

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DENİZCİLİKTE KULLANILAN GRP / PVC**  
**SANDVIÇ YAPILARIN KIRILMA TOKLUĞUNA**  
**ÇEVRENİN ETKİSİ**

**Cemal KOÇHAN**

**Haziran, 2008**

**İZMİR**

# **DENİZCİLİKTE KULLANILAN GRP / PVC SANDVIÇ YAPILARIN KIRILMA TOKLUĞUNA ÇEVRENİN ETKİSİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Makine Mühendisliği Bölümü, Konstrüksiyon - İmalat Anabilim Dalı**

**Cemal KOÇHAN**

**Haziran, 2008**

**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**CEMAL KOÇHAN**, tarafından **YRD. DOÇ. DR. ÇİÇEK ÖZES** yönetiminde hazırlanan **“DENİZCİLİKTE KULLANILAN GRP/PVC SANDVIÇ YAPILARIN KIRILMA TOKLUĞUNA ÇEVRENİN ETKİSİ”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

---

---

Yönetici

---

---

Jüri Üyesi

---

---

Jüri Üyesi

---

Prof. Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim süresince bilgi ve deneyimi ile bana yol gösteren danışmanım Yrd. Doç. Dr. Çiçek ÖZES' e ve ikinci danışmanım, Dokuz Eylül Üniversitesi Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü Gemi İnşaatı Anabilim dalı öğretim üyesi Doç. Dr. Gökdeniz NEŞER' e teşekkür ederim.

Ayrıca deney numunelerinin TACAR Teknecilik' de üretim aşamasında gösterdikleri samimiyet ve yardım severliklerinden ötürü başta Mehmet Emin TACAR olmak üzere, TACAR ailesine ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Son olarak ellerindeki imkanları özverili şekilde kullanıp tüm hayatım boyunca beni destekleyen; babama, anneme ve biricik kardeşime çok teşekkür ederim.

Cemal KOÇHAN

# DENİZCİLİKTE KULLANILAN GRP / PVC SANDVIÇ YAPILARIN KIRILMA TOKLUĞUNA ÇEVRENİN ETKİSİ

## ÖZ

Bu tezde denizcilikte kullanılan PVC/GRP sandviç kompozitlerin kırılma tokluğuna çevrenin etkisi deneysel olarak incelenmiş ve deneysel çalışmayı doğrulamak için bir paket program ile sonlu elemanlar yöntemi analizi yapılmıştır.

İlk olarak on adet PVC (Poly Vinly Chloride) çekirdek ve GRP (Cam Takviyeli Plastik) yüzey malzemesinden oluşan sandviç numuneler el yatırması metodu ile üretilmiştir. Daha sonra beş adet numune, çekirdek malzemesinin yan yüzeyleri epoksi ile boyanıp Türk Standartları Enstitüsünde (TSE) yaşlandırma işlemine tabii tutulmuştur. Son olarak numunelerin kırılma tokluklarını araştırmak için Mod I çekme deneyi tüm on numune için uygulanmıştır.

Diğer taraftan sonlu elemanlar yöntemiyle yapılacak analizde kullanılmak üzere, kuru numune ve yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerin elastisite modülü ve Poisson oranı tespiti için yine çekme deneyleri yapılmıştır. Analiz sonuçları deney sonuçlarını yüzde 1 den daha az hata oranı ile doğrulamaktadır.

**Anahtar sözcükler:** Sandviç kompozit, kırılma tokluğu, Mod I çekme deneyi

# ENVIRONMENT EFFECT ON FRACTURE TOUGHNESS OF GRP / PVC SANDWICH SYSTEM IN MARINE USE

## ABSTRACT

In this thesis environmental effect on fracture toughness of PVC/GRP sandwich composite materials in marine use was experimentally studied and finite element analysis was performed by a packet program to verify experimental studies.

First of all ten PVC (Poly Vinly Chloride) core and GRP (Glass Reinforced Plastic) face sandwich composite specimens were produced by hand lay up method. After that, side areas of the core of five specimens were painted by epoxy and conditioned in Turkish Standartization Enstitute (TSE). Finally, to investigate fracture toughness of specimens Mode I tensile test was conducted for all ten specimens.

In conclusion, tensile tests were again performed to investigate tensile modulus and poisson ratios of dry and wet specimens which were required for FEM analysis. Finite element analysis results verified the test results by less than 1% error rate.

**Keywords:** Sandwich composite, fracture toughness, Mode I tensile test

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT .....	v
<b>BÖLÜM BİR -GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Kompozit Malzemeler.....	1
1.2. Sandviç Kompozitlerin Yapısı .....	2
1.3 Sandviç Kompozitin Çeşitleri .....	6
1.3.1 Yüzey Malzemesine Göre Sandviç Kompozitler .....	6
1.3.1.1 Cam Elyaf lar .....	8
1.3.1.2 Aramid Elyaf lar.....	9
1.3.1.3 Karbon Elyaf lar .....	10
1.3.2 Çekirdek Malzemesine Göre Sandviç Kompozitler.....	12
1.3.2.1 Çekirdek Malzemelerin Seçim Kriterleri .....	12
1.3.2.2 Temel Çekirdek Malzeme Çeşitleri .....	13
1.3.3 Yapıştırıcı (Reçine) Malzemesine Göre Sandviç Kompozitler.....	18
1.3.3.1 Polyester .....	19
1.3.3.2 Epoksi.....	22
1.3.3.3 Vinyl Ester .....	23
<b>BÖLÜM İKİ - GRP / PVC SANDVIÇ KOMPOZİTİN İMALATI VE KIRILMA TOKLUĞU KAVRAMI.....</b>	<b>26</b>
2.1 Problemin Tanımı .....	26
2.2 El Yatırması Metodu .....	26
2.1.1 GRP / PVC Sandviç Kompozitin İmalatı.....	28
2.2 Kırılma Tokluğu Kavramı.....	33

2.2.1 Kırılma Mekanik Analizi .....	35
2.2.1.1 Açığa Çıkan Şekil Değiştirme Enerjisi Yaklaşımı.....	36
2.2.1.2 Mod I Kırık Deformasyonu Deneyi .....	39
<b>BÖLÜM ÜÇ - UYGULANAN MOD I DENEYİ VE SONUÇLARI.....</b>	<b>41</b>
3.1 Uygulanan Mod I Deneyi.....	41
3.2 Deney Sonuçları .....	48
3.2.1 Kuru Numunelerin Sonuçları .....	49
3.2.2. Tuzlu Suda Bekletilmiş Numunelerin Deney Sonuçları .....	52
<b>BÖLÜM DÖRT - SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....</b>	<b>57</b>
4.1 Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Bulunması.....	57
4.2 Sonlu Elemanlar Analizi .....	59
4.2.1. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları.....	61
4.2.1.1 Kuru numune analiz sonuçları .....	61
4.2.1.2 Tuzlu suda bekletilmiş numunenin analiz sonuçları .....	64
<b>BÖLÜM BEŞ - DEĞERLENDİRME .....</b>	<b>66</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>67</b>

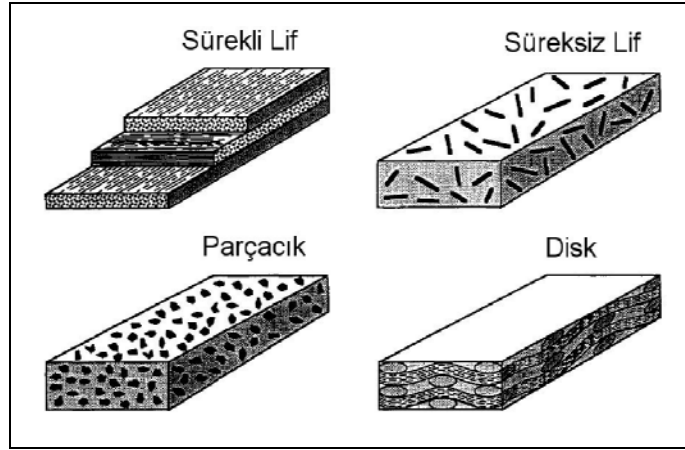


# BÖLÜM BİR

## GİRİŞ

### 1.1 Kompozit Malzemeler

Kompozit, iki veya daha çok bileşenden oluşan yapısal malzemedir. Bileşenler makroskobik alanda birleşirler ve birbirleri içinde çözünmezler. Bileşenlerden birisine takviye fazı, takviye fazının içine karıştığı diğer bileşene ise matris denir. Takviye fazı, matris içerisinde sürekli lif, süreksiz lif, parçacık veya disk halinde olabilir, Şekil 1.1 (KUTZ, 1998). Matris fazı ise devamlı bir yapıya sahiptir. (Kaw, 1997)



Şekil 1.1 Takviye elemanlarının malzeme içindeki formları.  
(Mechanical Engineers' Handbook, second edition, edit by  
Myer KUTZ, 1998, John Wiley & Sons, Inc. )

Kompozit malzemelerin uzay koşullarında ve havacılık sektöründe kullanım üstünlüklerini görmek için iki çarpıcı örnek vermekte yarar vardır.

Bilindiği gibi günümüz ileri teknolojisinin gerektirdiği mekanik değerleri, tek fazlı malzemeler ve alaşımları her zaman yakalayamazlar. Örneğin uyduda kullanılan malzemelerin, uzayda  $-160^{\circ}\text{C}$  ile  $93.3^{\circ}\text{C}$  arasındaki çalışma koşullarında boyutsal

olarak kararlı olması gerekir. Bu şartlarda kısıtlı ısı genleşme katsayısı değerlerine sahip metalik malzemeler kullanılamaz ve yerini grafit/epoksi gibi kompozitlere bırakır.(Kaw, 1997)

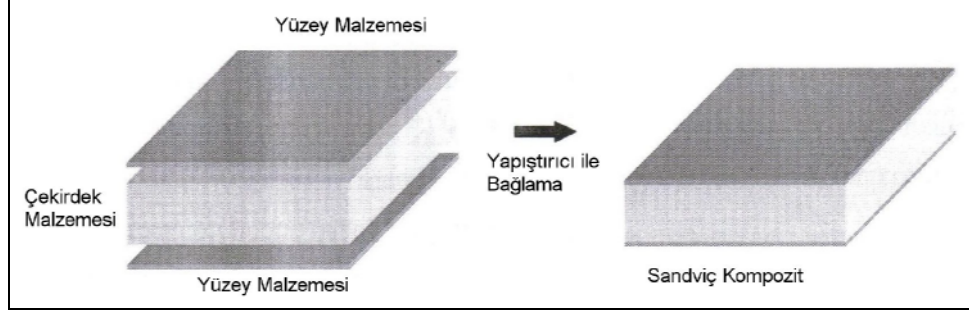
Kompozit malzemelerin kullanılması birçok alanda daha verimlidir. Uçak endüstrisinden bir örnek vermek gerekirse; ticari bir uçakta 0.453 kg ağırlık azaltılması ile senede 1360 litre yakıt tasarrufu yapılabilir. Burada belirtmek gerekirse ticari bir uçak şirketinin yıllık giderinin %25' ini yakıt harcaması oluşturmaktadır.(Kaw, 1997)

Kompozitlerin tekne imalatındaki yerine gelirse; günümüzde üretilen tekneler geçmiş yıllarda üretilenler ile karşılaştırılınca, gövde yapılarının daha büyük yüklere maruz kalacak istekleri karşılayacak şekilde üretildiği görülür. Burada imalatçıların rekabetçi tutumları da etkilidir. Örneğin bir sürat motoru imalatçısı, daha güçlü motor tercih etmekte iken; diğer taraftan bir yelkenli tekne imalatçısı paslanmaz çelik donanımlar, daha kısa salma boyu, daha geniş yelkenli alanı, sentetik malzemeden yelken kumaşları vs tercih etmektedir. Sonuç olarak bu tercihler tekne gövdesine gelen yüklerin artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenden ötürü tasarımcı daha hafif ve dayanıklı yapılar ile çalışmak zorunda kalmaktadır. Bu hafif ve dayanıklı yapılar ise kompozit malzeme teknolojisi ile mevcut hale gelir. ( Kolat, Neşer, Özes, 2006 )

Sandviç kompozitler, kompozit malzemelerin ileri bir uygulama alanını oluşturmaktadır; yani yukarıda verilen örneklerdeki üstünlükleri ve daha fazlasını içerirler. Bu nedenle sandviç kompozitlerin yapısını incelemekte fayda vardır.

