85E-09   | 6.46                       | 5.46                        |
| 35    | 0.22 | 0.39 | 124.61      | 1.09E-09   | 6.65                       | 5.75                        |
| 36    | 0.26 | 0.46 | 126.64      | 1.42E-09   | 7.46                       | 6.42                        |
| 38    | 0.26 | 0.29 | 281.77      | 5.35E-09   | 11.90                      | 10.97                       |
| 39    | 0.25 | 0.28 | 254.14      | 4.75E-09   | 10.77                      | 9.88                        |
| 40    | 0.25 | 0.27 | 282.79      | 1.38E-09   | 11.47                      | 10.66                       |
| 41    | 0.23 | 0.24 | 271.96      | 2.24E-09   | 10.60                      | 9.86                        |
| 42    | 0.26 | 0.33 | 180.95      | 2.71E-09   | 9.88                       | 8.61                        |
| 44    | 0.26 | 0.40 | 210.37      | 1.29E-09   | 11.08                      | 9.81                        |
| 45    | 0.29 | 0.40 | 209.63      | 3.93E-09   | 11.08                      | 9.54                        |
| 47    | 0.20 | 0.26 | 242.22      | 5.17E-09   | 9.96                       | 9.16                        |
| 48    | 0.32 | 0.41 | 260.67      | 3.67E-09   | 13.31                      | 12.00                       |
| 49    | 0.20 | 0.30 | 246.2       | 7.96E-09   | 10.50                      | 9.56                        |
| 50    | 0.19 | 0.22 | 263.32      | 2.23E-09   | 9.91                       | 9.28                        |
| 51    | 0.19 | 0.33 | 192.74      | 3.61E-09   | 9.02                       | 7.99                        |
| 53    | 0.23 | 0.51 | 217.58      | 3.91E-09   | 14.62                      | 12.47                       |
| 54    | 0.27 | 0.59 | 196.98      | 3.08E-09   | 15.02                      | 12.95                       |
| 55    | 0.26 | 0.60 | 184.77      | 1.98E-09   | 14.50                      | 12.40                       |
| 56    | 0.17 | 0.42 | 193.62      | 1.79E-09   | 11.49                      | 9.63                        |
| 57    | 0.16 | 0.31 | 212.05      | 2.40E-09   | 10.05                      | 8.89                        |
| 58    | 0.13 | 0.28 | 189.17      | 1.48E-09   | 8.61                       | 7.66                        |
| 60    | 0.10 | 0.20 | 163.59      | 1.45E-09   | 6.24                       | 5.75                        |
| 61    | 0.14 | 0.29 | 192.27      | 1.80E-09   | 9.05                       | 8.01                        |
| 62    | 0.18 | 0.39 | 151.22      | 1.53E-09   | 8.80                       | 7.45                        |
| 63    | 0.13 | 0.24 | 239.82      | 2.50E+01   | 9.82                       | 9.02                        |
| 65    | 0.14 | 0.28 | 232.68      | 1.87E-09   | 10.80                      | 6.66                        |
| 66    | 0.18 | 0.35 | 183.49      | 1.90E-09   | 9.61                       | 8.36                        |
| 67    | 0.22 | 0.45 | 178.14      | 3.32E-09   | 10.85                      | 9.25                        |
| 68    | 0.16 | 0.23 | 287.64      | 1.21E-08   | 10.96                      | 10.29                       |

| NU.NO | a/c  | a/t  | St<br>(MPa) | v<br>(m/s) | KI.NR<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) | KI.NHK<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) |
|-------|------|------|-------------|------------|----------------------------|-----------------------------|
| 70    | 0.18 | 0.51 | 154.17      | 8.00E-09   | 10.28                      | 8.34                        |
| 71    | 0.19 | 0.31 | 204.15      | 5.09E-09   | 9.99                       | 8.89                        |
| 72    | 0.21 | 0.31 | 293.35      | 4.86E-09   | 13.11                      | 11.99                       |
| 73    | 0.24 | 0.38 | 268.23      | 4.39E-09   | 13.56                      | 12.16                       |
| 74    | 0.13 | 0.24 | 167.51      | 1.58E-09   | 6.86                       | 6.23                        |
| 75    | 0.20 | 0.38 | 171.78      | 1.32E-09   | 9.22                       | 7.96                        |
| 76    | 0.29 | 0.52 | 156.19      | 2.46E-09   | 10.53                      | 9.15                        |
| 77    | 0.18 | 0.34 | 176.08      | 1.36E-09   | 8.61                       | 7.55                        |
| 78    | 0.16 | 0.28 | 165.69      | 1.06E-09   | 7.82                       | 6.96                        |
| 79    | 0.23 | 0.33 | 202.55      | 4.60E-09   | 9.51                       | 8.48                        |
| 80    | 0.20 | 0.31 | 195.55      | 1.33E-09   | 8.93                       | 7.97                        |
| 81    | 0.20 | 0.32 | 211.54      | 2.03E-09   | 9.63                       | 8.60                        |
| 82    | 0.18 | 0.34 | 131.19      | 1.83E-09   | 6.69                       | 5.77                        |
| 84    | 0.32 | 0.52 | 172.14      | 1.29E-09   | 10.99                      | 9.76                        |
| 85    | 0.25 | 0.34 | 265.09      | 1.34E-08   | 10.22                      | 9.20                        |
| 86    | 0.26 | 0.45 | 239.11      | 1.07E-09   | 11.46                      | 10.04                       |
| 87    | 0.28 | 0.39 | 206.98      | 1.68E-09   | 10.89                      | 9.64                        |
| 88    | 0.18 | 0.35 | 132.48      | 1.38E-09   | 6.90                       | 5.99                        |
| 89    | 0.18 | 0.26 | 142.83      | 1.26E-09   | 5.76                       | 5.16                        |
| 90    | 0.17 | 0.35 | 193.85      | 1.69E-09   | 9.54                       | 8.28                        |

Tablo 6.5.  $\phi=75^\circ$  Çatlak İlerleme Hızı ve Gerilme Şiddet Faktörleri

| NU.NO | a/c  | a/t  | St<br>(MPa) | v<br>(m/s) | KI.NR<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) | KI.NHK<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) |
|-------|------|------|-------------|------------|----------------------------|-----------------------------|
| 5     | 0.25 | 0.30 | 202.44      | 1.38E-09   | 9.14                       | 8.27                        |
| 8     | 0.27 | 0.30 | 215.84      | 1.38E-09   | 9.72                       | 8.87                        |
| 10    | 0.20 | 0.27 | 192.85      | 1.19E-09   | 8.50                       | 7.75                        |
| 22    | 0.34 | 0.48 | 166.79      | 5.36E-09   | 9.78                       | 8.75                        |
| 24    | 0.27 | 0.40 | 143.26      | 8.49E-10   | 8.07                       | 7.09                        |
| 25    | 0.28 | 0.36 | 173.10      | 1.99E-09   | 8.90                       | 7.94                        |
| 26    | 0.22 | 0.32 | 260.86      | 1.33E-09   | 12.53                      | 11.35                       |
| 27    | 0.24 | 0.40 | 160.94      | 9.28E-10   | 8.48                       | 7.44                        |
| 28    | 0.23 | 0.29 | 166.39      | 1.50E-09   | 7.70                       | 6.98                        |
| 30    | 0.23 | 0.31 | 106.26      | 7.64E-10   | 5.99                       | 5.32                        |
| 32    | 0.38 | 0.57 | 164.24      | 3.06E-09   | 10.57                      | 9.80                        |
| 33    | 0.24 | 0.29 | 133.41      | 1.09E-09   | 6.78                       | 6.08                        |
| 34    | 0.22 | 0.44 | 108.27      | 1.73E-09   | 6.78                       | 5.74                        |
| 35    | 0.22 | 0.39 | 124.61      | 1.09E-09   | 6.98                       | 6.05                        |
| 36    | 0.26 | 0.46 | 126.64      | 1.53E-09   | 7.82                       | 6.75                        |
| 38    | 0.26 | 0.29 | 281.77      | 5.50E-09   | 12.48                      | 11.53                       |
| 39    | 0.25 | 0.28 | 254.14      | 4.75E-09   | 11.31                      | 10.39                       |
| 40    | 0.25 | 0.27 | 282.79      | 1.38E-09   | 12.04                      | 11.21                       |
| 41    | 0.23 | 0.24 | 271.96      | 2.56E-09   | 11.14                      | 10.38                       |
| 42    | 0.26 | 0.33 | 180.95      | 2.71E-09   | 10.36                      | 9.06                        |
| 44    | 0.26 | 0.40 | 210.37      | 1.30E-09   | 11.62                      | 10.32                       |
| 45    | 0.29 | 0.40 | 209.63      | 3.63E-09   | 11.62                      | 10.02                       |
| 47    | 0.20 | 0.26 | 242.22      | 5.74E-09   | 10.47                      | 9.65                        |
| 48    | 0.32 | 0.41 | 260.67      | 3.67E-09   | 13.93                      | 12.59                       |
| 49    | 0.20 | 0.30 | 246.20      | 7.96E-09   | 11.03                      | 10.07                       |
| 50    | 0.19 | 0.22 | 263.32      | 2.23E-09   | 10.43                      | 9.78                        |
| 51    | 0.19 | 0.33 | 192.74      | 3.61E-09   | 9.48                       | 8.42                        |
| 53    | 0.23 | 0.51 | 217.58      | 3.91E-09   | 15.33                      | 13.13                       |
| 54    | 0.27 | 0.59 | 196.98      | 2.98E-09   | 15.73                      | 13.62                       |
| 55    | 0.26 | 0.60 | 184.77      | 1.88E-09   | 15.19                      | 13.04                       |
| 56    | 0.17 | 0.42 | 193.62      | 1.79E-09   | 12.07                      | 10.15                       |
| 57    | 0.16 | 0.31 | 212.05      | 2.40E-09   | 10.58                      | 9.38                        |
| 58    | 0.13 | 0.28 | 189.17      | 1.48E-09   | 9.06                       | 8.08                        |
| 60    | 0.10 | 0.20 | 163.59      | 1.45E-09   | 6.57                       | 6.07                        |
| 61    | 0.14 | 0.29 | 192.27      | 1.80E-09   | 9.52                       | 8.45                        |
| 62    | 0.18 | 0.39 | 151.22      | 1.53E-09   | 9.25                       | 7.85                        |
| 63    | 0.13 | 0.24 | 239.82      | 2.50E+01   | 10.34                      | 9.52                        |
| 65    | 0.14 | 0.28 | 232.68      | 1.87E-09   | 11.37                      | 7.03                        |
| 66    | 0.18 | 0.35 | 183.49      | 1.77E-09   | 10.11                      | 8.81                        |
| 67    | 0.22 | 0.45 | 178.14      | 3.32E-09   | 11.40                      | 9.73                        |
| 68    | 0.16 | 0.23 | 287.64      | 1.21E-08   | 11.53                      | 10.85                       |

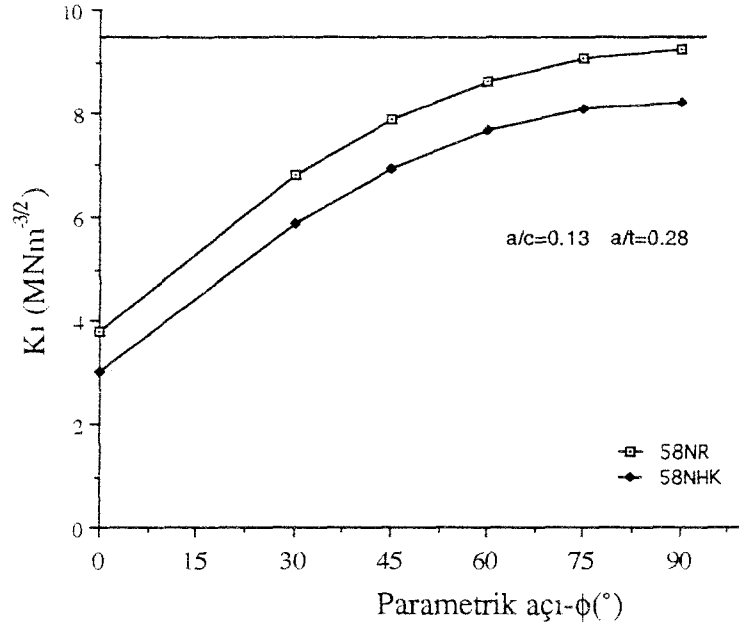


| NU.NO | a/c  | a/t  | St<br>(MPa) | v<br>(m/s) | KI.NR<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) | KI.NHK<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) |
|-------|------|------|-------------|------------|----------------------------|-----------------------------|
| 70    | 0.18 | 0.51 | 154.17      | 8.28E-09   | 10.80                      | 8.79                        |
| 71    | 0.19 | 0.31 | 204.15      | 5.09E-09   | 10.50                      | 9.37                        |
| 72    | 0.21 | 0.31 | 293.35      | 4.86E-09   | 13.77                      | 12.63                       |
| 73    | 0.24 | 0.38 | 268.23      | 4.51E-09   | 14.23                      | 12.80                       |
| 74    | 0.13 | 0.24 | 167.51      | 1.58E-09   | 7.22                       | 6.57                        |
| 75    | 0.20 | 0.38 | 171.78      | 1.32E-09   | 9.69                       | 8.39                        |
| 76    | 0.29 | 0.52 | 156.19      | 2.46E-09   | 11.03                      | 9.61                        |
| 77    | 0.18 | 0.34 | 176.08      | 1.36E-09   | 9.06                       | 7.96                        |
| 78    | 0.16 | 0.28 | 165.69      | 1.22E-09   | 8.23                       | 7.34                        |
| 79    | 0.23 | 0.33 | 202.55      | 4.60E-09   | 9.98                       | 8.93                        |
| 80    | 0.20 | 0.31 | 195.55      | 1.33E-09   | 9.39                       | 8.39                        |
| 81    | 0.20 | 0.32 | 211.54      | 1.74E-09   | 10.12                      | 9.06                        |
| 82    | 0.18 | 0.34 | 131.19      | 1.83E-09   | 7.03                       | 6.08                        |
| 84    | 0.32 | 0.52 | 172.14      | 1.41E-09   | 11.49                      | 10.24                       |
| 85    | 0.25 | 0.34 | 265.09      | 1.22E-08   | 10.72                      | 9.68                        |
| 86    | 0.26 | 0.45 | 239.11      | 1.07E-09   | 12.01                      | 10.56                       |
| 87    | 0.28 | 0.39 | 206.98      | 1.51E-09   | 11.41                      | 10.13                       |
| 88    | 0.18 | 0.35 | 132.48      | 1.15E-09   | 7.25                       | 6.31                        |
| 89    | 0.18 | 0.26 | 142.83      | 1.64E-09   | 6.05                       | 5.44                        |
| 90    | 0.17 | 0.35 | 193.85      | 1.69E-09   | 10.03                      | 8.73                        |
| 92    | 0.18 | 0.32 | 171.11      | 1.10E-08   | 8.53                       | 7.53                        |