## **1.2 Sandviç Kompozitlerin Yapısı**

Sandviç kompozitler üç ana bileşenden oluşurlar, Şekil 1.2. Birincisi yüksek mukavemetli, rijit yapıya sahip ince yüzey malzemesi; ikincisi kalın ve yüzey malzemesine göre daha hafif ve düşük mukavemetli çekirdek; son olarak üçüncüsü de bu iki malzemeyi yapışma ara yüzeyinde hasar oluşmayacak kadar güçlü şekilde bağlayan yapıştırıcı (reçine) malzemedir.



Şekil 1.2 Sandviç kompozit malzeme.

Sandviç kompozit yapı, katmanlı bir kompozittir. Bu katmanlı kompozitin oluşması ile kendini oluşturan bileşenlerin her birinin mekanik özelliklerinden daha üstün mekanik özelliklere sahip bir yapı ortaya çıkar. İki adet rijit, yüksek mukavemetli yüzey malzemesinin arasında yer alan, daha az mukavemet ve rijitliğe sahip hafif çekirdek malzeme sayesinde sandviç yapının ağırlığı da düşer. Bu sayede geleneksel imalat malzemeleri olan çelik ve alüminyum ile imal edilen teknelere nazaran daha hafif tekne imal edilebilir.

Sandviç kompozitlerin hafifliği nedeniyle, geleneksel imalat malzemeleri olan çelik ve alüminyum ile çalışan kimi mühendislerde, dayanıklı olmadığı önyargısı vardır. Bu önyargıyı kırmak için, bası yükü uygulanan aynı boy ve genişlikte dikdörtgen kesitli metalik ve sandviç kompozit iki malzeme ele alalım. Bu malzemelerin hasara uğrayacakları kritik yük şöyle tanımlanır:

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (1.1)$$

E: elastisite modülü

L: malzemelerin boyu

I: atalet momenti

Dikdörtgen kesitli malzeme için atalet momenti şöyle tanımlanır:

$$I = \frac{bt^3}{12} \quad (1.2)$$

b: malzemelerin genişliği




t: malzemelerin kalınlığı

Denklem (1.1)' den anlaşıldığı gibi, malzemelerin boyu aynı seçildiğinden kritik yük malzemelerin elastisite modülleri ve atalet momentleri ile orantılıdır. Bilindiği gibi elastisite modülü malzemelerin karakteristik bir özelliğidir ve daha yüksek elastisite modüllü malzeme kullanmak aslında daha üstün malzeme kullanmak demektir. Bu teorik olarak gerçekleşebilmekle beraber, imalatta maliyet söz konusu olduğu için çözüm getirmemektedir. Bu nedenle kritik yük sadece malzemelerin atalet momentleri ile orantılıdır diyebiliriz. Dikdörtgen kesitli malzemeleri için atalet momentleri Denklem (1.2) ile verilmiştir. Malzemelerin genişliği b= 1 olarak iki malzeme için aynı seçilmiştir. Böylece görüldüğü gibi kritik yük malzemelerin kalınlığının küpü ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

Tablo 1.1 de malzemelerin kalınlığındaki değişimden mukavemetlerinin, rijitliklerinin ve ağırlıklarının nasıl etkilendiği verilmiştir

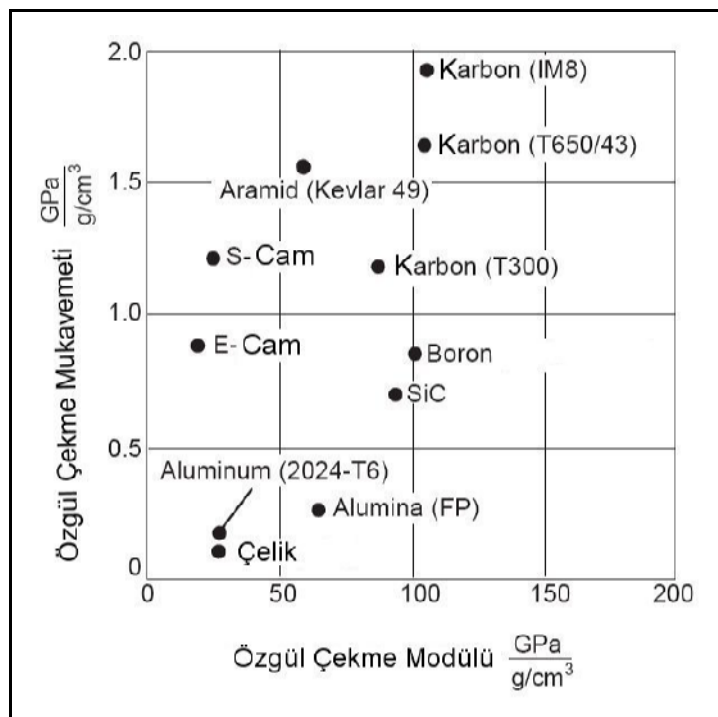
Tablo 1.1 Malzeme kalınlığı ve mekanik özellikler arasındaki ilişki

([http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/coursead/materiaiscompositos/compositomaterials/g\\_composite\\_materials.pdf](http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/coursead/materiaiscompositos/compositomaterials/g_composite_materials.pdf))

			
Bağıl Rijitlik	100	700	3700
Bağıl Mukavemet	100	350	925
Bağıl Ağırlık	100	103	106

Birinci sütunda t kalınlığındaki metalik malzeme , ikinci ve üçüncü sütunlarda ise çekirdek kalınlıkları sırası ile t ve 3t olan kompozit malzemeler yer almaktadır. Eğer metalik malzemenin değerleri 100 birim kabul edilir ise, görüldüğü gibi çekirdek kalınlığı t ve 3t olan sandviç kompozitlerde sırasıyla; rijitlik 7 kat ve 37 kat, mukavemet 3,5 kat ve 9,25 kat artış göstermiştir. Ağırlıklardaki artış ise ihmal edilebilir bir artıştır.

Şekil 1.3 de ise malzemelerin özgül çekme modülü – özgül çekme mukavemeti diyagramı halinde verilmiştir. Diyagramdan da rahatça görüldüğü gibi çelik ve alüminyum malzemelerin yüksek yoğunluğu olduğundan özgül çekme modülleri ve özgül çekme mukavemetleri, sandviç kompozitlerde kullanılan malzemelere göre düşüktür.



Şekil 1.3 Malzemelerin özgül çekme modülü-özgül çekme mukavemeti.

([http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/cursosead/materiaiscompositos/compositomaterials/g\\_composite\\_materials.pdf](http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/cursosead/materiaiscompositos/compositomaterials/g_composite_materials.pdf))

Farklı bir bakış açısı ile bakarsak, Hook kanununa göre malzemenin hasara uğradığı yük P şöyle tanımlanır:

$$P = \sigma A \quad (1.3)$$

$\sigma$  : gerilme

A : alan

Denklem (1.3) den anlaşıldığı gibi malzemelerin hasara uğradıkları yük alanları ile doğru orantılıdır. Yani metalik bir malzeme ile aynı ağırlıktaki sandviç kompozit malzeme daha büyük alana sahip olur. Bu da sandviç kompozit malzemenin hasara uğrayacağı yük daha büyük olur demektir.

### 1.3 Sandviç Kompozitin Çeşitleri

Sandviç kompozitin çeşitlerinden kasıt aslında sandviç kompoziti oluşturan bileşenlerin çeşitleridir. Başlık 1.2 altında bahsedildiği gibi sandviç kompozitler yüzey malzemesi, çekirdek malzemesi ve yapıştırıcıdan oluşur. Böylece sandviç kompozitler; yüzey malzemesine göre, kullanılan çekirdek malzemesine göre, ve de reçine türüne göre çeşitlilik gösterir.

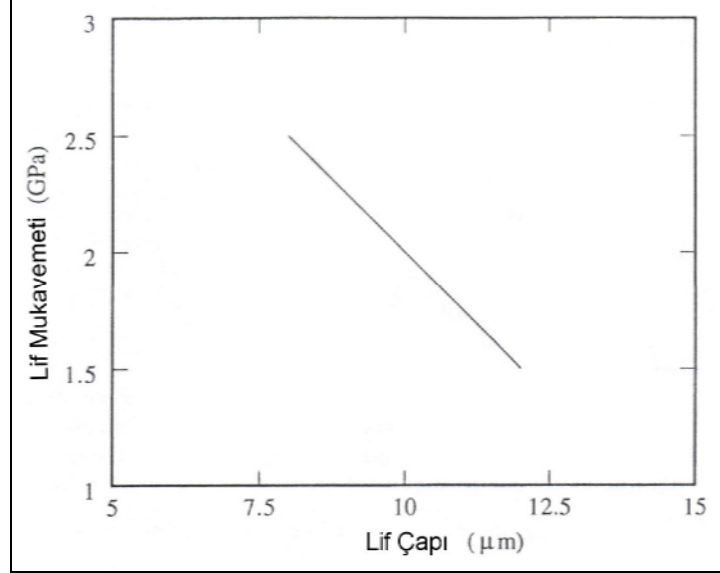
#### 1.3.1 Yüzey Malzemesine Göre Sandviç Kompozitler

Yüzey malzemesi matris yapı ve takviye elemanından oluşmaktadır. Kullanılan takviye elemanı matris yapı içinde lif, parçacık veya disk halinde olabilir (Şekil 1.1). Ancak bu tezin konusu lif (elyaf) takviyeli plastikler (Fiber Reinforced Plastic) ile ilgili olduğundan diğer türlerin ayrıntısına girilmeyecektir.

Elyaf takviyeli yüzey malzemelerinde yüksek mukavemet için küçük çaplı lif kullanmak gerekir. Bunun sebepleri şöyle sıralanabilir (Kaw,1997):

i) Malzemeler gerçekte, teorik mukavemetinden daha düşük mukavemet değerlerine sahiptir. Bu fark malzeme içindeki hatalardan kaynaklanır. Bu hataların yok edilmesi malzemenin mukavemetini artırır. Liflerin çapı küçültüldüğünde,

içlerinde olabilecek hatalar da azaldığından mukavemetleri artmaktadır. Örneğin 689 MPa mukavemeti olan çelik bir plakadan tel imal edilir ise bu çelik 4100 MPa mukavemete sahip olabilir. Şekil 1.4 de karbon liflerin mukavemet artışının lif çapına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 1.4 Lif çapına göre lif mukavemeti. (Kaw, 1997)

ii) Yüksek duktilite, tokluk, ve matris-lif arasında daha iyi yük transferi için, matris-lif ara yüzey alanının daha büyük olması gerekir. Hacimsel olarak eşit lif miktarına sahip kompozitlerde, lif-matris ara yüzey alanı lif çapı ile ters orantılı olarak artar. Çünkü lif çapı düşürüldüğünde, hacimsel olarak aynı lif miktarını elde edebilmek için lif sayısı arttırılmalıdır. Buda lif-matris ara yüzey sayısını yani ara yüzey alanını arttırır.

iii) Kompozit malzemelerin, özellikle örgülü kompozitlerin, üretiminde istenen liflerin kırılmadan eğilebilmesidir. Eğilme kabiliyeti lif çapının azalması ile artar, ve esneklik olarak ölçülür. Esneklik, eğilme rijitliğinin tersi olarak tanımlanır. Esneklik, malzemenin çapının dördüncü kuvveti ile, ve elastisite modülü ile ters orantılıdır. Bu şöyle kanıtlanabilir:

Malzeme mukavemetinden bilindiği gibi, eğilme mukavemeti eğilme momentine gösterilen dirençtir. Eğer bir kiriş saf eğilmeye maruz ise;

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad \text{olur} \quad (1.4)$$

v: merkez hattaki deformasyon (m)

E: kirişin elastisite modülü (Pa)

I: kirişin atalet momenti (m<sup>4</sup>)

x: kiriş boyunca koordinat (m)

Böylece eğilme rijitliği 'EI' olur ve esneklik basitçe 'EI' nin tersidir. Dairesel kirişin atalet momenti

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad \text{olduğundan} \quad (1.5)$$

$\frac{1}{Ed^4}$  Esneklik ile orantılıdır.

Belli malzemelerde elastisite modülü mukavemette olduğu gibi çapın fonksiyonu olarak değişmez. Bu nedenle esneklik lif çapının dördüncü kuvveti ile ters orantılıdır.

Tekne imalatında kullanılan elyaf takviyeli yüzey malzemesi türlerini inceleyecek olursak:

#### *1.3.1.1 Cam Elyaflar*

Üretilmesi pahalı olmadığından, ve ağırlıkla ilişkili olarak daha yüksek mukavemet gösterdikleri için cam elyaf takviyeli plastiklerde %90 dan fazla kullanılırlar. Cam elyaf ayrıca iyi kimyasal direnç gösterirler ve işlenebilirlikleri yüksektir.

Cam elyaf temel olarak E-camı (fiberglass-cam elyaf) ve S-camı olarak iki türü vardır. E-camı aslında elektrik uygulamaları için dizayn edilmiş fakat daha sonraları farklı uygulamalar için de kullanılmaya başlanmıştır (Kaw, 1997). Örneğin E-camı iyi mukavemet özelliği ve suya direncinden dolayı, tekne imalatında en fazla kullanılan



elyaf türüdür. S-camı, E-camına göre üç kat daha yüksek çekme mukavemeti ve daha iyi yorulma direnci gösterir. Buna rağmen, maliyeti E-camından üç ila dört kat fazla olduğu için E-camı tercih edilir. Tablo 1.2 de E-camı ve S-camının özellikleri verilmiştir. Bununla beraber değişik özellikte cam elyaflar farklı türde uygulamalar için üretilebilir. Örneğin görünümün iyi olması istenen uygulamalar için A-camı, korozyon dayanımı istenen uygulamalar için C-camı bulunmaktadır. Bu çeşitlerin beraber kullanıldığı uygulamalar da vardır. Mesela E-CR hem elektrik hem korozyon dayanımı gerektiren uygulamalar için kullanılır.

Tablo 1.2 E ve S cam elyaf bileşenleri

([http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/coursead/materiaiscompositos/compositomaterials/g\\_composite\\_materials.pdf](http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/coursead/materiaiscompositos/compositomaterials/g_composite_materials.pdf))

<b>Cam Bileşenleri</b>	<b>E Camı</b>	<b>S Camı</b>
Silikon Dioksit	52-56%	64-66%
Kalsiyum Oksit	16-25%	0-0,3%
Alüminyum Oksit	12-16%	24-26%
Boron Oksit	5-10%	-
Sodyum ve Potasyum Oksit	0-2%	0-0,3%
Magnezyum Oksit	0-5%	9-11%
Demir Oksit	0,05%-0,4%	0-0,3%
Titanyum Oksit	0-0,8%	-
Floridler	0-1%	-

### *1.3.1.2 Aramid Elyaflar*

En bilinen aramid elyaf türü DuPont tarafından bulunan Kevlar dır. Kevlar 1970 lerden buyana kullanılmaktadır. Düşük ağırlık, yüksek çekme mukavemeti ve modülü, yüksek darbe ve yorulma direnci ve örülebilirliği aramidlerin avantajlarıdır. Bası performansları düşük şekil değiştirme değerlerinde doğrusal olmayan düktil davranış gösterdiklerinden cam elyaf kadar iyi değildir.

Günümüzde Kevlar 29 ve Kevlar 49 türleri vardır. Düşük yoğunlukta, yüksek dayanımdaki Kevlar 29, mermi çarpmasına karşı koruyucularda, ip ve kablo yapımında kullanılmaktadır. Kevlar 49 ise düşük yoğunlukta olup, yüksek dayanım ve modüle sahiptir. Kevlar 49, denizcilikte, hava-uzay sanayisinde, otomobil ve diğer sanayi dallarında kullanılan kompozit malzemeleri güçlendirici lifler olarak kullanılabilen özelliklere sahiptir.

### *1.3.1.3 Karbon Elyafı*

Genelde grafit ve karbon terimleri birbiri yerine kullanılır. Oysa grafit elyafı %99 dan fazla karbon içeriğine sahip iken, karbon elyafı %93 ile %95 arasında karbon içeriğine sahiptir. Ayrıca karbon elyafı 1316 °C de üretilirken, grafit elyafı 1900 °C den yüksek sıcaklıklarda üretilirler. (Kaw, 1997) Bununla beraber. Karbon elyafı en fazla PAN (polyacrylonitrile) malzemeden üretilirler.

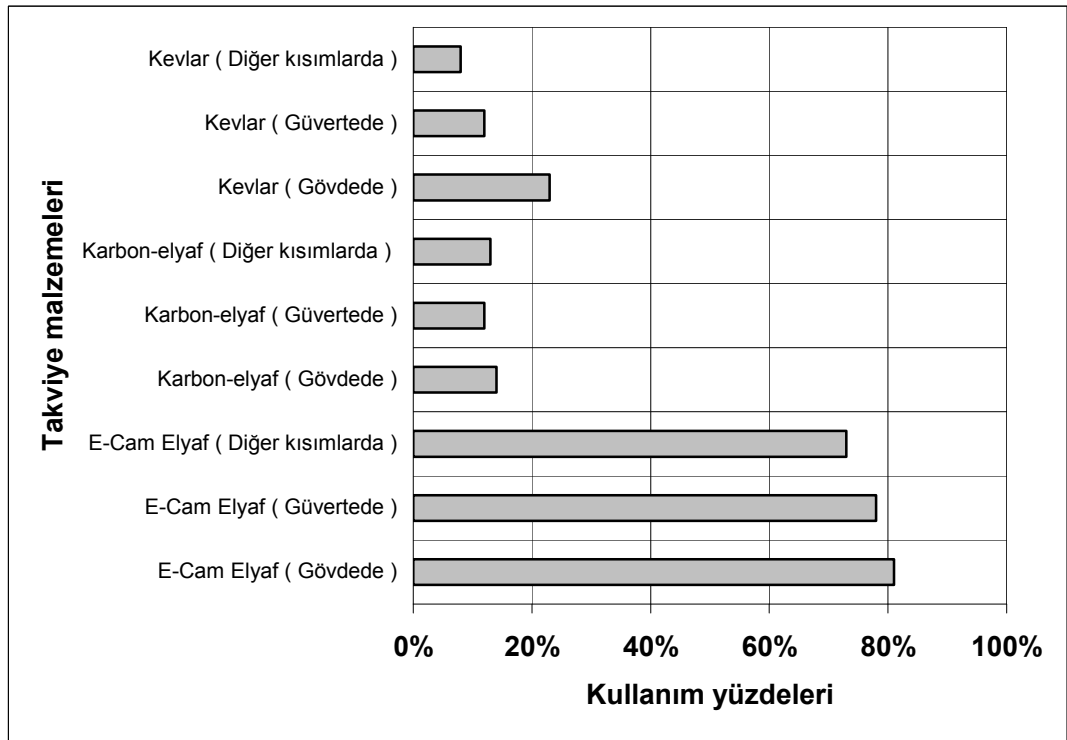
Sık kullanılan takviye malzemeleri içinde en yüksek mukavemeti ve eğilme direncini karbon elyafı gösterir. Karbon elyafı, cam elyafında olduğu gibi gerilme kırılmalarına ve yorulmalarına konu olmazlar. Yüksek sıcaklık performansı karbon elyafının önemli bir avantajıdır. Diğer taraftan en önemli dezavantajı, PAN nın öbür takviye malzemelerine göre daha pahalı olmasıdır.

Tablo 1.3 de takviye malzemelerinin bazı mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı verileri ve Şekil 1.5 ile çeşitli elyaf takviye malzemelerinin tekne imalatında kullanılan yerleri ve kullanım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 1.3 Yüzey takviye malzemelerin mekanik özellikleri

([http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/coursead/materiaiscompositos/compositomaterials/g\\_composite\\_materials.pdf](http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/coursead/materiaiscompositos/compositomaterials/g_composite_materials.pdf))

Elyaf	Yoğunluk	Çekme Mukavemeti	Çekme Modülü	Maksimum Uzama	Maliyet 1995
	gr/cm <sup>3</sup>	MPa	GPa	%	\$/kg
<b>E Camı</b>	2,60	3450	72,45	4,8	1,76-2,64
<b>S Camı</b>	2,49	4589	86,94	5,7	8,82
<b>Kevlar 49</b>	1,44	3623	124,2	2,9	35,27
<b>Karbon-PAN</b>	1,72-1,8	2415-4830	227-393	0,38-2,0	37,47-992



Şekil 1.5 Elyafların yat sektöründeki kullanım yüzdeleri.

([http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/coursead/materiaiscompositos/compositomaterials/g\\_composite\\_materials.pdf](http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/coursead/materiaiscompositos/compositomaterials/g_composite_materials.pdf))

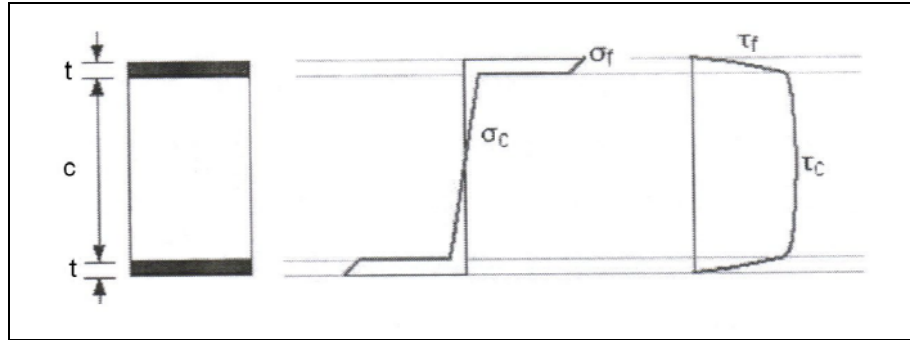
([http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/coursead/materiaiscompositos/compositomaterials/g\\_composite\\_materials.pdf](http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/coursead/materiaiscompositos/compositomaterials/g_composite_materials.pdf))

### 1.3.2 Çekirdek Malzemesine Göre Sandviç Kompozitler

Ağırlığın azaltılması ve yapısal özelliklerin iyileştirilmesi yönünde hız kesmeyen çalışmalar, sandviç kompozit yapıların çok popüler olmasını sağlamıştır. Bilindiği gibi sandviç yapıların prensibi; esas yükü taşıyan yüzeylerin, düşük yoğunluklu çekirdek malzeme tarafından ayrılmasıdır. Bu, kirişin veya panelin, ağırlığındaki az bir artış ile atalet momentinin artmasını sağlar. Optimum tasarımı elde etmek için sadece yüzeyin değil çekirdek malzemenin de doğru seçilmesi gereklidir. Burada çekirdek malzemelerin seçim kriterleri konu edildikten sonra en çok kullanılan çekirdek malzemelerin özelliklerine değinilecektir.

#### 1.3.2.1 Çekirdek Malzemelerin Seçim Kriterleri

1.3.2.1.1 *Önemli Mekanik Özellikler.* Öncelikle belirtilmesi gerekir ki, çekirdek malzemeden beklenen özellikler her uygulama için değişiklik gösterir. Bu nedenle, seçim kriterlerini genelleştirmek çok zordur. Bununla beraber, incelemek için Şekil 1.6 deki eğilme yükü altındaki bir sandviç malzeme iyi bir örnek olacaktır.



Şekil 1.6 Eğilme yükü altındaki sandviç kiriş. (Schlotter, Haziran, 2002)

Bu türde bir yüklemde, görüldüğü gibi yüzey malzemesi çeki-bası yüklerine ve çekirdek malzemesi büyük ölçüde kesme yüküne maruz kalmaktadır. Buradan, çekirdek malzemenin en önemli özelliklerinin başında kesme mukavemeti ve rijitliği olduğu anlaşılmaktadır.