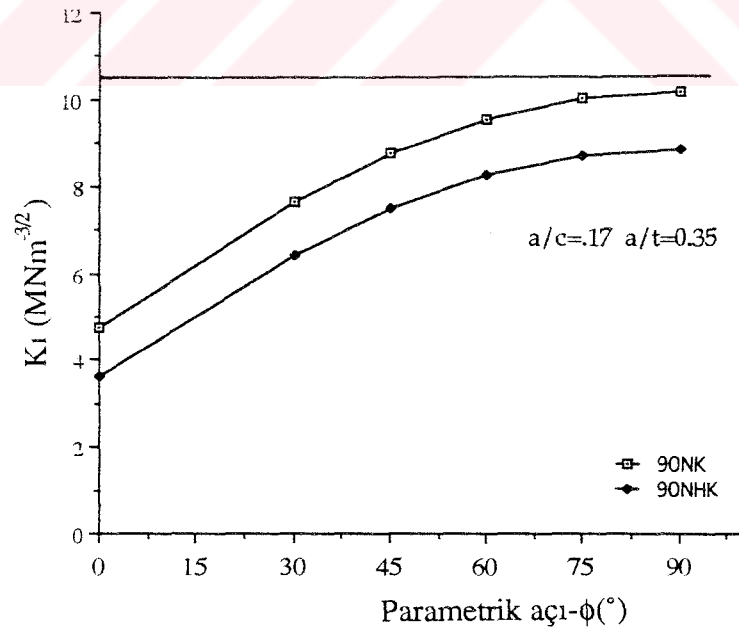
Tablo 6.6.  $\phi=90^\circ$  Çatlak İlerleme Hızı ve Gerilme Şiddet Faktörleri

| NU.NO | a/c  | a/t  | St<br>(MPa) | v<br>(m/s) | KI.NR<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) | KI.NHK<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) | KI.SEN<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) |
|-------|------|------|-------------|------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 5     | 0.25 | 0.30 | 202.44      | 2.34E-09   | 9.29                       | 8.41                        | --                          |
| 8     | 0.27 | 0.30 | 215.84      | 1.93E-09   | 9.87                       | 9.01                        | --                          |
| 10    | 0.20 | 0.27 | 192.85      | 1.19E-09   | 8.65                       | 7.87                        | --                          |
| 22    | 0.34 | 0.48 | 166.79      | 6.89E-09   | 9.93                       | 8.89                        | --                          |
| 24    | 0.27 | 0.40 | 143.26      | 1.02E-09   | 8.20                       | 7.21                        | --                          |
| 25    | 0.28 | 0.36 | 173.10      | 2.33E-09   | 9.04                       | 8.07                        | --                          |
| 26    | 0.22 | 0.32 | 260.86      | 9.97E-10   | 12.73                      | 11.54                       | --                          |
| 27    | 0.24 | 0.40 | 160.94      | 1.11E-09   | 8.62                       | 7.57                        | --                          |
| 28    | 0.23 | 0.29 | 166.39      | 1.50E-09   | 7.83                       | 7.09                        | --                          |
| 30    | 0.23 | 0.31 | 106.26      | 5.46E-10   | 6.08                       | 5.41                        | --                          |
| 32    | 0.38 | 0.57 | 164.24      | 3.06E-09   | 10.73                      | 9.95                        | --                          |
| 33    | 0.24 | 0.29 | 133.41      | 1.31E-09   | 6.89                       | 6.18                        | --                          |
| 34    | 0.22 | 0.44 | 108.27      | 1.48E-09   | 6.90                       | 5.84                        | --                          |
| 35    | 0.22 | 0.39 | 124.61      | 8.73E-10   | 7.10                       | 6.15                        | --                          |
| 36    | 0.26 | 0.46 | 126.64      | 1.53E-09   | 7.94                       | 6.86                        | --                          |
| 38    | 0.26 | 0.29 | 281.77      | 5.21E-09   | 12.68                      | 11.72                       | --                          |
| 39    | 0.25 | 0.28 | 254.14      | 4.15E-09   | 11.49                      | 10.56                       | --                          |
| 40    | 0.25 | 0.27 | 282.79      | 1.72E-09   | 12.23                      | 11.39                       | --                          |
| 41    | 0.23 | 0.24 | 271.96      | 2.24E-09   | 11.32                      | 10.55                       | --                          |
| 42    | 0.26 | 0.33 | 180.95      | 2.71E-09   | 10.53                      | 9.20                        | --                          |
| 44    | 0.26 | 0.40 | 210.37      | 1.56E-09   | 11.81                      | 10.48                       | --                          |
| 45    | 0.29 | 0.40 | 209.63      | 1.12E-08   | 11.81                      | 10.18                       | --                          |
| 47    | 0.20 | 0.26 | 242.22      | 2.30E-09   | 10.64                      | 9.82                        | --                          |
| 48    | 0.32 | 0.41 | 260.67      | 4.77E-09   | 14.14                      | 12.79                       | --                          |
| 49    | 0.20 | 0.30 | 246.20      | 6.90E-09   | 11.22                      | 10.24                       | --                          |
| 50    | 0.19 | 0.22 | 263.32      | 5.69E-09   | 10.60                      | 9.94                        | 11.70                       |
| 51    | 0.19 | 0.33 | 192.74      | 4.33E-09   | 9.64                       | 8.56                        | 10.26                       |
| 53    | 0.23 | 0.51 | 217.58      | 4.47E-09   | 15.58                      | 13.34                       | --                          |
| 54    | 0.27 | 0.59 | 196.98      | 2.38E-09   | 15.98                      | 13.84                       | --                          |
| 55    | 0.26 | 0.60 | 184.77      | 2.98E-09   | 15.44                      | 13.25                       | --                          |
| 56    | 0.17 | 0.42 | 193.62      | 2.98E-09   | 12.28                      | 10.32                       | 12.25                       |
| 57    | 0.16 | 0.31 | 212.05      | 2.58E-09   | 10.76                      | 9.54                        | 10.94                       |
| 58    | 0.13 | 0.28 | 189.17      | 1.97E-09   | 9.22                       | 8.22                        | 9.53                        |
| 60    | 0.10 | 0.20 | 163.59      | 1.86E-09   | 6.69                       | 6.18                        | 6.54                        |
| 61    | 0.14 | 0.29 | 192.27      | 2.16E-09   | 9.68                       | 8.60                        | 9.83                        |
| 62    | 0.18 | 0.39 | 151.22      | 1.84E-09   | 9.41                       | 7.98                        | 9.50                        |
| 63    | 0.13 | 0.24 | 239.82      | 1.90E+01   | 10.52                      | 9.68                        | --                          |
| 65    | 0.14 | 0.28 | 232.68      | 1.60E-09   | 11.56                      | 7.15                        | 12.55                       |
| 66    | 0.18 | 0.35 | 183.49      | 1.77E-09   | 10.28                      | 8.96                        | 10.67                       |
| 67    | 0.22 | 0.45 | 178.14      | 3.32E-09   | 11.58                      | 9.90                        | --                          |
| 68    | 0.16 | 0.23 | 287.64      | 1.39E-08   | 11.72                      | 11.04                       | --                          |

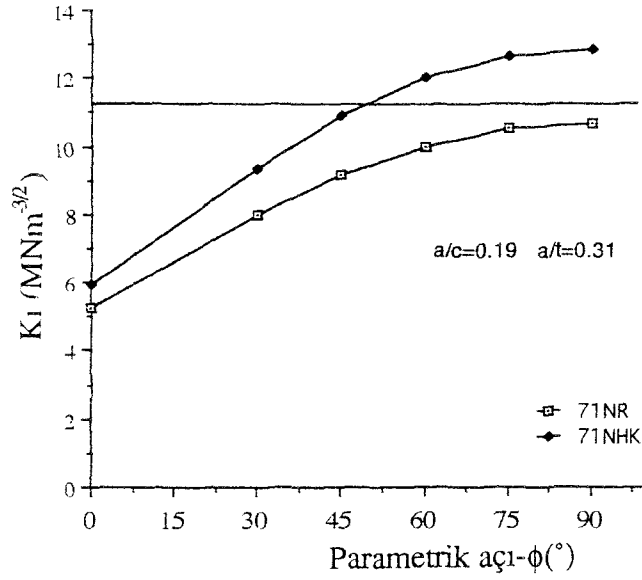
| NU.NO | a/c  | a/t  | St<br>(MPa) | v<br>(m/s) | KI.NR<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) | KI.NHK<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) | KI.SEN<br>(Mpa $\sqrt{m}$ ) |
|-------|------|------|-------------|------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 70    | 0.18 | 0.51 | 154.17      | 7.43E-09   | 10.98                      | 8.93                        | 10.98                       |
| 71    | 0.19 | 0.31 | 204.15      | 7.12E-09   | 10.68                      | 9.53                        | 11.31                       |
| 72    | 0.21 | 0.31 | 293.35      | 2.70E-09   | 14.00                      | 12.84                       | --                          |
| 73    | 0.24 | 0.38 | 268.23      | 4.88E-09   | 14.46                      | 13.01                       | --                          |
| 74    | 0.13 | 0.24 | 167.51      | 1.81E-09   | 7.35                       | 6.68                        | 8.64                        |
| 75    | 0.20 | 0.38 | 171.78      | 4.72E-10   | 9.85                       | 8.53                        | --                          |
| 76    | 0.29 | 0.52 | 156.19      | 2.65E-09   | 11.20                      | 9.77                        | --                          |
| 77    | 0.18 | 0.34 | 176.08      | 1.94E-09   | 9.21                       | 8.09                        | 9.64                        |
| 78    | 0.16 | 0.28 | 165.69      | 8.17E-10   | 8.37                       | 7.46                        | --                          |
| 79    | 0.23 | 0.33 | 202.55      | 3.29E-09   | 10.15                      | 9.07                        | --                          |
| 80    | 0.20 | 0.31 | 195.55      | 1.43E-09   | 9.55                       | 8.53                        | --                          |
| 81    | 0.20 | 0.32 | 211.54      | 2.03E-09   | 10.29                      | 9.21                        | --                          |
| 82    | 0.18 | 0.34 | 131.19      | 6.09E-10   | 7.15                       | 6.19                        | 7.43                        |
| 84    | 0.32 | 0.52 | 172.14      | 2.35E-09   | 11.66                      | 10.40                       | --                          |
| 85    | 0.25 | 0.34 | 265.09      | 1.10E-08   | 10.89                      | 9.83                        | --                          |
| 86    | 0.26 | 0.45 | 239.11      | 1.72E-09   | 12.21                      | 10.73                       | --                          |
| 87    | 0.28 | 0.39 | 206.98      | 3.03E-09   | 11.60                      | 10.29                       | --                          |
| 88    | 0.18 | 0.35 | 132.48      | 1.84E-09   | 7.37                       | 6.41                        | 7.76                        |
| 89    | 0.18 | 0.26 | 142.83      | 5.04E-10   | 6.16                       | 5.53                        | --                          |
| 90    | 0.17 | 0.35 | 193.85      | 1.12E-09   | 10.20                      | 8.87                        | 10.49                       |
| 92    | 0.18 | 0.32 | 171.11      | 5.34E-09   | 8.67                       | 7.66                        | --                          |



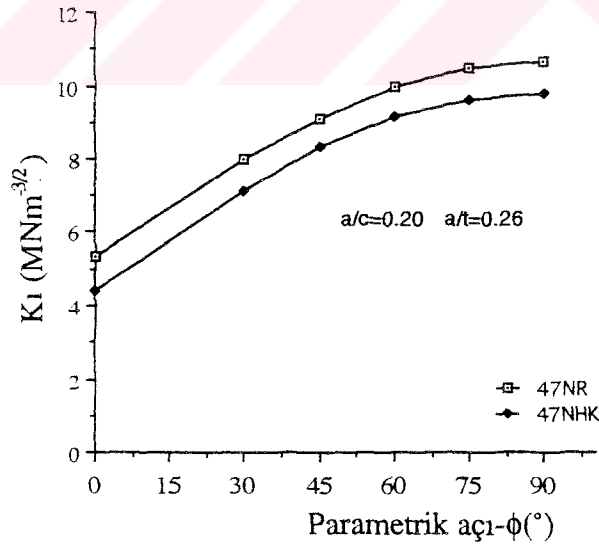
Şekil 6.1. 58 no.lu Numuneye Ait Gerilme Şiddet Faktörünün Parametrik Açıya Bağlı Değişimi



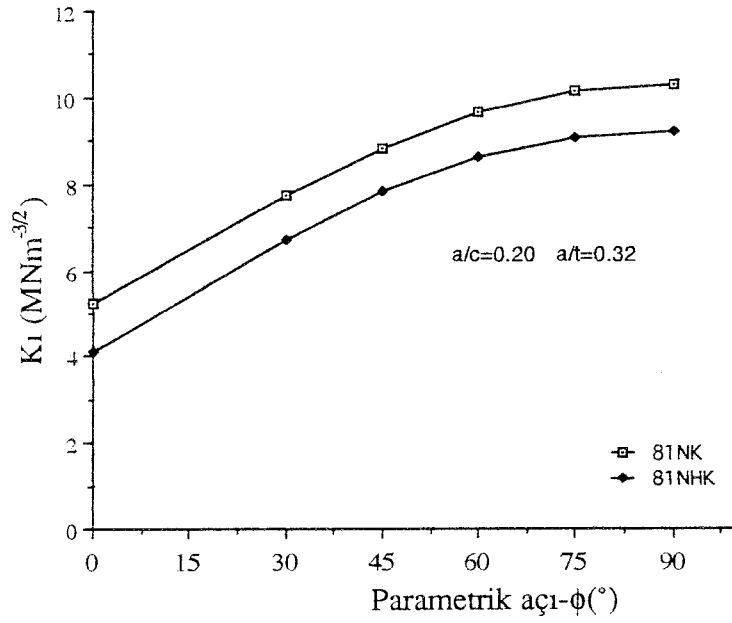
Şekil 6.2. 90 no.lu Numuneye Ait Gerilme Şiddet Faktörünün Parametrik Açıya Bağlı Değişimi



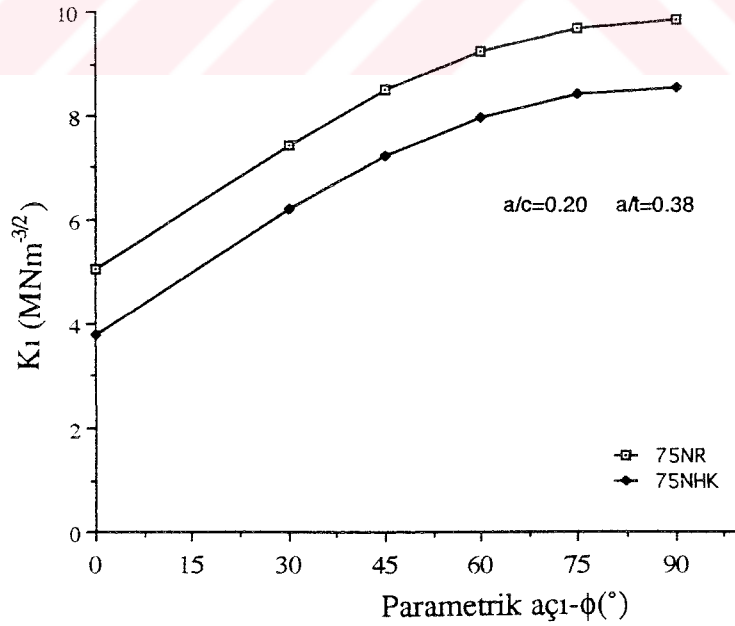
Şekil 6.3. 71 no.lu Numuneye Ait Gerilme Şiddet Faktörünün Parametrik Açıya Bağlı Değişimi



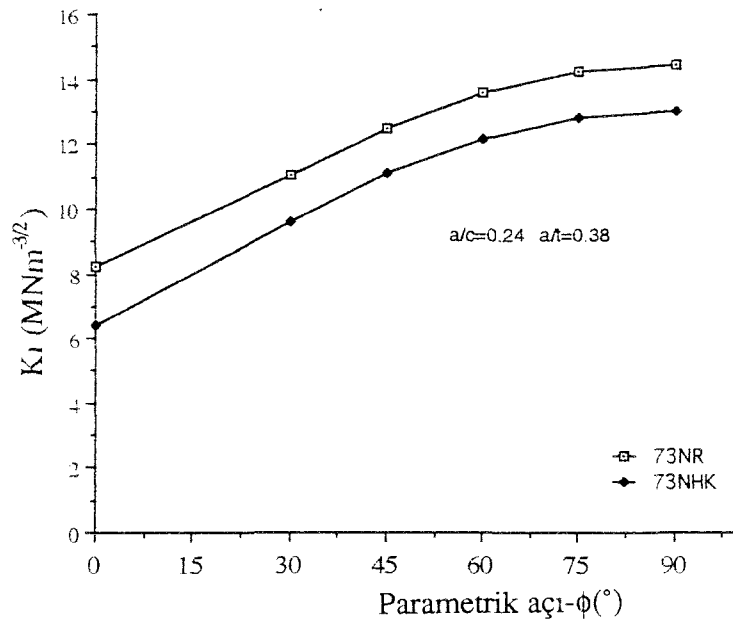
Şekil 6.4. 47 no.lu Numuneye Ait Gerilme Şiddet Faktörünün Parametrik Açıya Bağlı Değişimi