Bununla beraber sadece kesme mukavemeti ve rijitlik çekirdek malzemenin değerlendirilmesinde yeterli değildir. Özellikle ince katmanlamalı düşük ağırlık uygulamalarında çekirdeğin bükülmesini veya katlanmasını önlemek için çekirdek bası yüküne dayanabilmelidir. Diğer bir önemli hasar durumu ise, yüzey malzemesi ile çekirdek malzemesinin ayrılmasıdır. Örneğin polimer matrisli kompozit yüzeylerde köpük malzeme çekirdeğe, epoxy kullanılarak bağlanır. Böylece bağlantı, çekirdek malzemedan çoğunlukla daha dayanıklı olur ve hasar genelde köpük malzemedede görülür. Bu nedenle çekirdeğin çekme dayanımı da hesaba alınması gerekli bir özelliktir.

*1.3.2.1.2 Çekirdek Malzemedan Beklenen Diğer Özellikler.* Bahsedildiği gibi, çekirdek olarak hangi malzemenin kullanılacağı kararı verilmeden önce, uygulama alanının bilinmesi gereklidir. İhtiyaç duyulabilecek bazı özellikler şunlardır:

- ✓ Düşük maliyet
- ✓ Düşük yoğunluk
- ✓ Düşük / yüksek sıcaklığa direnç
- ✓ Neme veya kimyasallara direnç
- ✓ Şekil verilebilmesinin iyi olması
- ✓ Kolay işlenebilirlik

Düşünüldüğünde, bu amaçların tümünü için tek malzeme olmadığından, amaca uygun özel seçimler olduğu görülmektedir.

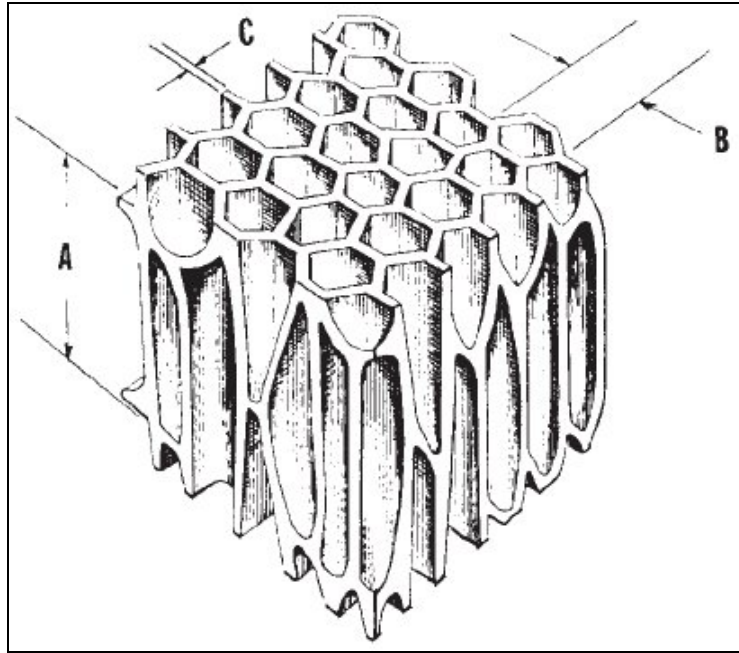
#### *1.3.2.2 Temel Çekirdek Malzeme Çeşitleri*

Sandviç kompozitlerde kullanılacak birçok türde malzeme olmasına rağmen, çoğu şu kategorilerden birine girer: ağaç, köpük, balpeteği.

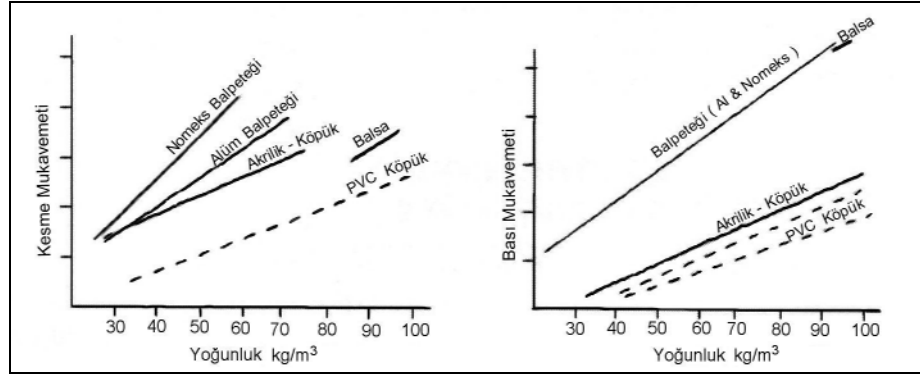
*1.3.2.2.1 Ağaç.* Diğer malzemelere göre ağaç, çoğunlukla yüksek yoğunluğa sahip olduğundan az türde ağaç sandviç kompozit için çekirdek malzeme olarak kullanılmaktadır. İçlerinde de en fazla kullanılan ağaç türü, balsadır.

Balsa ağacı (Şekil 1.7), ince-uzun yatay hücreleriyle çok yüksek bası dayanımı ve çarpışma direnci sağlar. Tekrarlı yüklerde çalışma kabiliyeti yüksektir, ve çok güçlü yüzey-çekirdek bağlantısı sağlanabilir. Bir çok köpük malzemedan farklı olarak, yüksek çalışma sıcaklıklarına dayanıklıdır. Balsa ağacının statik mukavemeti, PVC köpükten yüksek olmasına rağmen; darbe enerjisini emmesi PVC köpükten daha düşüktür. Balsa iyi bir ısı ve ses yalıtkanıdır. Ayrıca balsa ile basit araç gereçler kullanılarak kolayca çalışılabilir.

Diğer taraftan, balsa doğal bir malzeme olduğu için neme karşı hassastır. Eğer katmanlama veya yapıştırıcı ile iyi bir şekilde çevrenmez ise, çürüyebilir. Balsa ağacının diğer dezavantajları da,  $90 \text{ kg/m}^3$  civarındaki minimum yoğunluğunun, yüksek olması (Şekil 1.8) ve katmanlama süresince yüksek miktarda yapışkan emmesidir.



Şekil 1.7 Balsa ağacının hücre yapısı. A: ortalama hücre boyu; B: ortalama hücre çapı; C:ortalama hücre et kalınlığı. ([http://www.oceanica.ufjf.br/ocean/cursousead/materiaiscompositos/compositematerials/g\\_composite\\_materials.pdf](http://www.oceanica.ufjf.br/ocean/cursousead/materiaiscompositos/compositematerials/g_composite_materials.pdf))



Şekil 1.8 Çekirdek malzemelerin yoğunluk-kesme/ bası mukavemeti ilişkisi. (Schlotter, Haziran, 2002)

*1.3.2.2.2 Köpükler.* Köpükler çeşitli sentetik polimerlerden üretilirler. Ayrıca, hemen hemen her köpük çeşitli yoğunlukta tedarik edilebilir. Sonuç olarak birçok çeşit köpük bulunabilir. Bu çeşitlilik sayesinde köpük, özellikle karmaşık sandviç çekirdek malzemesi olmak üzere, geniş uygulama alanı bulur.

Köpüklerin temel olarak sınıflandırılması ve avantaj-dezavantajları şöyledir:

i) Polyvinyl Chloride Köpükler (PVC) yüksek performanslı sandviç yapılarda sıkça kullanılırlar. Statik ve dinamik özelliklerinin iyi olmasının yanında, çalışma sıcaklık aralığı geniştir ve birçok kimyasala direnç gösterirler. İki çeşit PVC bulunmaktadır: çapraz bağlı (non-lineer) ve doğrusal (lineer). Çapraz bağlı PVC daha sert ve rijit iken, doğrusal PVC daha tok ve esnektir.

ii) Polystyrene Köpükler (PS) düşük mekanik özellikleri ile ucuz ürünlerdir. Genelde sörf tahtası imalatında kullanılırlar. Sterin ile çözüdüğü için polyester yapışkan ile kullanılmazlar.

iii) Polyurethane Köpükler (PU) düşük yüklere maruz sandviç yapılarda ve ısı izolasyonu için kullanılabilirler. Mekanik özellikleri orta derecededir. Köpük-yüzey yapışma yüzeyinin yaşlanma ile kötüleşmesi dezavantajdır.

iv) Polyetherimide Köpükler (PEI) nispeten yenidir. Yangın dayanımları iyidir ve geniş çalışma sıcaklığı aralığına sahiptir. Pahalı olmalarına rağmen, uçak ve tren uygulamaları için çok uygundur.

v) Polymethyl Methacrylamide Köpükler (Acrylic) Üstün derecede özgül dayanımları ve rijitliği vardır ve yüksek ısı kararlılığı sayesinde, yüksek sıcaklıkta kürlenmede kullanılabilirler.

vi) Styreneacrylonitrile Köpükler (SAN), PVC köpükler ile benzer özelliklere sahip olmalarının yanında, daha ince-uzun yapıları, yüksek tokluğu, yüksek sıcaklık performansı ve daha iyi statik özellikleri vardır. Bu nedenlerle birçok alanda SAN köpükler, PVC köpüklerin yerini almaktadır.

*1.3.2.2.3 Balpetekleri.* Balpeteği çekirdekleri de çeşitli uygulamalar için mevcuttur. Ucuz karton balpeteklerinden olağan üstü özelliklere sahip aramid ve alüminyum balpeteklerine kadar çeşitlilik gösterirler. Her çeşidi farklı yoğunluk, kalınlık ve hücre çapına sahiptir. Nomex ve alüminyum balpetekleri genellikle, köpüklerin uygun olmadığı, yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılırlar. Bunun yanında balpeteği, çekirdek kalınlığı farklılık gerektiren durumlarda kullanılmaz. Açık hücre yapısından dolayı, sıvı yapıştırıcı kullanılarak üretiminde birtakım zorluklar vardır. Balpeteği çeşitleri:

i) Nomex balpeteği, Nomex kağıdının bir formudur. Nomex kağıdı selülozik lifler yerine, Kevlar malzemesinden oluşur. Nomex balpeteği uçak-uzay uygulamalarında geniş kullanım alanına sahip olmasının yanında, mekanik özelliklerinin iyi olması nedeniyle diğer alanlarda da giderek popüler olmaktadır. Öte yandan diğer çekirdek malzemeleri ile karşılaştırıldığında pahalıdır.

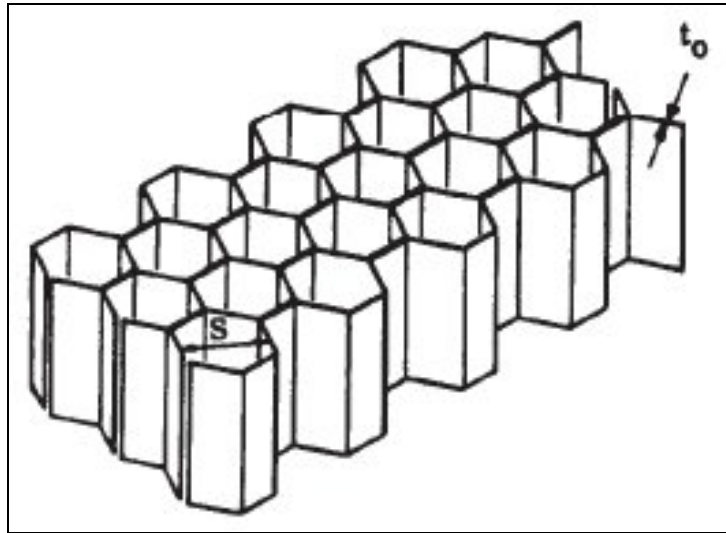
ii) Alüminyum balpeteği, Nomex balpeteğinden ucuz olmakla beraber benzer mukavemet ve rijitlik gösterirler. Deniz uygulamalarında ve karbon ile yüzey katmanlama sırasında korozyon problemine karşı dikkatli kullanılmalıdır.