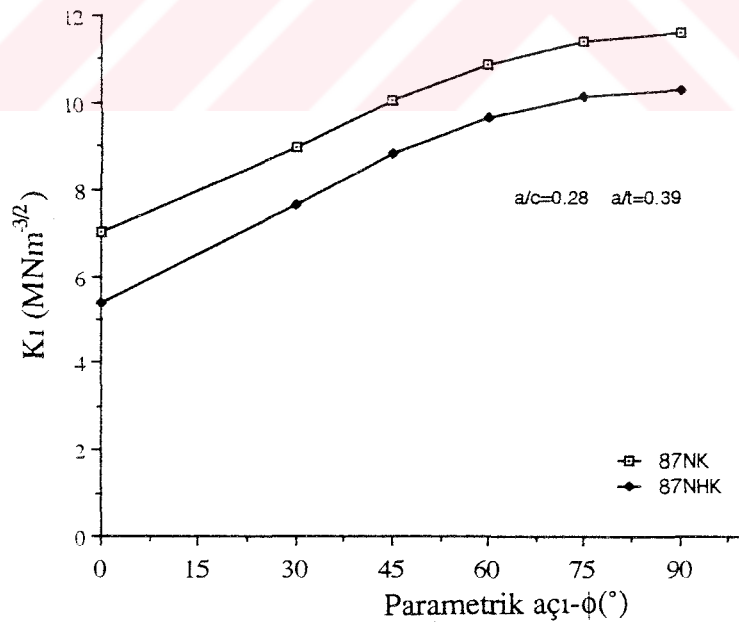
Şekil 6.5. 81 no.lu Numuneye Ait Gerilme Şiddet Faktörünün Parametrik Açıya Bağlı Değişimi



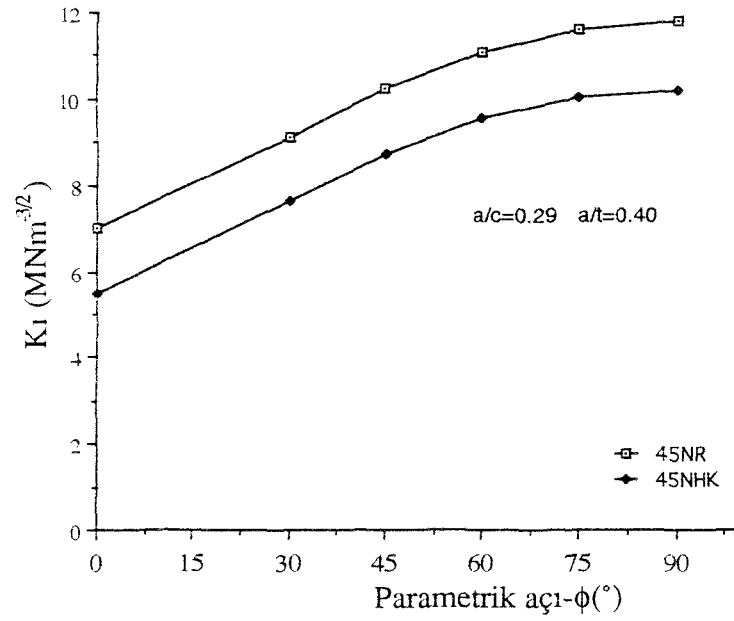
Şekil 6.6. 75 no.lu Numuneye Ait Gerilme Şiddet Faktörünün Parametrik Açıya Bağlı Değişimi



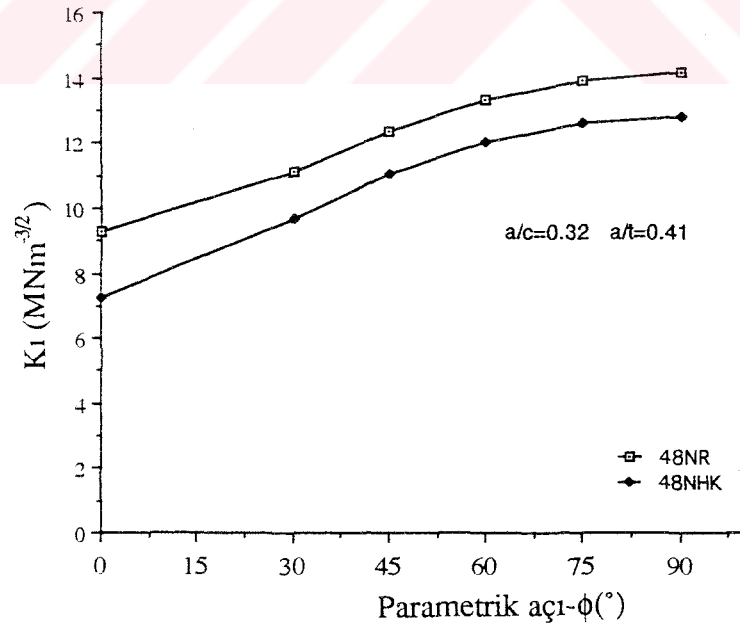
Şekil 6.7. 73 no.lu Numuneye Ait Gerilme Şiddet Faktörünün Parametrik Açığa Bağlı Değişimi



Şekil 6.8. 87 no.lu Numuneye Ait Gerilme Şiddet Faktörünün Parametrik Açığa Bağlı Değişimi

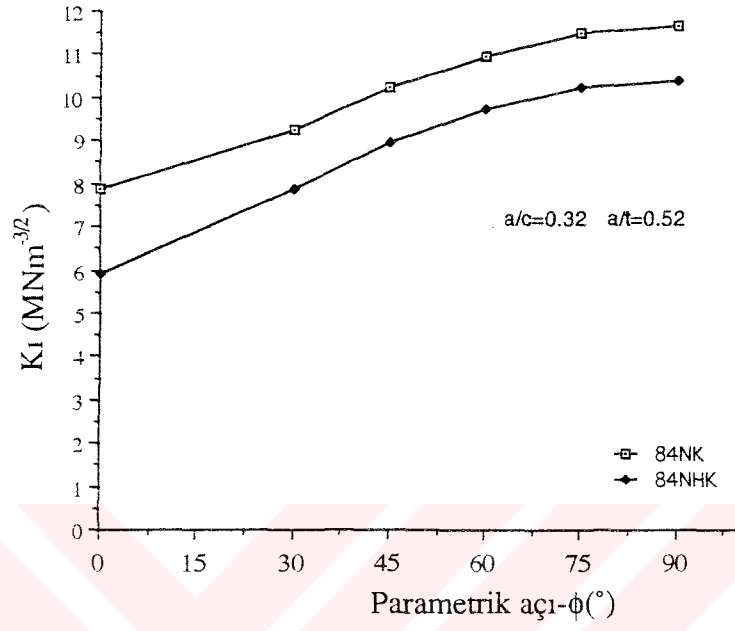


Şekil 6.9. 45 no.lu Numuneye Ait Gerilme Şiddet Faktörünün Parametrik Açıya Bağlı Değişimi



Şekil 6.10. 48 no.lu Numuneye Ait Gerilme Şiddet Faktörünün Parametrik Açıya Bağlı Değişimi





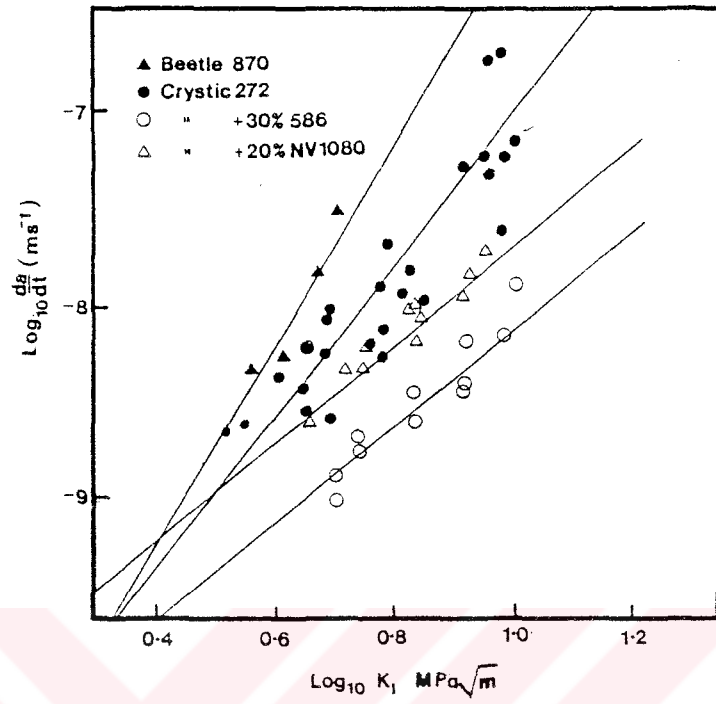
Şekil 6.11. 84 no.lu Numuneye Ait Gerilme Şiddet Faktörünün Parametrik Açıya Bağlı Değişimi

Price ve Hull [78] çalışmalarında dört değişik reçine kullanarak çatlak ilerleme hızına reçinenin etkisini araştırdılar. Deney sonucunda bulunan A, n ve R değerleri tablo 6.7 'de verilmektedir. Şekil 6.12 'de ise bu tabloya ait logo-logK<sub>1</sub> grafiği görülmektedir.

Tablodan görülebileceği gibi gerilmeli korozyona en duyarlı malzeme kimyasal dirençli Beetle 870 reçinedir (n=5.3). en dirençli reçine ise %30 tok reçine karıştırılmış izoftalik reçinedir (n=2.56). Bu değerlere karşılık korelasyon katsayıları 0,80-0,95 arasında değişmektedir.

Tablo 6.7. Price ve Hull [78] 'a göre gerilmeli korozyon malzeme sabitleri

| Matriks                  | Log A  | n    | R    |
|--------------------------|--------|------|------|
| Crystic 272              | -10.94 | 3.99 | 0.80 |
| Crystic 272+%30586       | -10.79 | 2.73 | 0.91 |
| Crystic272+%20NV<br>1080 | -10.26 | 2.56 | 0.90 |
| Beetle 870               | -11.36 | 5.3  | 0.95 |



Şekil 6.12 Reçine türünün GK çatlak ilerleme hızına etkisi

Tablo 6.8 Logv-LogK<sub>I</sub> Grafiklerinden Lineer Korelasyon Analizi İle Elde Edilen Gerilmeli Korozyon Malzeme Sabitleri

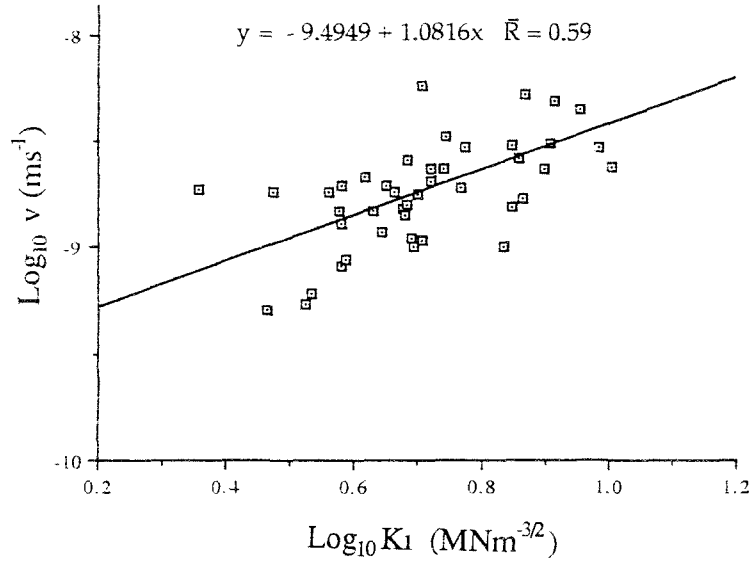
|                   |        | NR     |      | NHK    |      |      |
|-------------------|--------|--------|------|--------|------|------|
| Açı               | LogA   | n      | R    | LogA   | n    | R    |
| 0                 | -9.52  | 1.17   | 0.55 | -9.39  | 1.24 | 0.50 |
| 30                | -10.07 | 1.56   | 0.58 | -9.90  | 1.47 | 0.58 |
| 45                | -10    | 1.39   | 0.54 | -9.90  | 1.37 | 0.54 |
| 60                | -9.97  | 1.32   | 0.53 | -9.89  | 1.31 | 0.53 |
| 75                | -9.98  | 1.30   | 0.52 | -9.90  | 1.30 | 0.52 |
| 90                | -9.93  | 1.27   | 0.52 | -9.86  | 1.26 | 0.52 |
| SEN: Log A= -9.45 |        | n=1.62 |      | R=0.55 |      |      |

Çatlak ilerleme hızı ile gerilme şiddet faktörü arasındaki bağıntının araştırılması amacıyla değişik açılarda ölçülen çatlak ilerleme hızları ve bunlara karşılık gelen gerilme şiddet faktörleri Şekil (6.13-6.25)te logaritmik grafik üzerinde verilmiştir. Ayrıca en küçük kareler metoduyla Newman Raju-NR,Nishioka-NHK,ve tek kenar çatlağı-SEN'e göre A ve n gerilmeli korozyon malzeme sabitlerinin değerleri her bir açığa karşılık elde edilerek tablo (6.8 )ve tablo (6.9) da verilmiştir.Bununla birlikte bu tablolarda, çatlak ilerleme hızı v ile, K<sub>1</sub> arasındaki ilişkinin derecesinin araştırılması amacıyla R-lineer korelasyon katsayısı değerleri de verilmiştir.

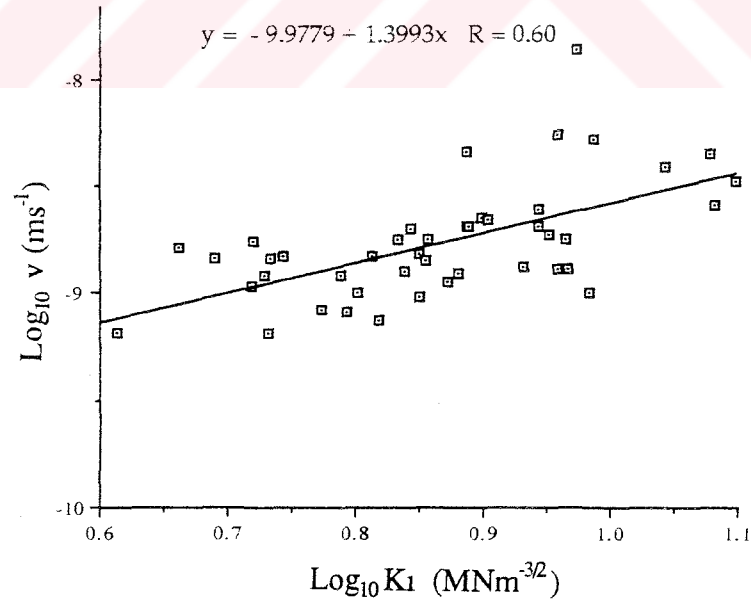
Tablo 6.8 'den görüleceği gibi yüzey çatlağı deneylerinde bulunan korelasyon katsayısı 0,50-0,60 arasındadır ve daha düşük değerler vermektedir.Bu tabloda tüm numuneler değerlendirmeye alınmıştır. Tablo 6.9'da ise, 44 saatten az sürelerde deneye tabi tutulan numuneler değerlendirme dışı bırakılmıştır.Bunun nedenleri aşağıdaki paragraflarda açıklanmıştır.