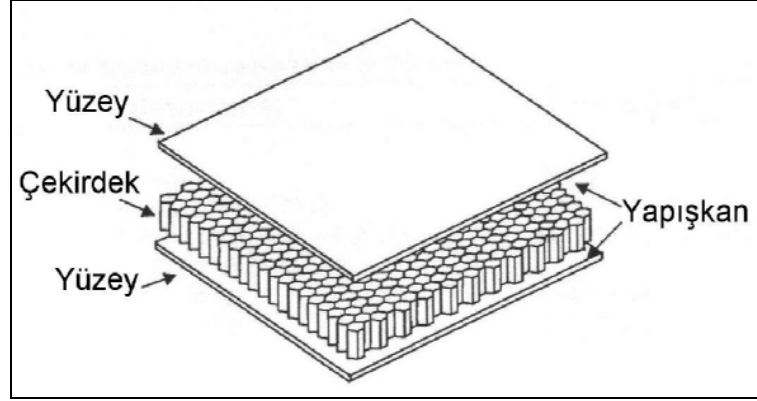
Delaminasyon oluşmaması için, yüzey-çekirdek bağlantısının korunması gerekir ve bu ancak kaliteli yapıştırıcı kullanarak başarılabilir.

iii) Termoplastik balpeteği, genelde düşük yoğunluk ve düşük rijitliğe sahiptir. Sık kullanılan polimerlerden bazıları ABS, polikarbonat, polipropilen, ve polietilendir. Birçok kimyasala direnç gösterirler ve nemden etkilenmezler. Ana problem yüzey-çekirdek arasındaki bağın kurulmasıdır.

Şekil 1.9 ile balpeteği hücre yapısı, Şekil 1.10 ile balpeteği çekirdekli bir sandviç kompozit, Tablo 1.4 ile tekne imalatında kullanılan çekirdek malzemelerin mekanik değerleri verilmiştir.



Şekil 1.9 Balpeteği hücre yapısı.  $t_0$ : hücre ortalama et kalınlığı,  
 $s$ : ortalama hücre çapı.  
 ([http://www.oceanica.ufjf.br/ocean/cursosead/materiaiscompositos/compositomaterials/g\\_composite\\_materials.pdf](http://www.oceanica.ufjf.br/ocean/cursosead/materiaiscompositos/compositomaterials/g_composite_materials.pdf))



Şekil 1.10 Balpeteği çekirdekli sandviç kompozit.  
(A. Ural vd Engineering Fracture Mechanics, 2003)

Tablo 1.4 Tekne imalatında kullanılan çekirdek malzemelerin mekanik özellikleri

([http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/corsosead/materiaiscompositos/compositomaterials/g\\_composite\\_materials.pdf](http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/corsosead/materiaiscompositos/compositomaterials/g_composite_materials.pdf))

Çekirdek	Yoğunluk	Çekme Mukavemeti	Çekme Modülü	Maksimum Uzama	Maliyet 1995
	gr/cm <sup>3</sup>	MPa	GPa	%	\$/kg
Balsa Ağacı	0,11	9,11	2,55	-	8,16
Doğrusal PVC	0,08-0,1	1,38	0,06	30	11,46
Çapraz bağlı PVC (Diab H 100)	0,10	3,11	0,12	-	13,11
Balpeteği (Nomex HRH-78)	0,10	-	0,41	-	29,25

### 1.3.3 Yapıştırıcı (Reçine) Malzemesine Göre Sandviç Kompozitler

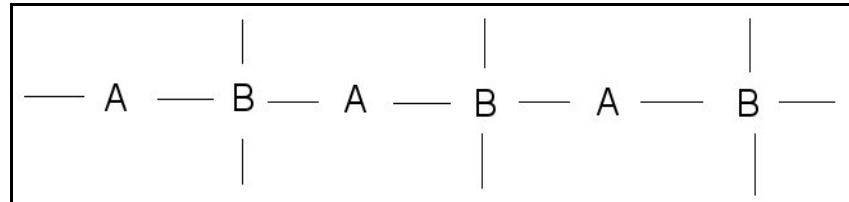
Takviye elemanının da içinde yer aldığı reçine, sandviç kompozitin ana fazını oluşturur. Ayrıca yüzey malzemesi ile (takviye malzemesi) çekirdek malzemesinin yapıştırılmasında görev alır. Tek başlarına kullanıldıklarında düşük olan mukavemet değerlerine sahiptirler. Tekne imalatında en sık kullanılan reçine çeşitleri şunlardır: polyester, epoksi, vinyl ester.

### 1.3.3.1 Polyester

Polyester reçineler iki grup altında toplanabilir: doymuş (katı) halde ve doymamış (sıvı) halde. Plastik takviyeli tekne imalatında, özellikle el yatırması yönteminde kullanılan malzeme doymamış polyester reçinedir. Bu demek oluyor ki polyester reçineler doğru koşullar altında kürlenme ile katı hale gelebilirler.

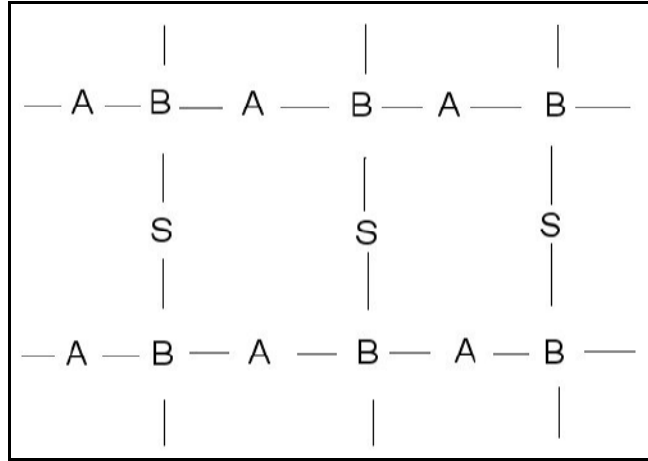
Polyetilen teraftalen, terilen gibi doymuş polyester reçineler veya termoset doğasındaki plastikler genelde enjeksiyon kalıpta ve lif (fiber) imalatında kullanılırlar.

Artık basit olarak, polyester denildiğinde, doymamış polyester akla gelmektedir. Bunlar monomer içinde, ki bu monomer genellikle sterindir, çözülmüş polyester içerir. Sterinin buradaki görevi çok önemli olup reçinenin sıvı halden polyesterin monoküler zincir bağlarını çapraz bağlayarak (kürlenme) katılaşmasını sağlamaktır. Polyester bu sayede basınç kullanılmadan kalıplanabilir. Bu nedenle polyester düşük basınç reçinesidir. Polyesterin moleküler bağ zinciri Şekil 1.11 ile gösterilmiştir.



Şekil 1.11 Polyester moleküler bağ zinciri.

Sterin -s-, katalizör ve hızlandırıcı eklenmesiyle, sterin polymer zincirini çapraz bağlar ve oldukça karmaşık üç boyutlu bağlar oluşturur, Şekil 1.12.



Şekil 1.12 Kürlenmiş polyester moleküler bağ zinciri.

Bu durumdan sonra polyester için kürlenmiş denilebilir. Artık kimyasal olarak dirençli ve (genelde) katı haldedir. Çapraz bağlanma veya kürlenme işlemi polimerizasyon adını alır.

Polyesterin kürlenmesini ısıtma yapılmadan hızlandırmak için hızlandırıcı ve katalizör ilave edilir. Jel zamanı, çevre sıcaklığı ve laminasyon kalınlığı göz önüne alınarak, formülasyonu dikkatlice değiştirmek yoluyla kontrol edilmelidir. Tablo 1.5 ile kürlenme için en sık kullanılan, hızlandırıcı ve katalizör kombinasyonları görülmektedir.

Tablo 1.5 Polyester reçine hızlandırıcı ve katalizör kombinasyonları

([http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/coursead/materiaiscompositos/compositomaterials/g\\_composite\\_materials.pdf](http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/coursead/materiaiscompositos/compositomaterials/g_composite_materials.pdf))

<b>Katalizör</b>	<b>Hızlandırıcı</b>
Metil Etil Keton Peroksit (MEKP)	Kobalt Naptanat
Kumene Hidroperoksit	Manganez Naptanat

Reçine içine farklı ek malzemelerde olabilir. Örneğin reçine dikey yüzeylerin laminasyonunda kullanılacak ise akışkanlığını azaltmak amacıyla içine silikon dioksit eklenebilir bu durumda reçine tiksotrafik olarak adlandırılır. Çeşitli diğer ilave malzemeleri de kürlenme sırasında reçine içinde, örneğin jelkot için önemli bir durum olan büzülmeyi önlemek için kullanılabilir.

Polyester reçineler kullanımı en kolay ve iyi kimyasal direnç gösteren, en basit ve en ekonomik reçine sistemidir. Doymamış (sıvı) polyester maleik anhidrid veya fumarik asit gibi, sterin benzeri reaktif monomerler içinde çözünen doymamış malzemelerden oluşur.

Polyester reçinelerin büyük çoğunluğu hava ile tepkimeye giren malzemelerdir. Hava ile tepkime gerçekleşir ise bu durumda kürlenme durur. (Şekil 1.11 ve Şekil 1.12 incelenirse; sterin -s-, gelecek bağa oksijen bağlanır ve kürlenmeyi durdurur). Yüzeğe sürülen cila tabakası ikincil bağlanma veya bitiş problemi oluşturduğundan ve fiziksel olarak temizlenmesi gerektiğinden; tipik olarak kürlenme işlemi sırasında yüzeyin hava ile tepkimeye girmesini önlemek için reçine formülüne parafin eklenir.

Tekne imalatında kullanılan polyester reçineler ortofitalik ve isofitalik olmak üzere iki çeşittir. Ortofitalik reçine, polyesterin geliştirilen orijinal grubudur ve hala geniş kullanım alanına sahiptir. Bunlar bir şekilde sınırlı ısı kararlık, kimyasal direnç ve işlenebilirlik karakteristiği gösterir. Diğer taraftan isofitalik reçineler genel olarak daha iyi mekanik özellikler ve kimyasal direnç gösterirler. İsofitalik reçinelerin artan su geçirme direnci, birçok tekne imalatçısının bu reçineleri tekne laminasyonunda jelkot olarak kullanmasına neden olmaktadır.

Polyester reçinenin rijitliğini kullanılan doymuş asidin doymamış aside oranını artırılması ile azaltmak mümkündür. Esnek reçineler artan darbe direnci sağlayarak avantajlı olabilir. Ancak bu tüm gövde mukavemetinin maliyetini yükseltme noktasına gider. Jelkot gibi yapısal olmayan laminasyon katmanları yerel kırıkları önlemek için daha esnek formüle edilebilir.

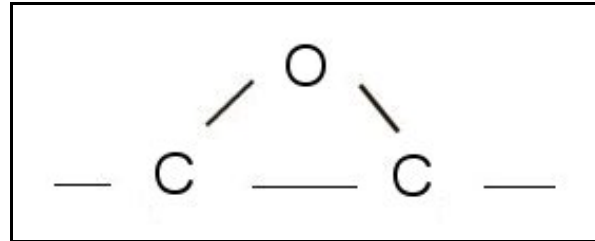
Polyester düşük maliyeti ve şeffaf yapı oluşturmadaki kabiliyeti ile avantajlı iken; çalışma sıcaklığının 77 °C den düşük olması, kırılabilirliği ve kürlenmede %8' e varan büzülmesi ile dezavantajlı durumdadır. Tablo 1.6 ile ilavesiz isofitalik polyesterin özellikleri verilmiştir.

Tablo 1.6 Katkısız isofitalik polyester reçine özellikleri  
(Crystic polyester handbook, Scott Bader, 1994)

Özgül Ağırlık ( $\text{gr/cm}^3$ )	1,28
Rockwell M ölçek sertliği	110
Barcol sertliği (GYZJ 934-1)	45
Çekme mukavemeti	70 MPa
Bası mukavemeti	140 MPa
Çekme modülü	3,5 GPa
Kırılmadaki uzaması	% 2,5
Özgül ısı	2,3 kJ / kgK
Isıl iletkenlik	0,2 W / mK
Su emmesi, 20 °C de 24 saat	% 0,2
Statik sürtünme katsayısı	0,27

### 1.3.3.2 Epoksi

Epoksi molekül yapısı Şekil 1.13 ile gösterildiği gibi; bir oksijen iki karbondan oluşur.



Şekil 1.13 Epoksi reçinenin moleküler yapısı.

Epiklorohidrin ile fenol veya aromatik aminlerin tepkimeye girmesiyle bir çok epoksi reçine oluşur. Epoksi üretimi süresince tepkimeye eklenecek sertleştiriciler, plastikleştiriciler ve diğer ilave malzemeler ile viskozite, darbe, şekil değiştirme vb. özellikleri iyileştirilmiş reçine elde edilebilir.