Tablo 6.9 44 Saatten Daha Az Sürelerde Yapılan Deney Sonuçları Değerlendirme Dışı Bırakıldığında Logv-LogK<sub>1</sub> Grafiklerinden Elde Edilen Gerilmeli Korozyon Malzeme Sabitleri

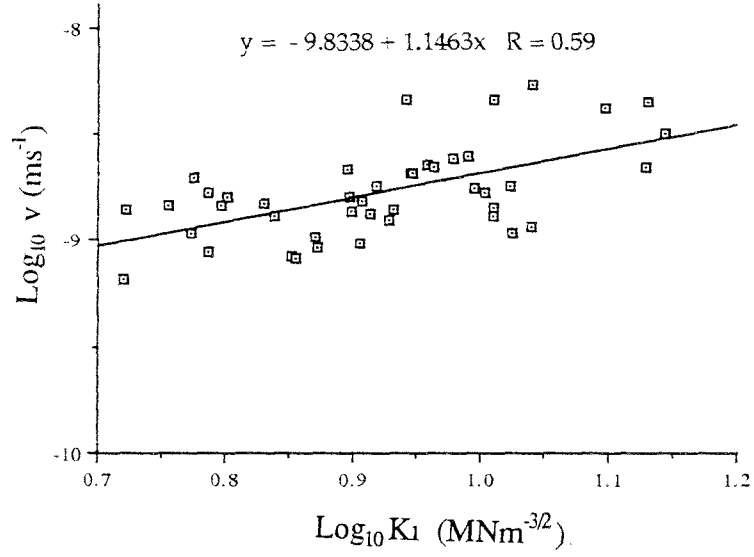
| Açı               | LogA  | NR   |        | NHK    |      |      |
|-------------------|-------|------|--------|--------|------|------|
|                   |       | n    | R      | LogA   | n    | R    |
| 0                 | -9.49 | 1.08 | 0.59   | -9.40  | 1.15 | 0.60 |
| 30                | -9.98 | 1.40 | 0.60   | -9.80  | 1.28 | 0.61 |
| 45                | 9.83  | 1.14 | 0.59   | -9.76  | 1.15 | 0.57 |
| 60                | -9.58 | 1.06 | 0.58   | -9.72  | 1.05 | 0.56 |
| 75                | -9.77 | 1.03 | 0.57   | -9.72  | 1.04 | 0.56 |
| 90                | -9.74 | 1.01 | 0.56   | -9.68  | 1.02 | 0.55 |
| SEN: Log A= -9.94 |       |      | n=1.28 | R=0.46 |      |      |



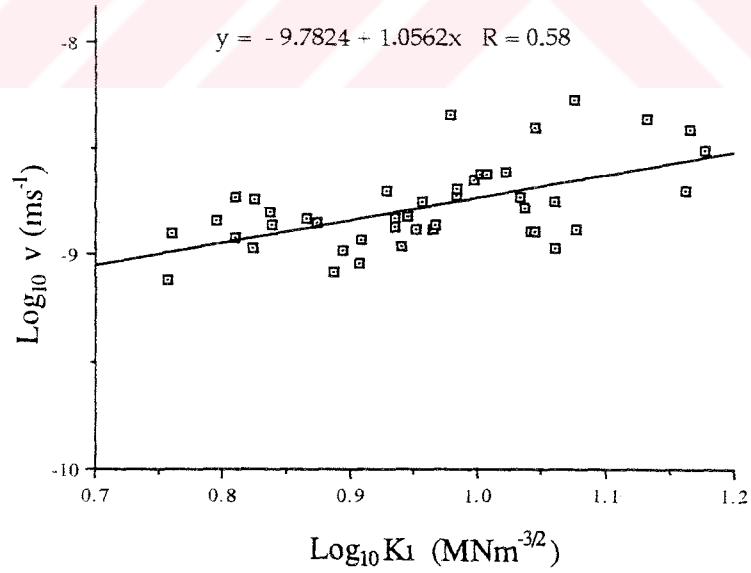
Şekil 6.13. Newman-Raju'ya Göre Hesaplanmış Çatlak Büyüme Hızının GŞF ile Değişimi ( $\phi=0^\circ$ )



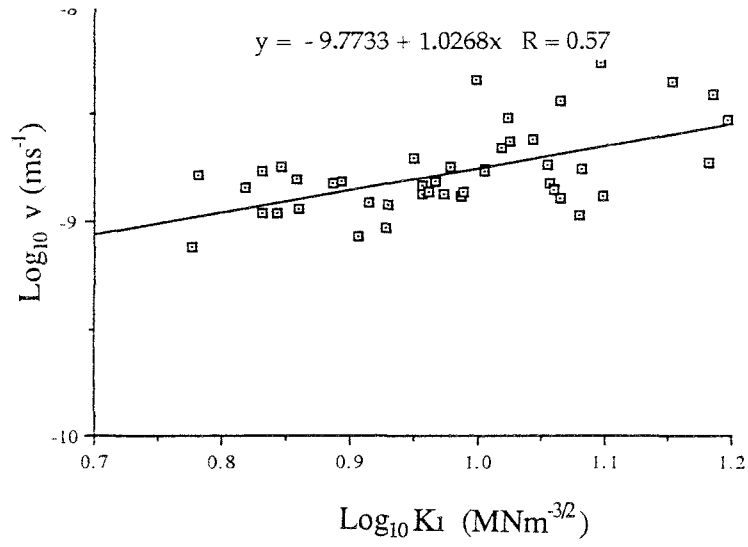
Şekil 6.14. Newman-Raju'ya Göre Hesaplanmış Çatlak Büyüme Hızının GŞF ile Değişimi ( $\phi=30^\circ$ )



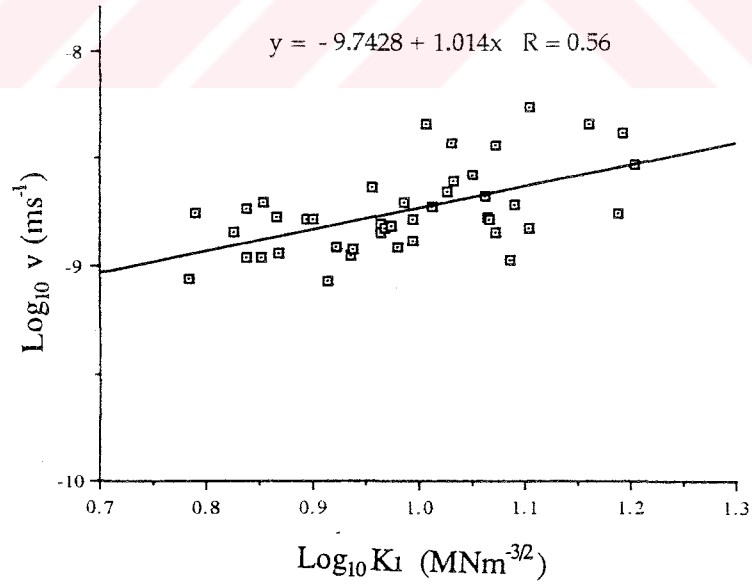
Şekil 6.15. Newman-Raju'ya Göre Hesaplanmış Çatlak Büyüme Hızının GŞF ile Değişimi ( $\phi=45^\circ$ )



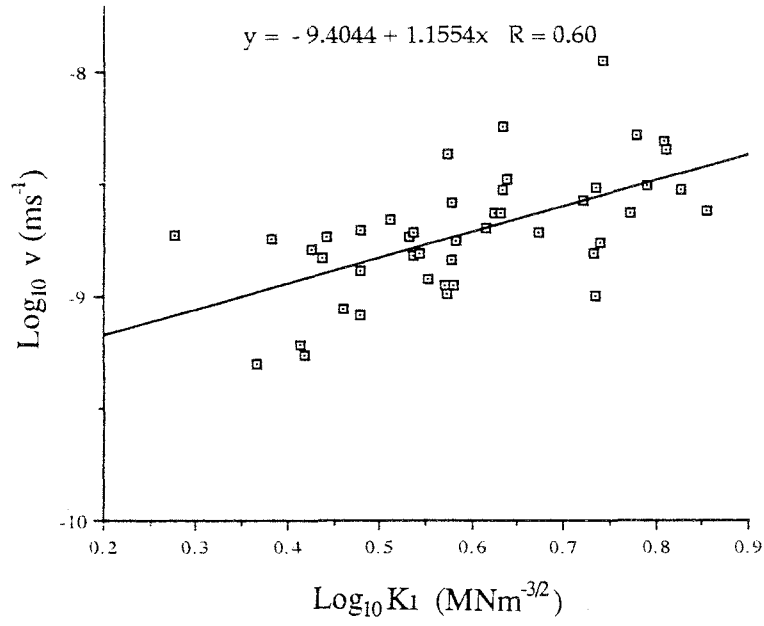
Şekil 6.16. Newman-Raju'ya Göre Hesaplanmış Çatlak Büyüme Hızının GŞF ile Değişimi ( $\phi=60^\circ$ )



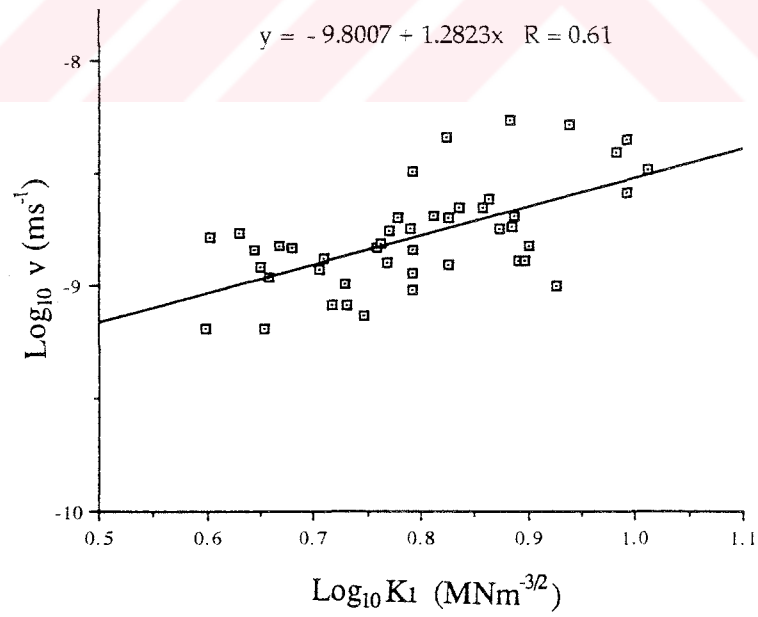
Şekil 6.17. Newman-Raju'ya Göre Hesaplanmış Çatlak Büyüme Hızının GŞF ile Değişimi ( $\phi=75^\circ$ )



Şekil 6.18. Newman-Raju'ya Göre Hesaplanmış Çatlak Büyüme Hızının GŞF ile Değişimi ( $\phi=90^\circ$ )

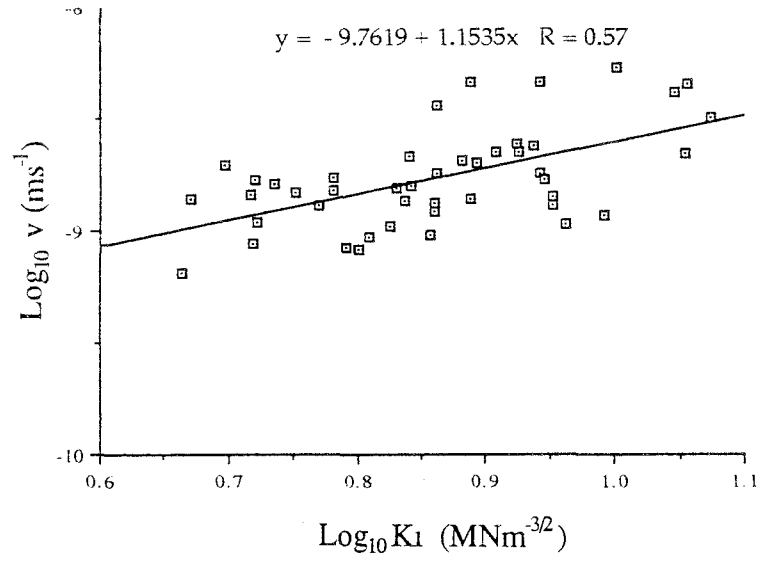


Şekil 6.19.Nishioka'ya Göre Hesaplanmış Çatlak Büyüme Hızının GŞF ile Değişimi ( $\phi=0^\circ$ )

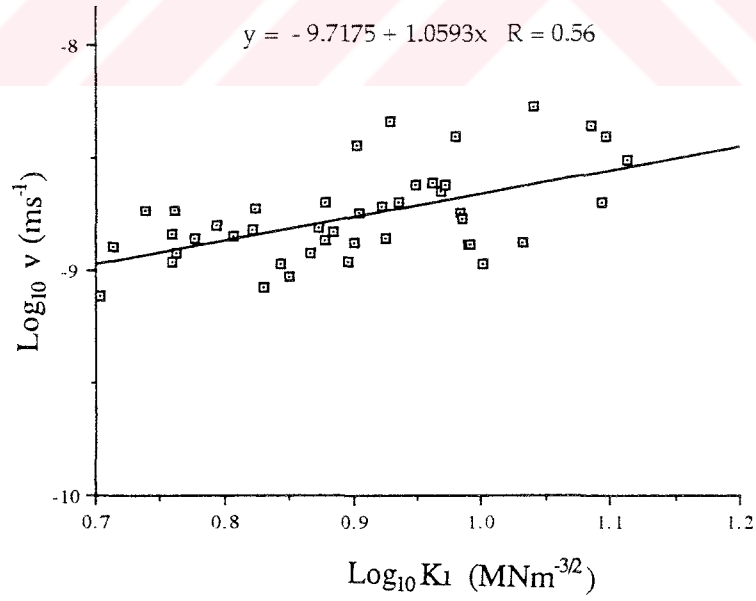


Şekil 6.20.Nishioka'ya Göre Hesaplanmış Çatlak Büyüme Hızının GŞF ile Değişimi ( $\phi=30^\circ$ )

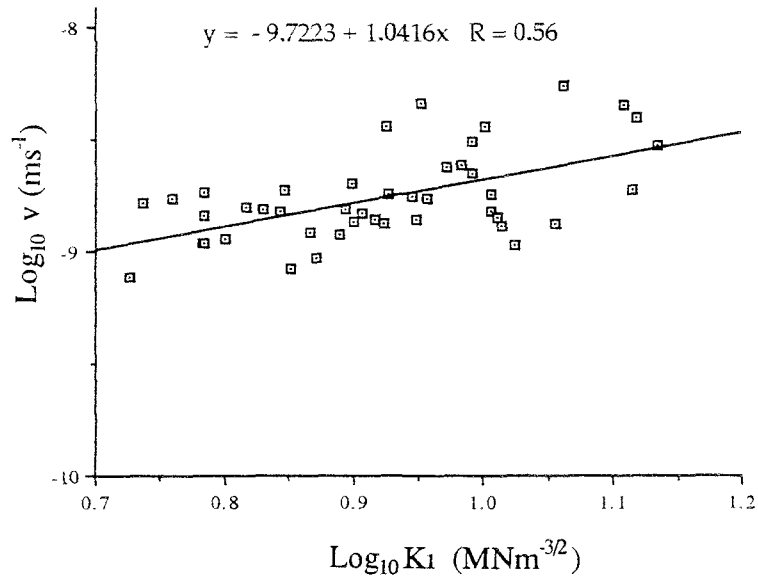




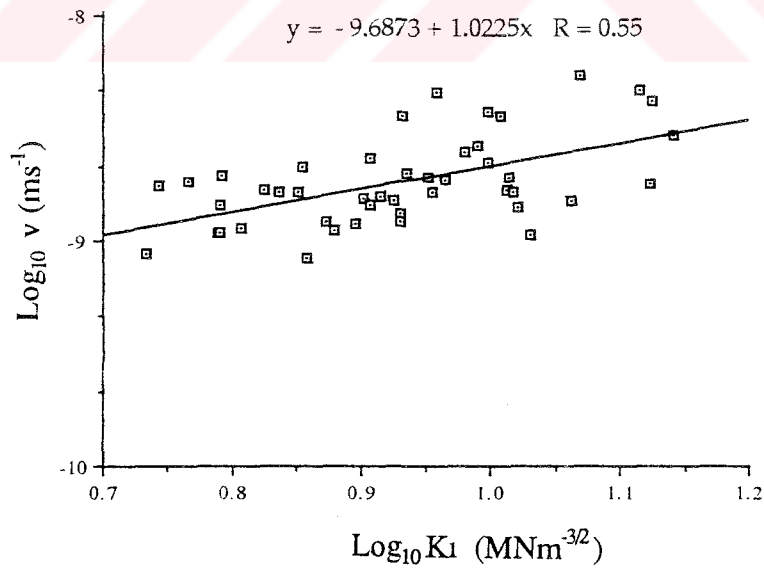
Şekil 6.21.Nishioka'ya Göre Hesaplanmış Çatlak Büyüme Hızının GŞF ile Değişimi ( $\phi=45^\circ$ )