Tablo 1.7 ile oda sıcaklığındaki tipik epoksi özellikleri verilmiştir.

Tablo 1.7 Oda sıcaklığındaki tipik epoksi özellikleri  
(Kaw, 1997)

Özgül ağırlık	1,28
Young modülü (GPa)	3,792
Maksimum çekme mukavemeti(MPa)	82,74

Epoksi reçinenin avantajları şöyle sıralanabilir:

- ✓ Yüksek mukavemet
- ✓ Düşük viskozite, bu sayede lifleri ıslatma özelliği yüksektir.
- ✓ Kürlenme süresince düşük uçuculuk
- ✓ Düşük çekme oranı (boyutsal olarak yüksek kararlılık), bu sayede epoksi ve takviye malzemesine gelecek kesme gerilmesinin artması önlenir.
- ✓ Çeşitli uygulamalar için yirmiden fazla türde bulunabilir.

Bunca avantajlı tarafının yanı sıra epoksi reçinelerin en önemli dezavantajları yüksek maliyeti ve çalışma koşullarının zor olmasıdır.

### 1.3.3.3 Vinyl Ester

Vinyl ester, akrilik gibi tek fonksiyonlu doymamış asit ile bisfenol diepokit in tepkimeye girmesi ile hazırlanan doymamış reçinedir. Tepkime sonunda oluşan polimer, sterin gibi doymamış monomer ile karışır.

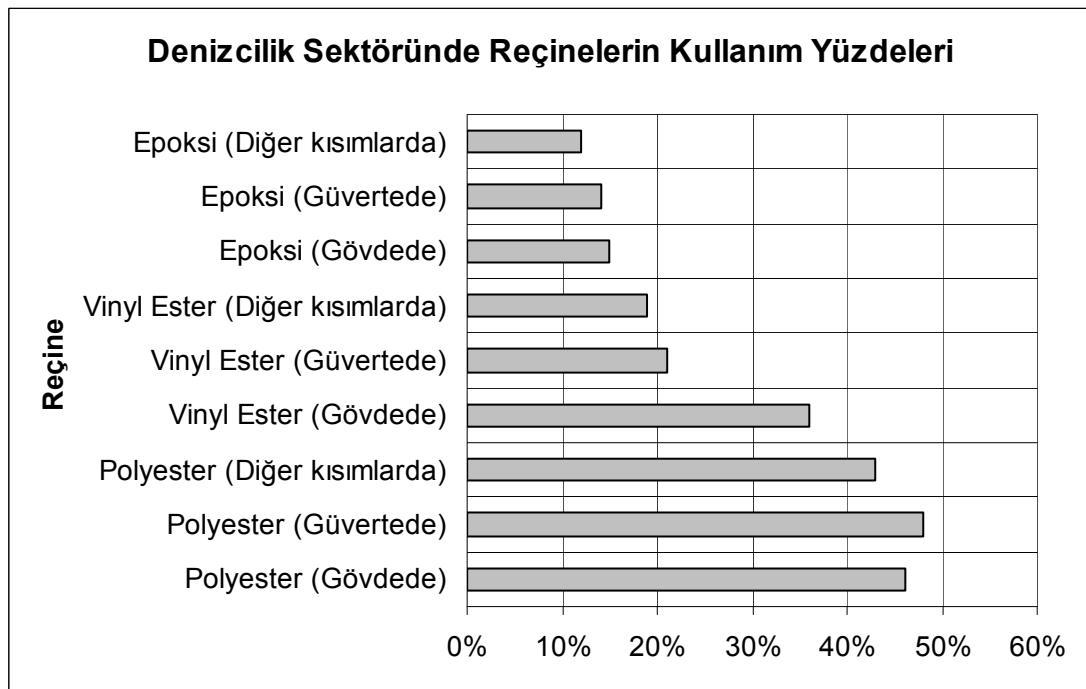
Performans karakteristiği ve çalışması polyestere benzerdir. Vinyl esterin polyesterden fazla olan maliyetini haklı çıkaran; yüksek korozyon direnci, hidrolik kararlılık, darbe ve yorulma dayanımı gibi mükemmel fiziksel özellikleridir.

Tekne imalatında kullanılan reçinelerin mekanik özellikleri Tablo 1.8 ile verilmiştir. Ayrıca Şekil 1.14 ile reçinelerin tekne imalatında kullanım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 1.8 Tekne imalatında kullanılan reçine malzemelerin mekanik özellikleri

([http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/coursead/materiaiscompositos/compositomaterials/g\\_composite\\_materials.pdf](http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/coursead/materiaiscompositos/compositomaterials/g_composite_materials.pdf))

Reçine	Yoğunluk	Çekme Mukavemeti	Çekme Modülü	Maksimum Uzama	Maliyet 1995
	gr/cm <sup>3</sup>	MPa	GPa	%	\$/kg
<b>Ortofitalik Polyester</b>	1,23	48,3	4,07	1	2,32
<b>İsofitalik Polyester</b>	1,21	71,1	3,90	2	2,62
<b>Vinyl Ester</b>	1,12	76 – 83	3,38	4 – 5	3,84
<b>Epoksi</b>	1,20	48 – 76	3,66	5 – 6	8,57



Şekil 1.14 Reçinelerin tekne imalatında kullanım yüzdeleri.

([http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/coursead/materiaiscompositos/compositomaterials/g\\_composite\\_materials.pdf](http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/coursead/materiaiscompositos/compositomaterials/g_composite_materials.pdf))

Tablo 1.8 ve Şekil 1.14 ile görüldüğü gibi yüksek mekanik özelliklerine rağmen yüksek maliyeti epoksi reçinelerin kullanımını kısıtlamaktadır. Vinyl esterin mekanik



özelliklerinin epoksiye yakın olmasına rağmen, maliyetinin polyesterden fazla olması kullanım yüzdesini polyesterden aşağıda olmasına neden olmaktadır.

## **BÖLÜM İKİ**

### **GRP / PVC SANDVIÇ KOMPOZİTİN İMALATI VE KIRILMA TOKLUĞU**

#### **KAVRAMI**

#### **2.1 Problemin Tanımı**

Bu çalışma, tekne imalatında kullanılan GRP (cam takviyeli plastik) ve PVC sandviç kompozit sisteminin kırılma tokluğuna, denizel çevrenin etkisini belirlemek amacı ile yapılmıştır. Numune olarak hazırlanan sandviç sistemler; GRP yüzey, PVC çekirdekten oluşmuştur. Yüzey malzemesi  $450 \text{ g/m}^2$  yoğunluğunda cam elyaf ( E-camı ) olup, çekirdek Divinicell H80 malzemedir. Çekirdek ve yüzey malzemesi isofitalik polyester reçine ile birbirine yapıştırılarak üretilmiştir. Reçine içerisine katalizör olarak Metil Etil Keton Peroksit (MEKP) ve Kobalt Naptanat eklenmiştir. İmalatı yapılan 10 adet numuneden 5 adeti denizel ortamın etkini görebilmek için Türk Standartları Enstitüsü' nde (TSE) 120 saat boyunca,  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta, % 5 NaCl çözeltisinde bekletilmiştir. Daha sonra tüm numunelerin Mod I kırılma tokluğu deneyi yapılmış ve kuru numuneler ile tuzlu suda bekletilen numunelerin sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu tezin konusunu oluşturan GRP / PVC sandviç kompozit numuneleri el yatırması metodu ile üretilmiştir. Bu nedenle el yatırması metodu ayrıntıları ile ele alınacak, diğer imalat yöntemlerine değinilmeyecektir.

#### **2.2 El Yatırması Metodu**

El yatırması metodu ülkemizdeki küçük tekne imalatında en sık kullanılan ve maliyet bakımından avantajlı olan bir imalat şeklidir. El yatırması yöntemi ile imalat kalitesinin ustalığa bağlı olması ise dezavantajlı yönünü oluşturmaktadır.

El yatırması metodu ile tekne imalatı kalıp kullanılarak yapılan bir imalat yöntemidir (Şekil 2.1). Ağaç veya metal kalıp kullanılacak ise negatif kalıp kullanılır iken, köpük kalıp kullanılacak ise pozitif kalıp kullanılır.



### 2.1.1 GRP / PVC Sandviç Kompozitin İmalatı

Sandviç kompozitlerin imalatı el yatırması metodu ile yapılmıştır. Kullanılan çekirdek malzeme Divinycell HP80 olup mekanik özellikleri Tablo 2.1 ile verilmiştir. Kullanılan takviye malzemesi 450 gr/m<sup>2</sup> yoğunluğunda cam elyaf (E-Camı) olup, Şekil 2.2, mekanik özellikleri Tablo 1.4 ile verilmiştir. Takviye malzemesi keçe yapıda olduğu için izotropik malzeme özelliği gösterir yani her yönde aynı mekanik değerlere sahiptir. Şunu da belirtmek gerekir ki 1 kat 450 gr/m<sup>2</sup> yoğunluğundaki cam elyaf, polyestere doyduğunda 1 cm kalınlık oluşturmaktadır. Üretilen numunelerin yüzey malzemesi kalınlığı 3 cm olduğundan yüzeylerde 3 kat elyaf lamine edilmiştir. Reçine (yapıştırıcı) malzeme olarak isofitalik sıvı polyester kullanılmış olup mekanik değerleri Tablo 1.9 ile verilmiştir. Ayrıca isofitalik reçine içerisine katalizör olarak Metil Etil Keton Peroksit (MEKP) ve Kobalt Naptanat eklenmiştir, Şekil 2.3.

Tablo 2.1 PVC Divinycell HP80 mekanik özellikleri

( [http://www.diabgroup.com/europe/literature/e\\_pdf\\_files/ds\\_pdf/HP\\_DS\\_EU.pdf](http://www.diabgroup.com/europe/literature/e_pdf_files/ds_pdf/HP_DS_EU.pdf) )

Özellikler	Birim	
Yoğunluk <sup>1</sup> , ISO 845	Kg / m <sup>3</sup>	80
Bası Mukavemeti <sup>2</sup> , ASTM D 1621	MPa	1,5
Bası Modülü <sup>2</sup> , ASTM D 1621	MPa	105
Çeki Mukavemeti <sup>2</sup> , ASTM D 1623	MPa	2,8
Çeki Modülü <sup>2</sup> , ASTM D 1623	MPa	100
Kesme Mukavemeti, ASTM C 273	MPa	1,25
Kesme Modülü, ASTM C 273	MPa	28
Kesme Şekil Değiştirmesi, ASTM C 273	%	38
<sup>1</sup> Tipik yoğunluk değişimi + / - % 10		
<sup>2</sup> Yüzeye dik. Tüm değerlerin ölçüm sıcaklığı +23 °C		



Şekil 2.2 Doğranmış cam liflerden yapılmış keçe elyaf.  
([http://drywallmesh.en.alibaba.com/product/50025829/50061616/Fiberglass\\_Woven\\_Roving/Chopped\\_Strand\\_Mat.html](http://drywallmesh.en.alibaba.com/product/50025829/50061616/Fiberglass_Woven_Roving/Chopped_Strand_Mat.html))



Şekil 2.3 Sıvı isofitalik polyester.

İlk olarak PVC çekirdek malzemesi hazırlanmıştır, ve hazırlanışı şu adımlarla gerçekleşmiştir: 38 mm genişlikte 15 mm kalınlıkta kesilmesi Şekil 2.4, ve sonrasında 305 mm boyda kesilmesi Şekil 2.5. Böylece çekirdek malzemenin hazırlanması tamamlanmıştır, Şekil 2.6.



Şekil 2.4 Çekirdek malzemesinin hazırlanışı.



Şekil 2.5 Çekirdek malzemesinin hazırlanışı.



Şekil 2.6 Çekirdek malzeme. (Divinycell HP80)

Çekirdek malzeme hazırlandıktan sonra, takviye malzemesi ile el yatırması yöntemi ile laminasyon işlemine sıra gelmektedir. Laminasyon işlemi için öncelikle laminasyon yapılacak zemin üzerine ilk katmanın yapışmasını önlemek için cila sürülür. Daha sonra zemin üzerine polyester reçine tatbik edilir ve birinci tabaka cam elyaf serilir. Serilen elyafın üzerine fırça ile polyester emdirilerek elyaf polyestere doyurulur, Şekil 2.7.