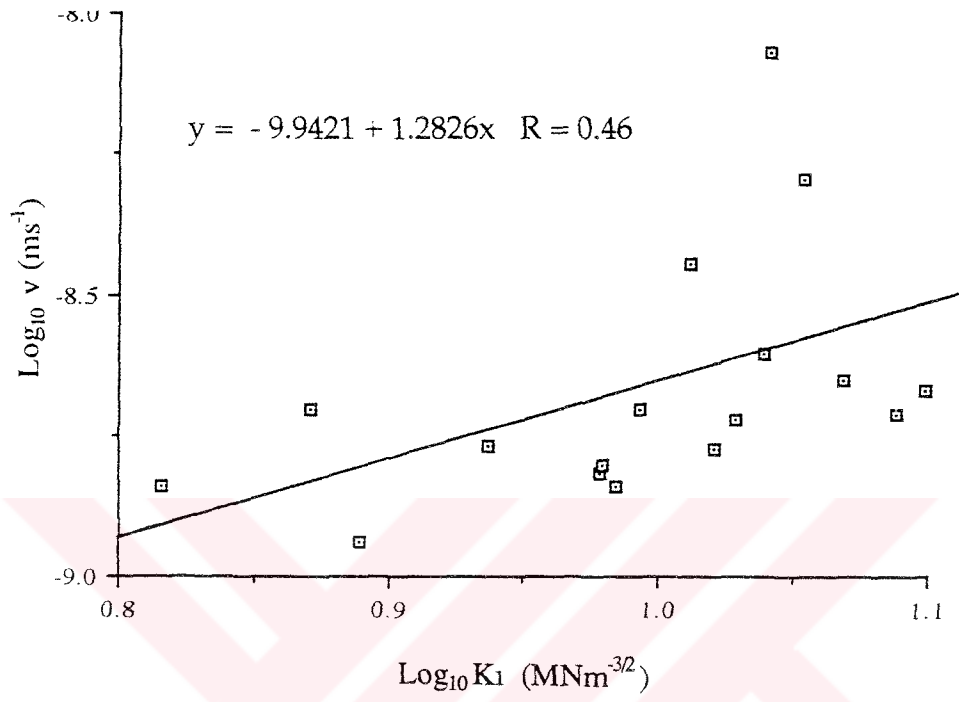
Şekil 6.22.Nishioka'ya Göre Hesaplanmış Çatlak Büyüme Hızının GŞF ile Değişimi ( $\phi=60^\circ$ )



Şekil 6.23.Nishioka'ya Göre Hesaplanmış Çatlak Büyüme Hızının GŞF ile Değişimi ( $\phi=75^\circ$ )



Şekil 6.24.Nishioka'ya Göre Hesaplanmış Çatlak Büyüme Hızının GŞF ile Değişimi ( $\phi=90^\circ$ )



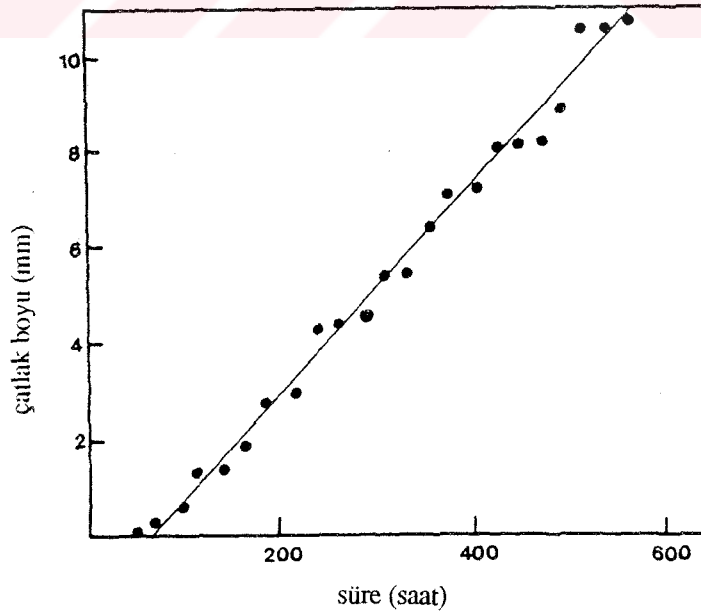
Şekil 6.25. SEN'e Göre Hesaplanmış Çatlak Büyüme Hızının GŞF ile Değişimi

Korelasyon katsayısının düşük olmasının temel nedeni test süresinin yeteri kadar uzun seçilemeyişidir.

Price Hull'un kompakt çekme numunesiyle 20°C ve 0,6 HCl ortamda çatlak ölçümleri Şekil 6.26 'da görülmektedir[78].

Şekilde uzun sürelerde çatlak boyu doğrusal arttığı halde 44 saatten daha kısa sürelerde düzensizlik gözlenmektedir. Çatlak ilerleme ve oluşum safhaları grafikte açıkça görülmektedir. Şekilde çatlak uzunluğu bir süre sabit kalmakta daha sonra hızlı bir artış göstermektedir. Çatlak oluşum safhasında elyafa ulaşan ortam belirli bir bölgedeki elyafı zayıflatmaktadır. İkinci safhada ise çatlak bu bölgeyi hızla geçmekte, zayıflamamış yeni bölgeye girince duraklamaktadır.

Çatlak boyunun artışıyla gerilme şiddet faktörü de büyümektedir. Düşük Kı



Şekil 6.26 Kompakt çekme numunesiyle elde edilen çatlak ilerleme ölçümleri

değerlerinde ortamın etki bölgesi küçük olduğundan hem çatlak oluşum süresi hem de çatlak uzunluk artışı küçük olmaktadır.  $K_I$ 'in büyümesiyle oluşum süresi biraz artarak daha sonra sabit kalmaktadır. İzofalik reçine E camından bizim deneylerimizde kullanılan malzemeye benzer bir malzemedan yapılan levhaların kullanıldığı deneyden elde edilen bu grafikte, 3 mm'ye kadar çatlak boylarında yaklaşık 30 saatlik bir oluşum sahası görülmektedir. Çatlak boyunun artışıyla süre 56 saat civarına yükselmekte ve bu değerinde yaklaşık sabit kalmaktadır. Çatlak ilerleme safhası da  $K_I$ 'in artışıyla uzamaktadır.

Deneylerde, gerilme şiddet faktörünün değerinin artışıyla çatlak oluşum ve ilerleme safhalarının süreleri de artmaktadır. Basma deneyinde her ne kadar çatlak başlama süresi 50-200 dakika gibi kısa bir süre verilmiş olsa da bu değer deneyin bir özelliğidir [114]. Hogg ve Hull [114] deneyde çok sayıda küçük gerilme korozyon çatlağının aynı anda oluşumu ile boru deformasyonu artmaktadır. Diğer deneylerde 48 saatden küçük sürelerde ölçülen çatlak hızında büyük değişim olduğu ifade edilmiştir [78].

Yüzey çatlağı deneylerinde malzeme kalınlığının sınırlı olması nedeniyle ölçülen çatlak hızları değişim göstermektedir. Bu durum  $\log v$ - $\log K_I$  grafiklerinde dağılmaya ve düşük korelasyon katsayısına yol açmaktadır. Deneylerde 44 saatten daha kısa sürelerde ölçülen çatlak ilerleme hızları değerlendirme dışı bırakılarak çizilen grafiklerden elde edilen A, n ve R değerleri tablo 6.9'da verilmiştir. Sürenin uzamasıyla korelasyon katsayısında önemli bir artış görülmüştür. Şekil 6.26'dan

da görüleceği gibi hassas bir belirleme için 200 saatin üzerinde deneyi sürdürmek gerekmektedir. Yüzey çatlaklı numunelerin kalınlığı sınırlı olduğundan teknolojik olarak çekme yükü altında deney yapmak oldukça zordur.

Deney sonuçlarının daha sağlıklı elde edilebilmesi için 4 kat olarak hazırlanan levhalara değişik oranlarda yüzey çatlağı açıldı. Ortalama 6 mm kalınlığında ve 0,42 elyaf hacimsel oranında bulunan levhalar genişlik etkisinin sonuçları etkilememesi

için ASTM E 740'da verildiği gibi  $2c/2B=1/5$  oranını sağlayacak şekilde ortalama 50 mm genişliğinde kesildi. Kalınlığın fazla olması nedeniyle çatlak ucunda yeterli büyüklükte bir gerilme şiddet faktörü değeri elde edilebilmesi için bu tür numunelerde 50-80 kN lik çekme yükü uygulaması gerekmektedir. Numunelerin uçlarında bulunan uç levhaları epoksi reçinesi ile yapıştırılmış olduklarından civatalı çenelerle yeterli yüzey basıncı uygulanamadığından uç levhaları sıyrılmaktadır. Dolayısıyla deneylerin kendiliğinden sıkışan eğimli çenelerle çekme tezgahında yapılması gerekmektedir. Bu işlemin uzun süre alması ve pahalı olması nedenleriyle, kalın numunelerde kaçınılmaz olarak eğme deneyi yapılmalıdır.

Kalın numunelerin eğme deneyi için NR yaklaşımı kullanılarak bir basic programı hazırlanmıştır. Programda gerilme korozyon çatlak ilerleme davranışını gösterecek şekilde  $K_I$  değerleri verilerek eğme yükü belirlenmiştir. EY CTP'lerde (delaminasyon) tabaka ayrılma mukavemeti oldukça düşüktür. Deney yükleri uygulandığında eğilmenin etkisiyle çatlak dibinden itibaren delaminasyon başlayarak numunenin uç kısımlarına kadar devam etmektedir. Tabaka ayrılmasının önüne geçilmesi için eğme yükü azaltılarak çatlak oluşumunun gözlenebilmesi için asit konsantrasyonu 1,3 N'e çıkarıldı. 180 saate kadar sürdürülen deneylerde yüzeyde kısmî reçine çözülmesi olduğu halde görünür bir gerilme korozyon çatlağı belirlenemedi.

Eğme deneylerinden vazgeçilmesinin diğer bir nedeni NR bağıntısının eğme yükünün değişimi ile çok değişken  $K_I$  değerleri vermesidir. Deney parametreleri kullanılarak yapılan hesaplamada, yükte yapılan küçük bir değişiklikte çatlak elips merkez açısına bağlı olarak elde edilen  $K_I$  ler gelişigüzel değerler almaktadır. Hesaplamalarda NR yaklaşımının eğme deneylerinde sağlıklı sonuç vermediği kanaatine varılmıştır.

$K_I$  parametrik açıyla birlikte artarak  $90^\circ$  de maksimuma erişir. Dolayısıyla ilk çatlak ilerlemesinin buradan başlaması gerekir. Halbuki korozi ortamda Tablo 6.8.

ve 6.9.'dan görüldüğü gibi malzeme sabiti  $n$ ,  $90^\circ$  en küçük değerdedir. Bunun yanısıra  $30^\circ$  de en yüksek değerden itibaren açı büyürken azalmaktadır. Yani en büyük çatlak ilerlemesi  $30^\circ$  civarında olmuştur. Çatlağın  $30^\circ$  civarında en yüksek değerde ilerlemesinin sebebi asidik ortamın  $0^\circ$  den  $30^\circ$  ye kadar olan bölgede hem yüzeyden hem de çatlak ucu bölgesinden etki etmesidir. Halbuki diğer açılarda ortam sadece bir yönde etki etmektedir. Buna göre çatlağın  $0^\circ$  de daha hızlı ilerlemesi gerekir. Diğer yandan  $K_1$   $0^\circ$  de  $30^\circ$  göre daha düşük değerdedir. Bu nedenlerle çatlak ilerleme hızı  $30^\circ$  civarında en yüksek değeri almaktadır.

Deneylerde sığ çatlak tek taraftan korozyona maruz bırakıldığından, ortam etkisi yüzeyde daha fazla olmakta kalınlık boyunca ise azalmaktadır. Gerilmesiz korozyon şartlarında, reçine içerisinde suda çözülebilen maddelerin ortamla uzaklaştırılması sonucu, matriksteki büzülme arayüzey ayrılmasına ve elyaf eksenini boyunca yüzey çatlaklarına yol açmaktadır [42]. Yüzeyde korozyon etkisi özellikle tam sertleşmemiş reçinede daha da etkilidir. Zayıf sertleşme hem havadaki oksijen gecikmesi hem de stiren buharlaşmasının ortak sonucudur.

Ayrıca reçine, elyaf ve arayüzeydeki çözülebilen maddeler osmotik basınç oluşturarak reçinede görülen disk çatlaklarına benzer çatlaklar oluşturabilmektedir[40]. Bu çatlaklar difüzyon hızını artırarak yüzeydeki korozyonu hızlandırmaktadırlar.

Yüzeyde korozyon etkisinin daha fazla olmasının diğer bir nedeni mikrodüzeyde levha kalınlığı boyunca hacimsel elyaf oranının azalmasıdır. Kompozitin üretimi sırasında pres basıncı ile yüzeydeki reçine kolaylıkla atıldığından dış kısımda lifleri ortamdan koruyan reçine miktarı azalacaktır.

Deneylerde bazı numunelerin ortamla temas eden kısımlarında reçine erimesi ve elyafa paralel çatlaklar açıkça gözlenmiştir. Yüzey çatlağının çeşitli açılara karşılık gelen uç noktaları, numunenin yüzeyinden itibaren farklı derinliklere karşılık gelmektedir. Log  $v$ -Log  $K_1$  korelasyon katsayısının düşük olması numune kalınlığı

boyunca elyaf hacimsel oranının değişimi ve numune sayısı dikkate alındığında korozyon hızındaki farklılıktan da kaynaklanmaktadır.

CTP gerilmesiz korozyona oldukça dirençlidir. Bununla birlikte önceden hasara uğratılarak korozyon etkisine bırakılmış numunelerde önemli derecede özellik kaybı görülmüştür [71]. GK deneylerinde uygulanan yük, arayüzey ayrılmasına yol açacak kadar büyük seçilmesi halinde difüzyon katsayısı yükselecektir. Arayüzey ayrılması sonucu ortam kopmamış elyafa daha geniş bir yüzeyden etki edeceğinden çatlağın henüz ulaşmadığı bölgelerde de korozyon etkisiyle zayıflama meydana gelecektir. Bu çalışmada, deneylerde uygulanan gerilme 100-270 MPa arasında değişmektedir. Buna karşılık gelen şekil değiştirme değerleri ise %0,3-0,7 arasındadır. Havada çekme deneyinde ilk çatlama sesi %0,54 şekil değiştirme değerinde duyulmuştur. EY cam/polyester kompozitlerde hasarın %0,5 şekil değiştirme değerinde başladığı rapor edilmiştir [91]. Ön yükleme sırasında oluşan deformasyonun gerilmeli korozyona etkisi, düşük değerlerde fazla olmazken %0,5 şekil değişiminin değerinden sonra arayüzey ayrılması ile korozyon hızı artacaktır. Bu etki çatlak ilerleme hızı-Kı grafiklerindeki dağılmanın diğer bir nedenidir.

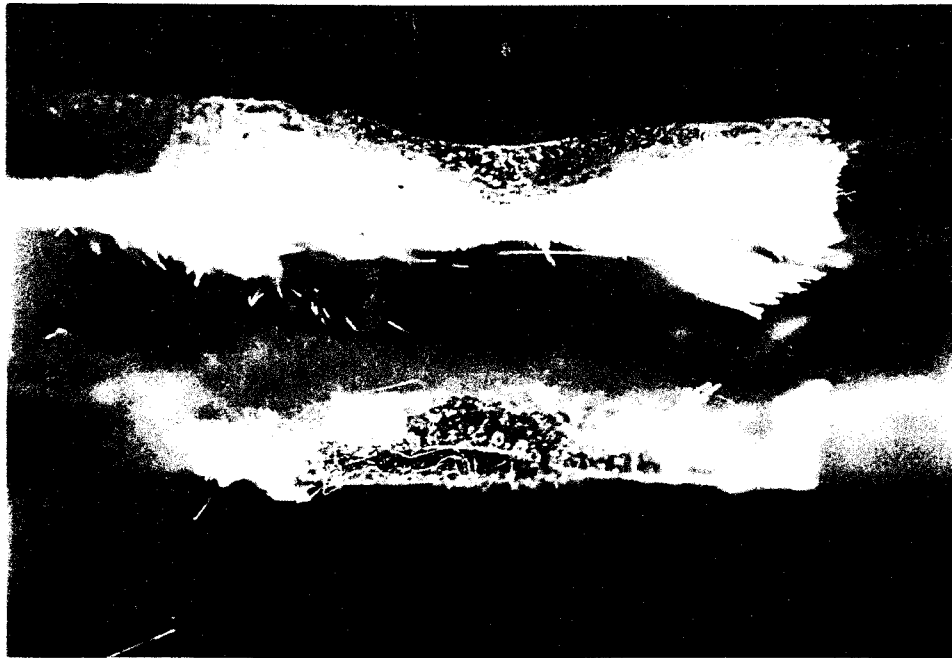
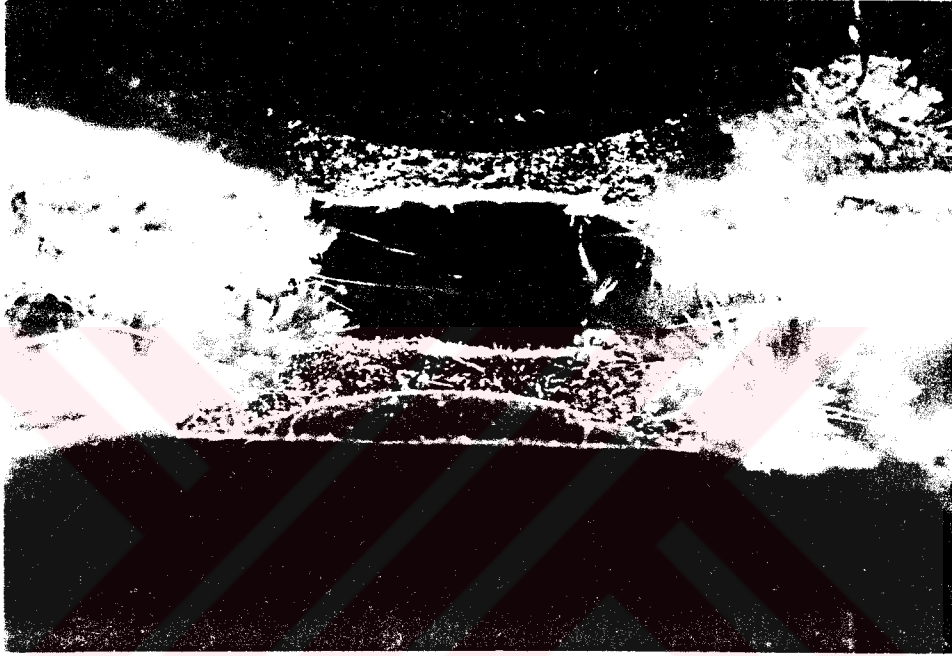
Bütün numunelerin değerlendirildiğı Tablo 6.8.'de malzeme sabitlerinden A'nın logaritmik değerlerinin parametrik açı  $\phi$  ile değişimine baktığımızda gerek (NHK) değerlerinde gerekse (NR) değerlerinde farklılık çok az olmakla birlikte  $\phi=0^\circ$  en düşük  $\phi=30^\circ$  de ise en büyük değer tesbit edilmiştir. 44 saatten daha kısa sürelerdeki çatlak hızları değerlendirme dışı bırakılmıştır. Tablo 6.9.'da yine benzeri durum sözkonusudur. Log A'nın en büyük değeri ile en düşük değeri arasındaki fark Tablo 6.8.'de (NHK) için %5.1 (NR) için %5.4 iken Tablo 6.9. a göre (NHK) için %4.1 ve (NR) için %4.8 olmaktadır.

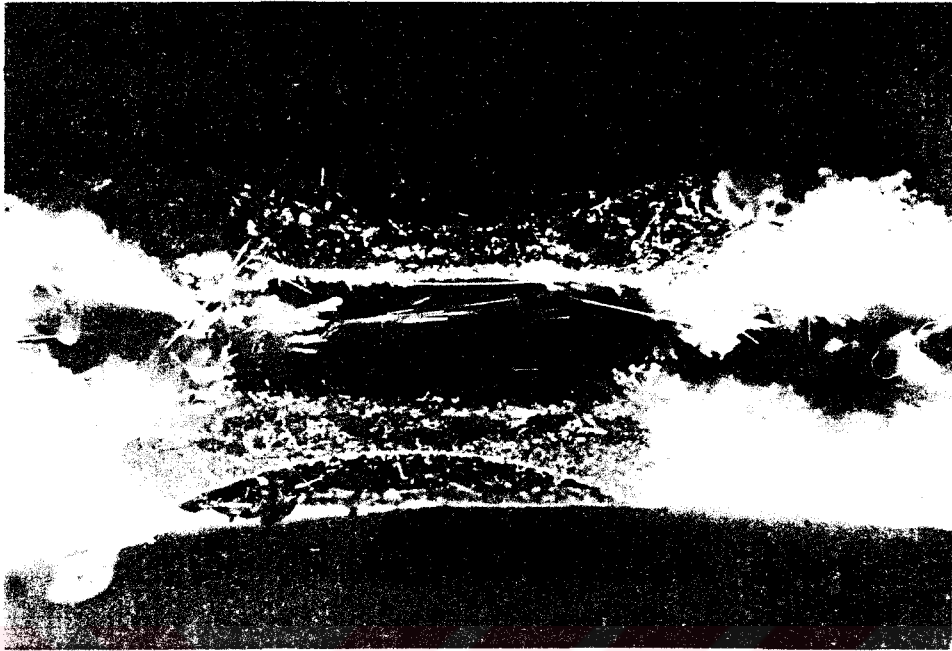
Düşük a/c oranlarında (SEN) için log A=-9.94 n=1.28 ve R=0.46 değerleri elde edilmiştir.



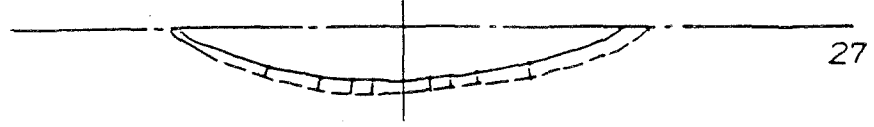
Yüzey çatlağının gerilmeli korozyonunda çatlak ilerlemesi hemen hemen bütün a/c ve a/t çatlak boyutlarında başlangıç çatlağının şeklini koruyacak şekilde olmuştur. Şekil 6.27-6.30 'da korozif ortamdaki çatlağın çatlak düzleminden kesilerek ilerleme tarzına bakıldığında çatlak ön yüzünün oldukça pürüzlü olduğu görülmektedir.

Şekil 6.27-30. Gerilmeli korozyonda yüzey çatlaklarının görünüşleri

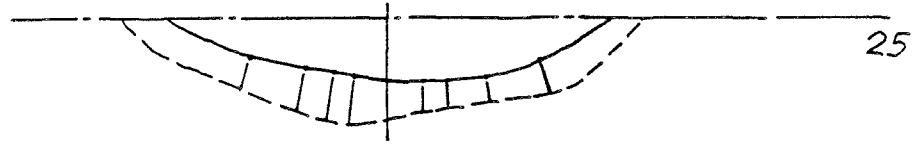




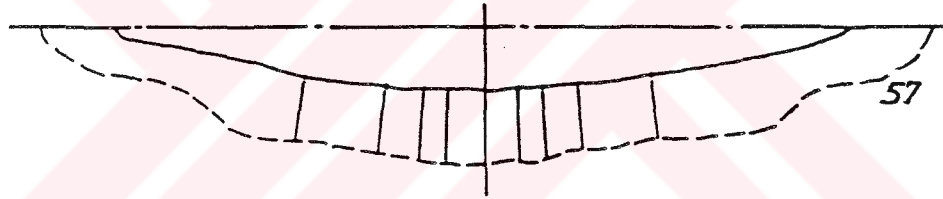
Uygulanan gerilmenin artışı ile GŞF de büyüdüğünden çatlak ucu geometrisindeki pürüzlülük te artmaktadır (Şekil 6.31).



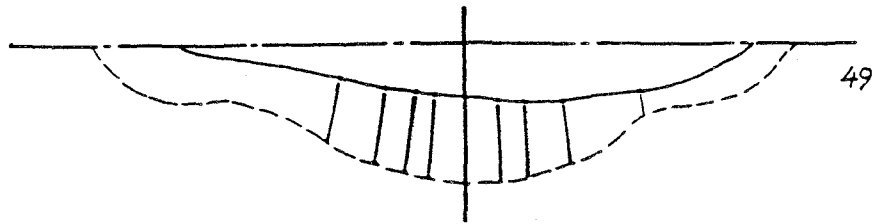
$$\begin{aligned} St &= 160\text{MPa} \\ a/c &= 0.24 \\ a/t &= 0.40 \\ T &= 44 \text{ saat} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} St &= 173\text{MPa} \\ a/c &= 0.28 \\ a/t &= 0.36 \\ T &= 44 \text{ saat} \end{aligned}$$



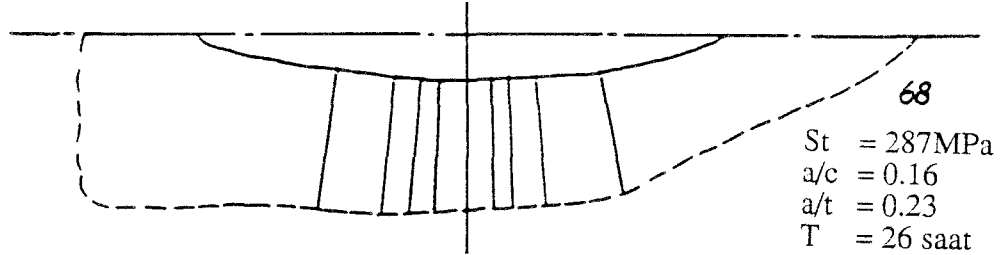
$$\begin{aligned} St &= 212\text{MPa} \\ a/c &= 0.16 \\ a/t &= 0.31 \\ T &= 70 \text{ saat} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} St &= 246\text{MPa} \\ a/c &= 0.20 \\ a/t &= 0.30 \\ T &= 22 \text{ saat} \end{aligned}$$

Şekil 6.31. Gerilmeli korozyonda yüzey çatlğının ilerleme geometrileri

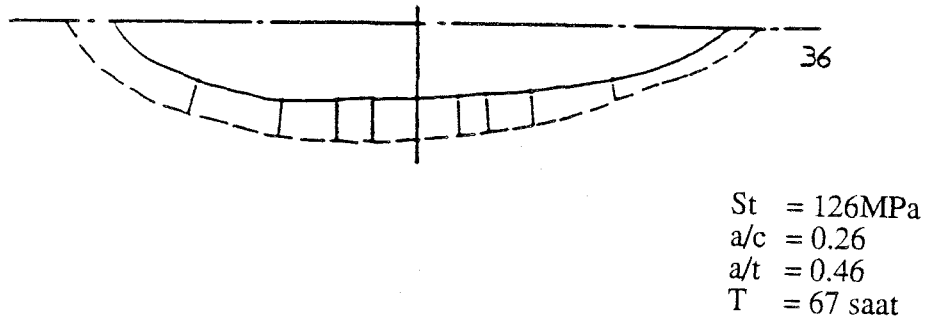
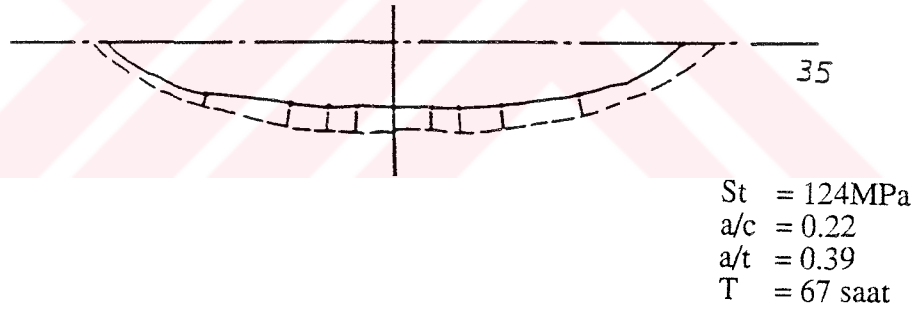
Çatlağın z eksenine göre simetrik olarak ilerlemesi gerektiği halde, kullanılan kompozit malzemenin mikro düzeyde homojen olmaması numuneye gelen yüklerde ve bağlama eksenlerinde sapmalar ve eksantriklikler gibi sebeplerle bazı numunelerde önemli derecede simetrik olmayan çatlak ilerlemesi görülmüştür (Şekil 6.32).



Şekil 6.32. GK'da simetrik olmayan çatlak ilerlemesi

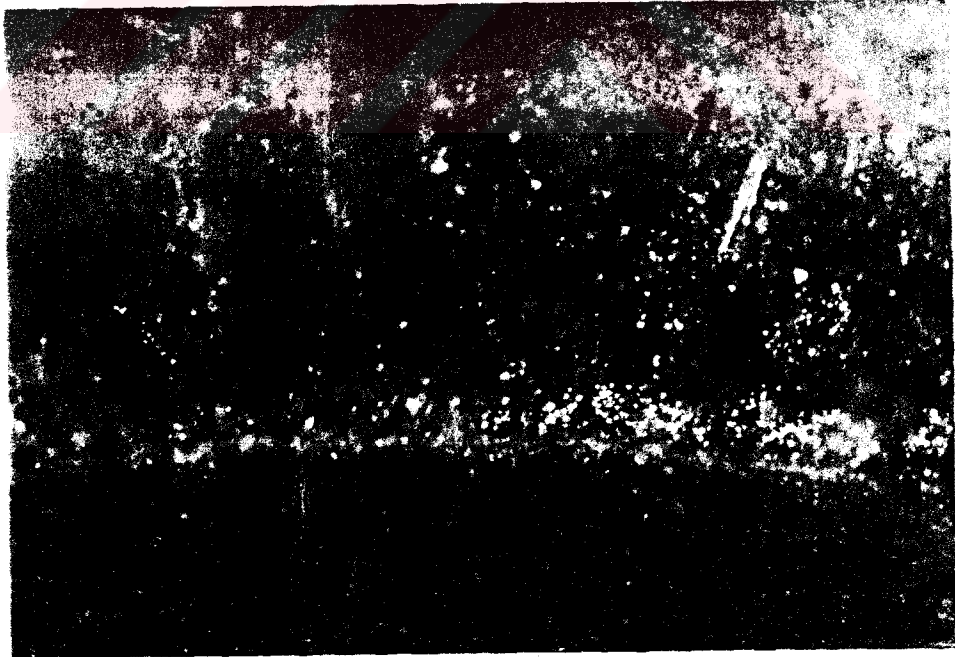
Hesaplamlarda simetrik açılardaki çatlak ilerlemesinin ortalaması kullanılmıştır.

Çatlak ilerleme hızı a/c oranıyla önemli derecede artarken diğer parametrelerden fazla etkilenmemektedir. Şekil 6.33.'te 35 ve 36 no.lu numunelerden de görüldüğü gibi a/c oranı büyüdükçe çatlak ilerleme hızı artmaktadır.