Şekil 2.7 Elyafa polyester uygulanması.

Numunelerin yüzey kalınlığı 3 mm olduğundan, 3 kat cam elyaf sıra ile aynı işlemden geçirilerek bir yüzey tamamlanır. Tamamlanan yüzey üzerine, yine polyester sürülerek PVC çekirdek malzemesi yapıştırılır, Şekil 2.8.



Şekil 2.8 Çekirdek malzemenin yapıştırılması.

Çekirdek malzemenin yapışmasını tamamlaması için kurlenme süresi kadar (yaklaşık 25 dakika) beklenilmiştir. Kurlenmesini tamamlayan polyester katılarak yüzeyi ve çekirdek malzemeyi yapıştırdıktan sonra kaldırılmıştır. Hemen akabinde ikinci yüzeyin hazırlanma işlemi başlamıştır. İkinci yüzeyin laminasyonu aynı şekilde 3 kat halinde hazırlandıktan sonra, bir yüzeyi ile ilk yüzeye yapışık durumdaki çekirdek malzemelerin diğer yüzeylerine de polyester sürülüp hazırlanan ikinci yüzey üzerine bırakılır ve kurlenme süresi kadar beklenir Şekil 2.9.



Şekil 2.9 Sandviç kompozitin hazırlanışı.

Kürlenme süresi sonunda numuneler şerit testere ile birbirinden ayrılırlar, Şekil2.10.



Şekil 2.10 Sandviç kompozit numune.

Son olarak hazırlanan sandviç kompozit numunelere uygulanacak olan Mode I çekme deneyi için menteşelerin laminasyonu ve 25,4mm başlangıç kırığının açılması işlemi gerçekleştirilir, Şekil 2.11. Menteşelerin laminasyonu için yine yüzey malzemesi olan keçe elyaf ve polyester reçine kullanılmıştır.

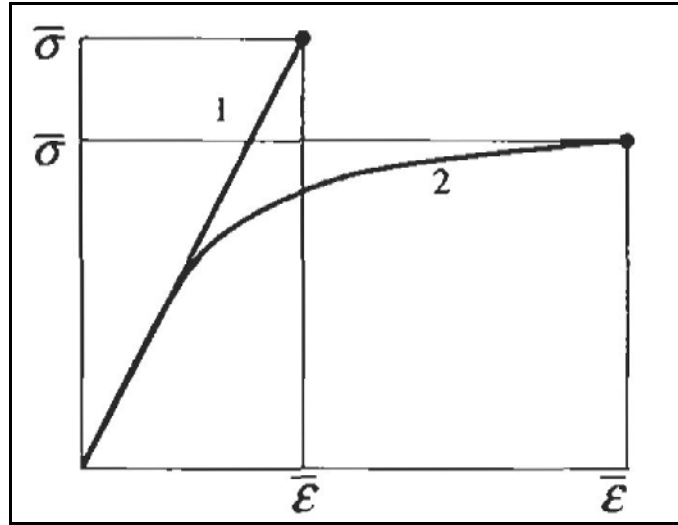


Şekil 2.11 Mode I deneyi için hazırlanmış sandviç kompozit numune.



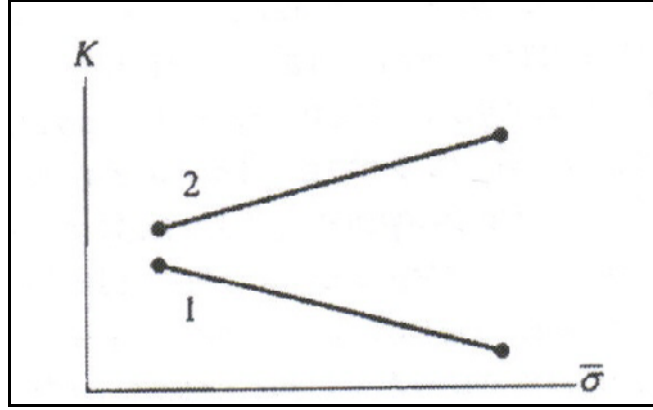
## 2.2 Kırılma Tokluğu Kavramı

Kırılma tokluğu, malzemenin kırılmaya gösterdiği direnci ve malzemeyi hasara uğratmak için gerekli olan işi gösteren çok önemli bir karakteristik özelliktir. Kırılma tokluğu gerilme-şekil değiştirme grafiği altında kalan alan ile orantılıdır. Bilindiği gibi malzemeler kırılğan ve düktil olarak ayrılır, ve tipik olarak Şekil 2.12 ile gösterildiği gibi gerilme-şekil değiştirme grafikleri vardır. Bu iki tür malzemeyi karşılaştıracak olursak, kırılğan malzemenin yüksek gerilmeye, düktil malzemenin ise yüksek şekil değiştirme özelliğine sahip olduğu görülmektedir. Kırılğan malzemeler genelde yüksek gerilme değerlerine sahip olmalarına rağmen, statik gerilme değerlerinden daha düşük gerilme değerlerinde ortaya çıkan ve malzemenin hasarına yol açan kırık ilerlemesine karşı hassastırlar. Bu nedenle tasarımcılar genellikle daha düşük gerilme değerine sahip fakat daha yüksek kırılma tokluğuna sahip olan düktil malzemeleri tercih ederler.



Şekil 2.12 Gerilme - şekil değiştirme grafiği.1: Kırılğan malzeme, 2 Düktil malzeme. (Vasiliev, 2001)

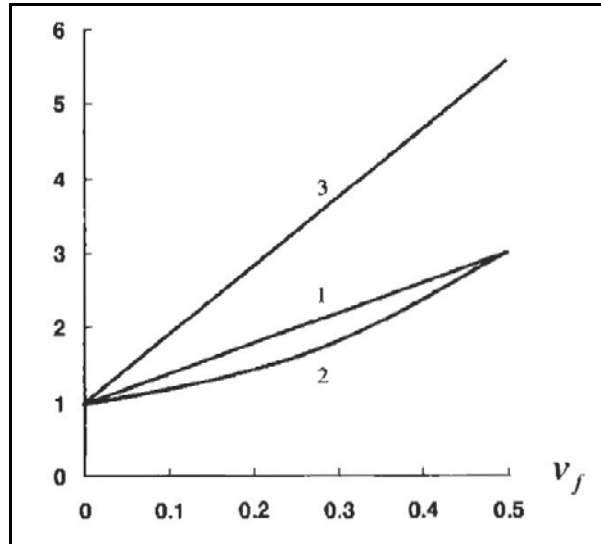
Kırılma tokluğu ile statik mukavemet arasındaki ilişki Şekil 2.13 ile verilmiştir.



Şekil 2.13 Kırılma tokluğu statik mukavemet arasındaki ilişki.

1: Metalik malzeme, 2: Kompozit malzeme. (Vasiliev, 2001)

Grafikte görüldüğü gibi metalik malzemelerin statik mukavemet değerleri arttığında kırılma tokluğu değerlerinde düşüş olmaktadır. Kompozit malzemelerde ise bu durumun tam tersi olarak artan statik mukavemet artan kırılma tokluğuna sebep olmaktadır. Kompozit malzemelerdeki bu farkın nedeni ise hacimsel lif dağılımından kaynaklanmaktadır, Şekil 2.14. Kompozit malzeme içindeki lif oranı artışı statik mukavemetin artışına, ve böylece yorulma mukavemetinin ve kırılma tokluğunun artışına neden olmaktadır (Vasiliev, 2001).



Şekil 2.14 Boron Alüminyum kompozitte,  $V_f$  hacimsel lif dağılımının, statik mukavemete (1), kırılma tokluğuna (2), ve yorulma mukavemetine (3) etkisi. (Vasiliev, 2001)

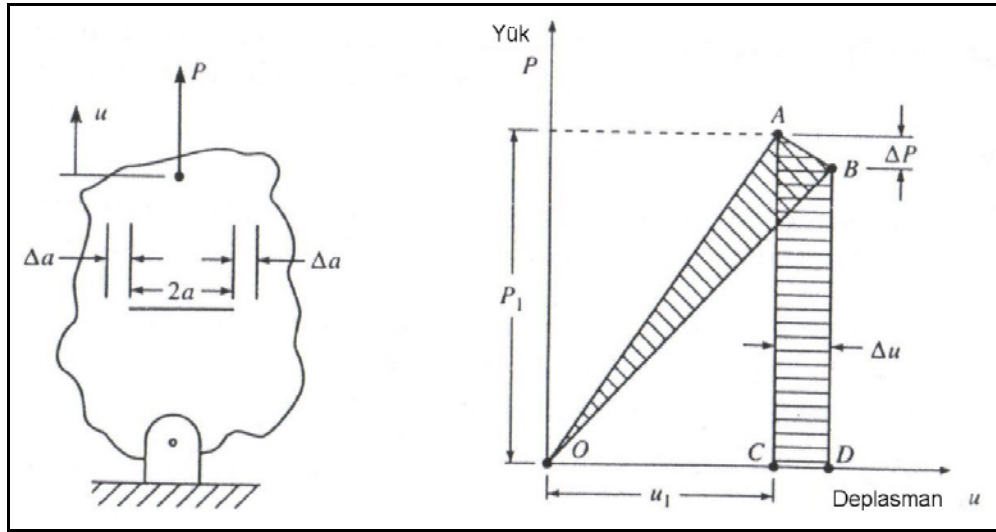
Kompozit malzemelerdeki bu farklı davranışın sebebi, kompozit malzemelerin heterojen mikroyapıya sahip olması, ve özellikle serbest kırık ilerleyişini sınırlayan lif-matris ara yüzeydir.

### **2.2.1 Kırılma Mekanik Analizi**

Malzemelerin karakteristik özelliği olarak bahsedilen kırılma tokluğunun ölçülmesi için literatürde iki farklı yaklaşımdan bahsedilmektedir. Birinci yaklaşım 1920 yılında A. A. Griffith tarafından bulunan “Gerilme Büyüklüğü Faktörü” yaklaşımıdır (Dowling, 1998). Griffith analizi orijinal olarak homojen, izotropik malzemeler için geliştirilmiştir. Bununla beraber en büyük dezavantajı, bu yaklaşım uygulanırken kırık sonundaki gerilme analizine ihtiyaç duyulmasıdır. Bu kırık sonundaki bölgenin gerilme analizi değişik yükleme durumlarında bir çok kırık geometrisinde gerçekleştirildiği için, anizotropik malzemelerde matematiksel zorluklar nedeniyle kısıtlı durumlarda yapılır. İkinci yaklaşım ise, gerilme büyüklüğü faktörü yaklaşımına alternatif olan, çok kullanışlı ve anlaması kolay olan “Açığa Çıkan Şekil Değiştirme Enerjisi Oranı” yaklaşımıdır. Bu ikinci yaklaşım ile izotropik ve anizotropik malzemeler için aynı değerde geçerli sonuçlar elde edilir, ve buradan “açığa çıkan şekil değiştirme enerjisi oranı” yaklaşımının, “gerilme büyüklüğü faktörü” yaklaşımı ile de ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, “açığa çıkan şekil değiştirme enerjisi oranı” yaklaşımının, deneysel ve bilgisayarlı kırık ilerlemesi çalışmalarında güçlü bir araç olduğu kanıtlanmıştır (Gibson, 1994).

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada da “açığa çıkan şekil değiştirme enerjisi oranı” yaklaşımı kullanılmıştır. Bu nedenle bu yaklaşımın incelenmesinde yarar vardır.