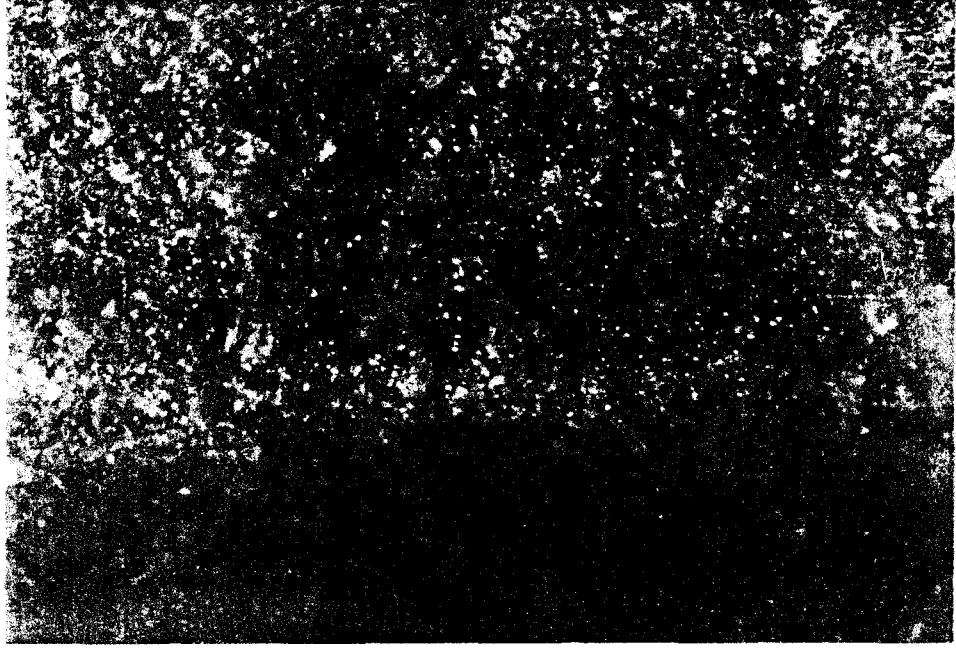


Şekil 6.33. Gerilmeli korozyonda a/c ile çatlak ilerleme miktarının değişimi

150 MPa nominal gerilmeye kadar ve 67 saate kadar sürelerde çatlak üniform bir şekilde ilerlemektedir. 170 - 180 MPa dan daha büyük değerlerde, 24 saat civarındaki sürelerde ilerlemiş çatlak şekli orijinal geometrisine benzemektedir. Daha uzun sürelerde ise çatlak geometrisi düzensiz bir hal almaktadır. Gerilmenin artışıyla çatlak geometrisinin düzensiz duruma geçme süresi kısalmaktadır. Şekil 6.34'de çatlak bölgesinin mikroskobik görünüşünde  $K_I$ 'in artışıyla çatlak düzleminde basamaklar görülmektedir.



Şekil 34. 49 no.lu numuneye ait çatlak bölgesinin mikro fotoğrafı (M 30X)  
( $S_t = 240$  MPa,  $K_I = 11$  MNm<sup>-3/2</sup>)



Şekil 35. 79 no.lu numuneye ait çatlak bölgesinin mikro fotoğrafı (M 30X)

( $St= 202 \text{ MPa}$ ,  $K_I=9.5 \text{ MNm}^{-3/2}$ )

## 7. SONUÇLAR

Üzerinde yüzey çatlakları bulunan eş yönlü takviyeli cam/polyester kompozitlerde gerilmeli korozyon davranışının incelendiği bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

1. Gerilmeli korozyon için gerekli olan çatlak ucu gerilme şiddet faktörü birbirinden farklı üç ayrı yolla hesaplandı.  $a/c < 0.2$  için SEN değerleri Newman-Raju ve Nishioka'dan daha büyük çıkmıştır. Ancak  $\phi = 90^\circ$  a/c, alttan 0.2'ya yaklaştıkça Newman-Raju değerlerine eşitlenmektedir.

2. Newman-Raju ifadesinden elde edilen GŞF'leri her bir a/c değerlerinde Nishioka'dan büyük çıkmıştır.

3. Gerilme şiddet faktörleri  $\phi = 90^\circ$  'de en büyük değere erişmektedir. Bu da çatlakların ilk hasarının buradan başlayacağını göstermektedir.

4. Yüzey çatlaklı GK da,  $\phi = 0^\circ$  ile  $30^\circ$  civarında asitli ortam kompozit malzemeye iki yönden etki ederken  $90^\circ$  civarında tek yönden etki etmektedir. diğer tarafta  $\phi = 90^\circ$  K1 en düşük değerdedir. Yani açı büyürken K1 artmakta bu sırada ortamın etkisi azalmaktadır. Bir malzeme sabiti olan n  $30^\circ$  de maksimum olmaktadır.

5. 44 saatin altındaki gerilmeli korozyon numuneleri dikkate alınmadan elde edilen n sabitleri, bütün numunelerin hesaba katılıp ta elde edilen değerlerden ortalama %4 küçük çıkmaktadır.

6. Yine (NR) ya göre hesaplanan n değerleri, (NHK) dan bulunan değerlere göre %0.9 büyük hesaplanmıştır.

Buradan (NR) denklemlerinin yüzey çatlaklı GK'a daha uygun olduğu söylenebilir.

7. Yüzey çatlaklı GK da  $a/c$  ve  $a/t$  oranlarında genel olarak orijinal çatlağın şeklinin büyümesi tarzında olurken, uzun sürelerde çatlak geometrisi düzensiz bir hal almaktadır.

8. Çatlak ilerleme hızı  $a/c$  oranından diğer parametrelere göre daha fazla etkilenmektedir.  $a/c$  büyürken çatlak ilerleme hızı da artmaktadır.

9. Bazı numunelerde düzensiz çatlak ilerlemesinin görülmesi kompozit malzemenin mikrodüzeyde homojen olmaması ve yükleme sırasında eksantriklerden kaynaklanmaktadır.

10. Diğer bir malzeme sabiti  $\log A$ ,  $n$  sabiti gibi  $\phi=30^\circ$  civarında en büyük değere erişmektedir. (NR) dan elde edilen  $\log A$  (NHK) dan elde edilen  $\log A$  dan mutlak değer cinsinden ortalama %1 büyük çıkmaktadır.

11.  $R$  değerleri de  $30^\circ$  den itibaren açı büyürken azalmaktadır. Ortalama  $R$  değeri (NHK) ya göre 0.57, (NR) ya göre ise 0.58 tesbit edilmiştir.  $a/c < 0.2$  oranları için (SEN) e göre  $R=0.55$  bulunmuştur.

12. (NR) nun yüzey çatlaklı malzemelerde eğilme için geliştirdiği bağıntı yüzey çatlaklı kompozit malzemelerde gerilmeli korozyona uygun değildir.



## 7. KAYNAKLAR

- [1] SANFORD, R. J. and STONESIFER, F. R., 1971, Fracture Toughness Measurements in Unidirectional Glass-reinforced Plastics, *Journal of Composite Materials*, 5: 113-117.
- [2] PARIS, P. C. and SIH, G. C., 1965, Stress Analysis of Cracks, Fracture Toughness Testing and Its Applications, ASTM, STP 381, Philadelphia, Pa., 30.
- [3] TETELMAN, A. S., 1969, Fracture Processes In Fiber Composite Materials, *Composite Materials: Testing and Design*, ASTM, STP 460, Philadelphia, Pa., 473-502.
- [4] PHILLIPS, D. C. and TETELMAN, A. S., 1972, The Fracture Toughness of Fiber Composites, *Composites*, 1: 216-223.
- [5] GARG, A. C., 1985, Fracture Behavior of Cross-ply Graphite/Epoxy Laminates, *Engineering Fracture Mechanics*, 22: 1035-1048.
- [6] MOORE, R. H. and DILLARD, D. A., 1990, Time-dependent Matrix Cracking in Cross-ply Laminates, *Composites Science and Technology*, 39: 1-12.
- [7] ARONSSON, C. G. and BACKLUND, J., 1986, Tensile Fracture of Laminates with Cracks, *Journal of Composite Materials*, 20: 287-307.
- [8] BACKLUND, J. and ARONSSON, C. G., 1986, Tensile Fracture of Laminates with Holes, *Journal of Composite Materials*, 20: 259-287.
- [9] LEE, S. M., 1986, A Comparison of Fracture Toughness of Matrix Controlled Failure Modes: Delamination and Transverse Cracking, *Journal of Composite Materials*, 20: 185-196.
- [10] KANNINEN, M. F., RYBICKI, E. F. and BRINSON, H. F., 1977, A Critical Look at Current Applications of Fracture Mechanics to the Failure of Fiber-reinforced Composites, *Composites*, 8: 17-22.
- [11] SOLAR, M. A. and BELZUNCE F. J., 1989, Fracture Toughness and R-curves of Glass Fiber Reinforced Polyester, *Composites*, 20: 120-124.
- [12] HERAKOVICH, C. T., 1989, Failure Modes and Damage Accumulation in Laminated Composites with Free Edges, *Composites Science and Technology*, 36: 105-119.
- [13] BAILEY, J. E. and PARVIZI, A., 1981, On Fiber Debonding Effects and the Mechanism of Transverse-ply Failure in Cross-ply Laminates of Glass Fiber/Thermoset Composites, *Journal of Material Science*, 16: 649-659.

- [14] TIROSH, J., 1973, The Effect of Plasticity and Crack Blunting on the Stress Distribution in Orthotropic Composite Materials. *Journal of Applied Mechanics*, Trans. ASME, September 1973: 785-790.
- [15] ROBERTSON, R. E., SPORER, M. G., PAN, T. and MINDROIN, V. E., 1989, Plasticity of Brittle Epoxy Resins During Debonding Failures, *Journal of Material Science*, 24: 4106-4113.
- [16] MARSHALL, D. B., COX, B. N. and EVANS, A. G., 1985, The Mechanics of Matrix Cracking in Brittle-matrix Fiber Composites, *Acta Metall.*, 33: 2013-2021.
- [17] MIYANO, Y., KANEMITSU, M., KUNIO, T. and KUHN, H. A., 1986, Role of Matrix Resin on Fracture Strengths of Unidirectional CFRP, *Journal of Composite Materials*, 20: 520-538.
- [18] SLEPETZ, J. M. and CARLSON, L., 1975, Fracture of Composite Compact Tension Specimens, *Fracture Mechanics of Composite*. ASTM STP 593, Pa, 143-163.
- [19] SUBINE and CUI ZHEN-YUAN, 1989, The Fracture Initiation Criterion of Mixed-Mode Surface Crack, *Engineering Fracture Mechanics*, 34: 1-13.
- [20] WANG, S. S., MANDELL, J. F. and McGRAY, F. J., 1975, Three-Dimensional Solution for a Through-Thickness Crack with Crack Tip Damage in a Cross-Plied Laminate, *Fracture Mechanics of Composite*. ASTM STP 593, Pa, 61-85.
- [21] RICE, J. R. and LEVY, N., 1970, The Part-through Surface Crack in an Elastic Plate, *Trans. ASME Journal of Applied Mechanics*, Paper No. 71-APM-20.
- [22] NEWMAN, Jr. J. C., 1973, Fracture Analysis of Surface and Through-Cracked Sheets and Plates, *Engineering Fracture Mechanics*, 5: 667-689.
- [23] SMITH, F. W. and ALAVI, M. J., 1971, Stress Intensity Factors for a Penny Shaped Crack in a Half Space, *Engineering Fracture Mechanics*, 3: 241-254.
- [24] IRWIN, G. R., 1962, Crack Extension Force for a Part- through Crack in a Plate, *Trans. ASME*, E29: 651-657.
- [25] IRWIN, G. R., 1972, Characterization of Part-through Crack in Tension, *The Surface Crack: Physical Problems and Computational Solutions*, ASME, Ed: SWEDLOW, J. L., New York, NY. 1-10.
- [26] ANDERSON, R. B., HOLMS, A. G. and ORANGE, T. W., 1970, Stress Intensity Magnification for Deep Surface Cracks in Sheets and Plates, NASA TN D-6054.
- [27] KOBAYASHI, A. S. and SHAH, R. C., 1971, Stress Intensity Factors for an Elliptical Crack Approaching the Surface of a Semi-infinite Solids, *Engineering Fracture Mechanics*, 2:
- [28] SHAH, R. C. and KOBAYASHI, A. S., 1972, On the Surface Flaw Problem, *The Surface Crack: Physical Problems and Computational Solutions*, ASME, Ed: SWEDLOW, J. L., New York, NY. 79-124.

- [29] LITTLE, C. D. and BUNTING, P. M., 1972, The Surface Flaw in Aircraft Structures and Related Fracture Mechanics Analysis Problems, The Surface Crack: Physical Problems and Computational Solutions, ASME, Ed: SWEDLOW, J. L., New York, NY. 11-42.
- [30] COLLIPRIEST, J. E., 1972, An Experimental View of the Surface Flaw Problem, The Surface Crack: Physical Problems and Computational Solutions, ASME, Ed: SWEDLOW, J. L., New York, NY. 43-61.
- [31] SMITH, F. W., 1972, The Elastic Analysis of the Part-circular Surface Flaw Problem by the Alternating Method, The Surface Crack: Physical Problems and Computational Solutions, ASME, Ed: SWEDLOW, J. L., New York, NY. 125-152.
- [32] RICE, J. R., 1972, The Line Spring Model for Surface Flaws, The Surface Crack: Physical Problems and Computational Solutions, ASME, Ed: SWEDLOW, J. L., New York, NY. 171-185.
- [33] MARCAL, P. V., Three-dimensional Finite Elements Analysis for Fracture Mechanics, The Surface Crack: Physical Problems and Computational Solutions, ASME, Ed: SWEDLOW, J. L., New York, NY. 187-202.
- [34] RAJU, I. S. and NEWMAN, J. C., 1979, Stress-Intensity Factors for a Wide Range of Semi-elliptical Surface Cracks in Finite-thickness Plates, Engineering Fracture Mechanics, 11: 817-829.
- [35] MATTHECK, C., MORAWIETZ, P. and MUNZ, D., 1983, Stress Intensity Factor at the Surface and at the Deepest Point of a Semi-elliptical Surface Crack in Plates Under Stress Gradients, International Journal of Fracture, 23: 201-212.
- [36] AURICH, D., BROCKS, W., NOACK, H. D. and VEITH, H., 1985, Fracture Mechanics Analysis of a Pressure Vessel with a Semi-elliptical Surface Crack Using Elastic-Plastic Finite Element Calculations, Fracture Mechanics: Sixteenth Symposium, ASTM, STP 868, Philadelphia, Pa., 617-631.
- [37] MIYOSHI, T., SHIRATORI, M. and TANABE, O., 1985, Stress Intensity Factors for Surface Cracks with Arbitrary Shapes in Plates and Shells, Fracture Mechanics: Sixteenth Symposium, ASTM, STP 868, Philadelphia, Pa., 521-534.
- [38] FETT, T., MATTHECK, C. and MUNZ, D., 1990, Averaged Stress Intensity Factors for Embedded Elliptical Cracks, Engineering Fracture Mechanics, 35: 987-996.
- [39] WALTER, E. and ASHBEE, K. H. G., 1982, Osmosis in Composite Materials, Composites, 13: 365-375.
- [40] ABEYSHINGHE, H. P., GHOTRA, J. S. and PRITCHARD, G., 1983, Substances Contributing to the Generation of Osmotic Pressure in Resins and Laminates, Composites, 14: 57-61.
- [41] EDGE, E. C., 1980, Effect on Moisture Experiments of Failure to Dry Specimens Prior to Exposure, Composites, 11: 101-104.

- [42] APICELLA, A., MIGLIARESI, C., NICOLAIS, L., IACCARINO, L. and ROCCOTELLI, S., 1982, Water Sorption and Mechanical Properties of a Glass-reinforced Polyester Resin, *Composites*, 13: 406-410.
- [43] HAN, K. S. and KOUTSKY, J., 1983, Effect of Water on the Interlaminar Fracture Behavior of Glass Fiber-reinforced Polyester Composite, *Composites*, 14: 67-70.
- [44] ELLIS, B. and FOUND, M. S., 1983, The Effects of Water Absorbition on a Polyester/Chopped Strand Mat Laminate, *Composites*, 14: 237-243.
- [45] EDGE, E. C., 1983, Analysis of Moisture Gradients in Service and in the Laboratory, *Composites*, 14: 189-195.
- [46] KELLAS, S., MORTON, J. and CURTIS, P. T., 1990, The Effect of Hygrothermal Environments upon the Tensile and Compressive Strengths of Notched CFRP Laminates Part 1: Static Loading, *Composites*, 21: 41-51.
- [47] HARPER, B. D., 1987, The Effects of Moisture Induced Swelling upon the Shapes of Anti-symmetric Cross-ply Laminates, *Journal of Composite Materials*, 21: 36-48.
- [48] NEWMANN, S. and MAROM, G., 1987, Prediction of Moisture Diffusion Parameters in Composite Materials Under Stress, *Journal of Composite Materials*, 21: 68-80.
- [49] PRITCHARD, G. and SPEAKE, S. D., 1987, The Use of Water Absorbition Kinetic Data to Predict Laminate Property Changes, *Composites*, 18: 227-232.
- [50] JANAS, V. F. and McCULLOUGH, R. L., 1987, Moisture Absorbition in Unfilled and Glass-filled, Cross-linked Polyester, *Composites Science and Technology*, 29: 293-315.
- [51] LOOS, A., SPRINGER, G. S., SANDERS, B. A. and TUNG, R. W., 1980, Moisture Absorbition of Polyester-E Glass Composites, *Journal of Composite Materials*, 14: 142-154.
- [52] JONES, F. R. and MULHERON, M., 1983, The Effect of Moisture on the Expansion Behavior and Thermal Strains in GRP, *Composites*, 14: 281-287.
- [53] MULHERON, M., JONES, F. R. and BAILEY, J. E., 1986, Moisture-induced Thermal Strains in Glass Fiber Reinforced Plastic Composites, *Composites Science and Technology*, 25: 119-131.
- [54] PRITCHARD, G. and SPEAKE, S. D., 1988, Effects of Temperature on Stress-rupture Times in Glass-polyester Laminates, *Composites*, 19: 29-35.
- [55] PHANI, K. K. and BOSE, N. R., 1987, Temperature Dependence of Hydrothermal Ageing of CSM-Laminate During Water Immersion, *Composites Science and Technology*, 29: 79-87.
- [56] CRISCIOLI, P. R., LEE, W. I., PETERSON, D. G., SPRINGER, G. S. and TANG, D. G., 1987, Accelerated Environmental Testing of Composites, *Journal of Composite Materials*, 21: 225-242.

- [57] COLLINGS, T. A. and COPLEY, S. M., 1983, On the Accelerated Ageing of CFRP, *Composites*, 14: 180-188.
- [58] BIRGER, S., MOSHONOV, A. and KENIG, S., 1989, The Effect of Thermal and Hygrothermal Ageing on the Failure Mechanisms of Graphite-fabric Epoxy Composites Subjected to Flexural Loading, *Composites*, 20: 341-348.
- [59] GARG, A. C., 1988, Effect of Moisture and Temperature on Fracture Behavior of Graphite-epoxy Laminates, *Engineering Fracture Mechanics*, 29: 127-149.
- [60] REGESTER, R. F., 1969, Behavior of Fiber Reinforced Plastic Materials in Chemical Service, *Corrosion-NACE*, 25: 157-167.
- [61] SPRINGER, G. S., SANDERS, B. A. and TUNG, R. W., 1980, Environmental Effects on Glass Fiber Reinforced Polyester and Vinylester Composites, *Journal of Composite Materials*, 14: 213-232.
- [62] SCHULTZ, J. M. and LHYMN, C., 1984, Stress-rupture Lifetime of a Polyethylene Terephthalate/Glass Composite under an Alkaline Solution Environment, *Polymer Composites*, 7: 208-214.
- [63] EAKINS, W. J., 1969, Effect of Water on Glass Fiber-resin Bonds, Interfaces in Composites, ASTM STP 452 ASTM, Philadelphia, Pa., 137-148.
- [64] BASCOM, W. D., 1974, The Surface Chemistry of Moisture Induced Composite Failure, *Composite Materials-Interfaces in Polymer Matrix Composites*, Ed.:E. P. PLUEDDEMANN, Academic Press, New York, 6: 79-106.
- [65] CADDOCK, B. D., EVANS, K. E. and MASTERS, I. G., 1989, Diffusion Behavior of the Core-sheath Structure in E-Glass Fibres Exposed to Aqueous HCl, *Journal of Material Science*, 24: 4100-4105.
- [66] RODRIGUEZ, E. L., 1987, Corrosion of Glass Fibres, *Journal of Material Science Lett.*, 6: 718-720.
- [67] NORWOOD, L. S. and MILLMAN, A. F., 1980, Strain Limited Design Criteria for Reinforced Plastic Process Equipment, *Composites*, 11: 39-45.
- [68] FRIEDRICH, K., 1981, Stress Corrosion Crack Propagation in Glass Fiber Reinforced/Thermoplastic PET, *Journal of Material Science*, 16: 3292-3302.
- [69] PHILLIPS, M. G., 1983, Prediction of Long-term Stress-rupture Life for Glass Fiber-reinforced Polyester Composites in Air and in Aqueous Environments, *Composites*, 14: 270-275.
- [70] JONES, F. R., ROCK, J. W. and WHEATLY, A. R., 1983, Stress Corrosion Cracking and its Implications for a Long-term Durability of E-Glass Fiber Composites, *Composites*, 14: 262-269.
- [71] JONES, F. R., ROCK, J. W. and WHEATLY, A. R., 1983, The Long-term Durability of Stressed GRP in Acidic Environments, *Journal of Material Science Lett.*, 2: 519-521.



- [72] HOGG, P. J., 1983, Factors Affecting the Stress Corrosion of GRP in Acid Environments, *Composites*, 14: 254-261.
- [73] JONES, F. R., ROCK, J. W. and BAILEY, J. E., 1983, The Environmental Stress Corrosion Cracking of Glass Fiber-reinforced Laminates and Single E-Glass Filaments, *Journal of Material Science*, 18: 1059-1071.
- [74] ROBERTS, R. C., 1985, Environmental and Time Dependence of Fracture Toughness and Crack Growth in Glass-fiber Reinforced Polyester Resins, *Journal of Material Science*, 20: 1341-1350.
- [75] AVESTON, J. and SILLWOOD, J. M., 1982, Long-term Strength of Glass-reinforced Plastics in Dilute Sulphuric Acid, *Journal of Material Science*, 17: 3491-3498.
- [76] HSU, P. L., YOU, S. S. and CHOU, T. W., 1986, Stress-corrosion Cracking and its Propagation in Aligned Short-fiber Composites, *Journal of Material Science*, 21: 3703-3709.
- [77] HULL, D., KUMOSA, M. and PRICE, J. N., 1986, Stress Corrosion of Aligned Glass Fiber-polyester Composite Material, Fracture at Stress Concentrations, *Mechanics and Physics of Fracture III*, The Institute of Metals, 1. Baski, London.
- [78] PRICE, J. N. and HULL, D., 1987, Effect of Matrix Toughness on Crack Propagation During Stress Corrosion of Glass Reinforced Composites, *Composites Science and Technology*, 28: 193-200.
- [79] KUMOSA, M., HULL, D. and PRICE, J. N., 1987, Acoustic Emission from Stress Corrosion Cracks in Aligned GRP, *Journal of Material Science*, 22: 331-336.
- [80] HILL, R., COWKING, A. and CARSWELL, W. S., 1989, An Acoustic Emission Study of Stress Corrosion in a Chopped Strand Material GFRP Composite, *Composites*, 20: 215-222.
- [81] HOGG, P. J., 1990, A Model for Stress Corrosion Crack Growth in Glass Reinforced Plastics, *Composites Science and Technology*, 38 : 23-41.
- [82] LUBIN, G., 1982, *Handbook of Advanced Composites*, Van Nostran Reinhold Publish., 2nd Edition, New York, 375-379
- [83] NOTON, B. R., 1974, *Engineering Applications of Composites*, Composite Materials, Academic Press, 1st Edition, New York, 3: vii-xviii.
- [84] PERRY, RH., GREEN D., 1985, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill Book Co, 2nd Edition, NY, 23:17-20.
- [85] ALLEN, R. C., 1979, Some Corrosion Mechanisms in Attack of Resin and Resin-Glass Laminates, *Polym. Engineering and Science*, 19(5): 329-336.
- [86] ISHAI, O., 1975, Environmental Effects on Deformation, Strength and Degradation of Unidirectional Glass-fiber Reinforced Plastics, *Journal of Survey, Polym. Engineering and Science*, 15(7): 486-490.
- [87] ASTM C581-74, *Chemical Resistance of Thermosetting Resins Used in Glass Fiber Reinforced Structures*.

- [88] PRITCHARD, G. and TANEJA, N., 1973. Water Damage in Polyester Glass Laminates, Part I: An Apparatus for the Study of Water Damage in Uniaxially Stressed Materials, *Composites*, 4: 181-183.
- [89] PRITCHARD, G. and TANEJA, N., 1973. Water Damage in Polyester Glass Laminates, Part II: Microscopic Evidence, *Composites*, 4: 199-202.
- [90] MENGES, G. and GITSCHNER, H. W., 1980. Sorption Behaviour of Glass-fibre Reinforced Composites and the Influence of Diffusing and Failure Behaviour, *Advances in Composite Materials*, Pergamon Press, Oxford 1: 25-47.
- [91] AVESTON, J., KELLY, A. and SILWOOD, J. M., 1980, Long Term Strength of Glass Reinforced Plastics in Wet Environments, *Advances in Composite Materials*, Pergamon Press, Oxford 1: 556-568.
- [92] ROBERTS, R. C., 1982, Environmental Stress Cracking of GRP Implications for Reinforced Plastics Process Equipment, *Composites*, 13: 389-392.
- [93] ASTM G7-1983, Standard Practice for Atmospheric Environmental Exposure Testing of Nonmetallic Materials.
- [94] BLAGA, A., 1972, Weathering Study of Glass-fiber Reinforced Polyester Sheets by Scanning Electron Microscopy, *Polym. Engineering and Science*, 12(1): 53-58.
- [95] BLAGA, A. and YAMASAKI, R. S., 1973, Mechanism of Surface Microcracking of Matrix in Glass-reinforced Polyester by Artificial Weathering, *Journal of Material Science*, 8: 1331-1339.
- [96] NICHOLLS, R. L., 1985, Materials Selection Procedures, *Structural Plastics Selection Manual*, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 66, New York, 61.
- [97] DEWIMILLE, B., THORIS, J., MAILFERT, R. and BUNSELL, A. R., 1980, Hydrothermal Ageing of an Unidirectional Glass-fibre Epoxy Composite using Water Immersion, *Advances in Composite Materials*, Pergamon Press, New York, 1: 597-612.
- [98] DEWIMILLE, B. and BUNSELL, A. R., 1983, Accelerated Ageing of a Glass-fibre Reinforced Epoxy Resin in Water, *Composites*, 14: 35-40.
- [99] PRITCHARD, G., ROSE, R. G. and TANEJA, N., 1976, The Effect of Water on the Critical Stress Intensity Factor of Unsaturated Polyester Resin, *Journal of Material Science*, 11: 718-722.
- [100] RAMACHANDRAN, B. E., PAI, B. C. and BALASUBRAMANIAN, N., 1980, Studies on the Acid Resistance of E-Glass, *Journal of American Ceramic Society*, 63(1-2): 1-3.
- [101] WIEDERHORN, S. M., FULLER, J. R. and THOMSON, R., 1980, Micromechanisms of Crack Growth in Ceramics and Glasses in Corrosive Environments, *Metal Science*, (Aug.-Sep. 1980): 450-458.
- [102] WIEDERHORN, S. M. and BOLZ, L. H., 1970, Stress Corrosion and Static Fatigue of Glass, *Journal of American Ceramic Society*, 53: 543-548.

- [103] ELMER, T. H., 1984, Leaching of E-Glass, *Journal of American Ceramic Society*, 67: 778-782.
- [104] HOGG, P. J. and HULL, D., 1983, Corrosion and Environmental Deterioration of GRP, *Developments in GRP Technology*, Ed: HARRIS, B. Applied Science Publishers, London, 1st Edition, 1: 46.
- [105] Cam Elyaf San.A.Ş., 1984, Elyafli Kompozit Malzemeler Gurubu, CTP Teknolojisi, 1. Baskı, İstanbul, 155-161.
- [106] VAUGHAN, D. J. and McPHERSON, E. L., 1973, The Effects of Adverse Environmental Conditions on the Resin-glass Interface of Epoxy Composites, *Composites*, 4: 131-133.
- [107] LIFSHITZ, J. M., 1974, Time Dependent Fracture of Fibrous Composite Fracture and Fatigue, *Composite Materials*, Ed: BROUTMAN, L. J., 5: 261-263.
- [108] JONES, M. L. C. and HULL, D., 1979, Microscopy of Failure Mechanisms in Filament-wound Pipe, *Journal of Material Science*, 14: 165-174.
- [109] HULL, D., LEGG, M. J. and SPENCER, B., 1978. Failure of Glass/Polyester Filament wound pipe, *Composites*, 9:17-24
- [110] SPENCER, B. and HULL, D., 1978.Effect of Winding Angle on Failure of Filament Wound Pipe, *Composites*, 9:263-271
- [111] HULL, D. and HOGG, P. J., 1980, Nucleation and Propagation of Cracks During Strain Corrosion of GRP, *Advances in Composite Materials*, 1: 543-555.
- [112] LYONS, K. B. and PHILLIPS, M. G., 1981, Creep-rupture and Damage Mechanisms in Glass-reinforced Plastics, *Composites*, 13: 265-271.
- [113] CARSWELL, W. S. and ROBERTS, R. C., 1980, Environmental Fatigue Stress Failure Mechanism for Glass Fibre Mat Reinforced Polyester, *Composites*, 11: 265-271.
- [114] HOGG, P. J., HULL, D. and SPENCER, B., 1981, Stress and Strain Corrosion of Glass Reinforced Plastics, *Composites*, 12: 166-172.
- [115] PHILLIPS, M. G., 1983, Prediction of Long-term Stress-rupture Life for Glass Fibre-reinforced Polyester Composites in Air and in Aqueous Environments, *Composites*, 14: 270-275.
- [116] HARRIS, B., 1980, Micromechanisms of Crack Extension in Composites, *Metal Science*, (Aug.-Sep. 1980): 351-361.
- [117] CAPRINO, G. and CARRINO, L., 1980, Influence of Interlaminar Stresses on Fracture Toughness of Composite Laminates, *Advances in Composite Materials*, 1: 120-129.
- [118] HOGG, P. J. and HULL, D., 1980, Micromechanisms of Crack Growth in Composite Materials under Corrosive Environments, *Metal Science*, (Aug.-Sep. 1980): 441-449.



- [119] PRICE, J. N. and HULL, D., 1983, Propagation of Stress Corrosion Cracks in Aligned Glass Fibre Composite Materials, *Journal of Material Science*, 18: 2798-2810.
- [120] BAILEY, J. E., FRYER, T. M. and JONES, F. R., 1980, Environmental Stress-corrosion Edge-cracking of Glass Reinforced Polyesters, *Advances in Composite Materials*, 1: 514-528.
- [121] HULL, D., 1981, *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, 3rd Edition, 229.
- [122] JARAS, A. C., NORMAN, B. J. and SIMMENS, S. C., 1983, The Measurement of Glass Fibre Strength in Composites from Studies of Their Fracture Surfaces, *Journal of Material Science*, 18: 2459-2465.
- [123] Westergaard, H.M., 1939 Bearing Pressures and Cracks, *Transactions ASME, J. App. Mech.* ,
- [124] Irwin, G.R., 1957., Analysis of Stress and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate, *Transactions ASME, J. Appl. Mech.*, 24:
- [125] Sih, G.C., Paris, P.C. and Irwin, G.R., 1965, On Cracks in Rectilinearly Anisotropic Bodies, *Int. J. of Fracture Mech.* 1(3): 189-203
- [126] Sneddon, I.N., 1946, The Distribution of Stress in the Neighborhood of a Crack in an Elastic Solid, *Proceed. of the Royal Society, London, A.* 187: 229-260
- [127] Green, A.E. and Sneddon, I. N., 1946, The Distribution of Stress in the Neighbourhood of a Flat Elliptical Crack in an Elastic Solid, *Proceed. of Phil. Soc., London*, 58: 729-736.
- [128] Kobayashi, A. S., and Moss, W.L., 1968, Stress Intensity Magnification Factors for Surface Flawed Tension Plate and Notched Round Tension Bar, *Proceed. 2.nd Int. Conference on Fracture, Brighton, England 13-18 April*: 31-45
- [129] Nishioka, K., Hirokawa K. and Kitaura, I., 1977, Fatigue Crack Propagation Behaviors of Various Steels, *The Sumitomo Search* May 1977, 17: 39-55
- [130] Newman, J.C., Jr. and Raju, I.S., 1979, Analysis of Surface Cracks in Finite Plates Under Tension or Bending Loads, *NASA TP 1578*
- [131] Wang, S.S. and Mandell, J. F., 1977, Analysis of Delamination in Unidirectional and Crossplied Fiber-Composites Containing Surface Crack, *NASA CR- Washington, DC. May 1977.*