### 2.2.1.1 Açığa Çıkan Şekil Değiştirme Enerjisi Yaklaşımı



Şekil 2.15 (a): Tek taraftan çekilen plaka (b): yük-deplasman grafiği. (Gibson, 1994)

Şekil 2.15(a) ile gösterildiği gibi, kalınlık boyunca 2a kırıklı doğrusal elastik plakanın, tek yönden bir P yükü ile çekildiğini düşünelim. Yüksüz durumdan artışa geçen P yükü, yük deplasman grafiğinde, Şekil 2.15(b), doğrusal bir artış görülmesine neden olur. Şimdi burada yük  $P_1$ , deplasman  $u_1$  değerine ulaştığında kırık ilerlemesinin  $\Delta a$  kadar olduğunu kabul edelim. Bu kırık ilerlemesi yükte  $\Delta P$  kadarlık düşüşe, deplasmanda ise  $\Delta u$  kadarlık artışa neden olur. Kırık ilerlemesinin oluşumundan hemen önce, plakada depolanan potansiyel enerji  $U$ , Şekil 2.15(b) de OAC üçgenin alanına eşittir. Kırık ilerlemesi ile açığa çıkan potansiyel enerji  $\Delta U$ , Şekil 2.15(b) de OAB üçgeninin alanına eşittir. Artan  $\Delta u$  deplasmanı süresince, plakaya yapılan artan iş  $\Delta W'$  dir ve ABDC yamuk alanına eşittir. Bu durumda Mod I kırık deformasyonu için açığa çıkan şekil değiştirme enerji oranı  $G_I$ , veya kırık ilerleme alanı A ile ilişkili olarak şekil değiştirme enerjisindeki değişim oranı, şöyle tanımlanır (Gibson,1994):

$$G_I = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta W - \Delta U}{\Delta A} = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA} \quad (2.1)$$

u: deplasman, P: yük olmak üzere; sistem uygunluğu s, şöyle verilmektedir:

$$s = \frac{u}{p} \quad (2.2)$$

Böylece Şekil 2.15(a) ile verilen plakanın potansiyel enerjisi Denklem (2.3) e eşit olur

$$U = \frac{1}{2} Pu = \frac{1}{2} sP^2 \quad (2.3)$$

ve

$$\frac{dU}{dA} = sP \frac{\partial P}{\partial A} + \frac{1}{2} P^2 \frac{\partial s}{\partial A} \quad \text{olur.} \quad (2.4)$$

Kırık ilerlemesi boyunca artan iş yaklaşık olarak

$$\Delta W = P(\Delta u) \quad \text{dır} \quad (2.5)$$

ve

$$\frac{dW}{dA} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta A} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} P \frac{\Delta u}{\Delta A} = P \frac{\Delta u}{\Delta A} = P \frac{d}{dA} (sP) = Ps \frac{\partial P}{\partial A} + P^2 \frac{\partial s}{\partial A} \quad (2.6)$$

Denklem (2.4) ve (2.6), Denklem (2.1) de yerine koyulur ise:

$$G_I = \frac{P^2}{2} \frac{\partial s}{\partial A} \quad \text{bulunur} \quad (2.7)$$

Sabit t kalınlığında bir plaka için  $\partial A = t \partial a$  dır ve böylece

$$G_I = \frac{P^2}{2t} \frac{\partial s}{\partial a} \quad \text{olur} \quad (2.8)$$

Böylece sistem uygunluğunu, kırık uzunluğunun fonksiyonu olarak çizerek ve uygulanan yük (P) ile ilgili olarak ds/da eğrisinin eğimini bularak,  $G_I$  kırılma tokluğunu hesaplayabiliriz. Mod I kırık deformasyonu  $P_c$  ve  $(ds/da)_c$  cinsinden, kritik açığa çıkan şekil değiştirme enerji oranı  $G_{Ic}$ :

$$G_{Ic} = \frac{P_c^2}{2t} \left( \frac{\partial s}{\partial a} \right)_c \quad \text{olur.} \quad (2.9)$$

Deney ile çalışma yapan bilim insanlarının bakış açısı ile bakacak olursak, gerekli bütün parametreler deney numunesi üzerinden ölçülebildiği için malzeme veya kırık gerilme dağılımı ile ilgili bilgi gerekmemesi Denklem (2.9)' un en bariz avantajıdır. Şunu da eklemek gerekir ki, Denklem (2.9) hem izotropik hem de anizotropik malzemeler için geçerlidir.

Açığa çıkan şekil değiştirme enerjisi oranı yaklaşımının diğer bir önemli avantajı da gerilme büyüklüğü faktörü yaklaşımı ile ilişkili olmasıdır. Irwin tarafından gösterildiği gibi (Gibson, 1994), düzlemsel gerilmeye maruz izotropik malzemelerin Mod I kırık deformasyonu için iki yaklaşım arasındaki ilişki:

$$K_I^2 = G_I E' \quad \text{dir} \quad (2.10)$$

Buradan kritik gerilme büyüklüğü faktörü ve kritik açığa çıkan şekil değiştirme enerjisi oranı arasındaki ilişki:

$$K_{Ic}^2 = G_{Ic} E' \quad \text{olur} \quad (2.11)$$

Bu ilişki kompozit malzemenin  $G_{Ic}$  (açığa çıkan enerji) değerinden  $K_{Ic}$  (gerilme büyüklüğü faktörü) değerini veya tam tersini hesaplamada kullanılır. (2.10) ve (2.11) denklemlerinde  $E'$  olarak görülen değer, numunenin kalınlığına göre farklılık gösterir. Bu farklılık çok ince olan numuneler için Denklem (2.12) ile, kalınlığı çok ince olmayan numuneler için Denklem (2.13) ile verilmiştir. Bu iki durum arasındaki

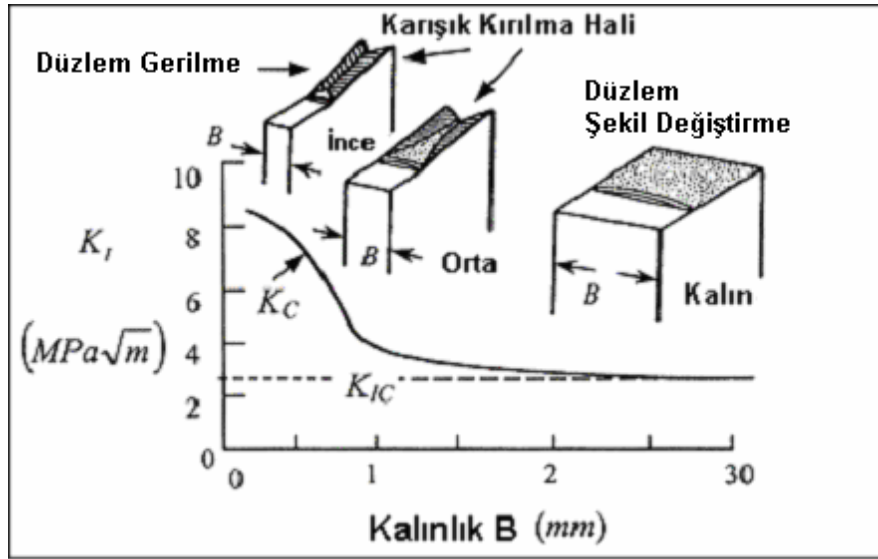
farkı oluşturan, boyuna göre çok ince olan numunelerde  $\sigma_z = 0$  olması diğer durumda ise bu eşitliğin bozulmasıdır.(Perez, 2004). Numune kalınlığının kırılma tokluğuna etkisi ayrıca Şekil 2.16 ile daha net görülmektedir.

$$E' = E \quad (2.12)$$

$$E' = \frac{E}{1 - \nu} \quad (2.13)$$

E: Elastisite modülü

$\nu$ : Poisson oranı

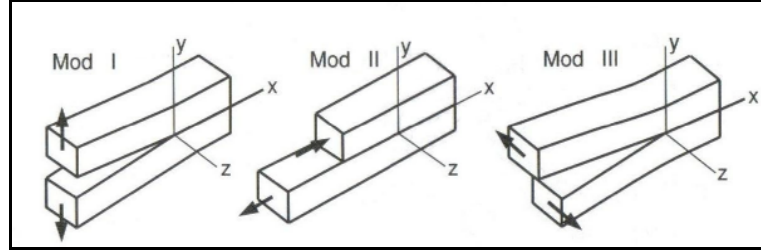


Şekil 2.16 Numune kalınlığının kırılma tokluğuna etkisi. (Perez,2004)

### 2.2.1.2 Mod I Kırık Deformasyonu Deneyi

Kırılma tokluğunu araştırmak için uygulanan çekme deneyinde malzemeyi üç farklı mod ile veya bu modların kombinasyonları ile yüklemek mümkündür, Şekil 2.17. Bu modlardan Mod I, açma modu olarak adlandırılır ve kırık yüzeylerin basitçe birbirinden ayrılması şeklinde gerçekleşir. Mod II, kayma modu olarak adlandırılır ve kırık yüzeylerin kırığı yönlendiren kenarın normal doğrultusunda birbirleri üzerinde kayması şeklinde gerçekleşir. Mod III, yırtılma modu olarak adlandırılır ve kırık yüzeylerin birbirleri üzerinde bu defa kırığı yönlendiren kenarın normal

doğrultusuna dik olarak kayması şeklinde gerçekleşir. Mod I çekme yükü ile meydana gelirken Mod II ve Mod III durumu farklı doğrultulardaki kesme yükü ile meydana gelir.



Şekil 2.17 Temel kırık yüzeyi ilerleme modları. (Dowling, 1998)

Çalışma koşullarında oluşan çatlak veya kırık ilerlemesi genellikle bu modların üçünün bileşimi şeklinde görülür. Oysa deneysel çalışmalarda bu modların her biri ayrı birer deney ile incelenir. Örneğin mühendislikteki kırık problemleri ağırlıklı olarak çekme gerilmesinden dolayı Mod I ile ilgilenmektedir. Mod I delaminasyonu genişlik boyunca kademeler arası bölgenin çekiye olan zayıflığını belirgin olarak gösterdiği için çok ilgilenilmektedir (Gibson, 1994). Muhtemelen Mod I deneyi için en fazla kullanılan numune, ilk olarak yapışkan bağların kırılma analizleri için geliştirilmiş ve sonradan katmanlı kompozit malzemelerde tabakalar arası kırık için adapte edilmiş olan, çift yönlü ankastre kiriş numunesidir. Çift yönlü ankastre kiriş numunesinde yük, iki taraftan aynı anda birbirine ters yönlerde uygulanır. Bu durumda Mod I kırık açılması orta düzlem boyunca gerçekleşir.

Bu tezin konusu olan denizcilikte kullanılan GRP/PVC sandviç kompozit malzemelerin kırılma tokluğu Mod I deneyi ile araştırılmıştır.

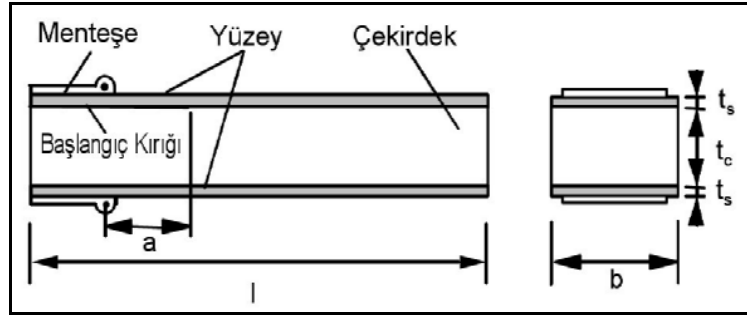


## BÖLÜM ÜÇ

### UYGULANAN MOD I DENEYİ VE SONUÇLARI

#### 3.1 Uygulanan Mod I Deneyi

Şekil 3.1 ile ön kırıklı Mod I deney numunesi, Tablo 3.1 ile numunenin boyutları verilmiştir. Üretilen 10 adet GRP/PVC numunesinden 5 adedine, deniz suyunun numuneler üzerindeki etkilerini görebilmek amacıyla, öncelikle korozyon testi uygulanmıştır. Bunun için numunelerin çekirdek yüzeyleri epoksi boya ile boyanıp, numuneler Türk Standartları Enstitüsünde (TSE) % 5 tuz çözeltisinde 120 saat tutulmuştur.



Şekil 3.1 Ön kırıklı Mod I deney numunesi.

Tablo 3.1 Numune Boyutları

Uzunluk, l	Yüzey kalınlığı, $t_s$	Çekirdek kalınlığı, $t_c$	Genişlik, b	Başlangıç Çatlağı
305 mm	3 mm	15 mm	38 mm	25 mm

Deneyin yapıldığı cihaz Şekil 3.2 ile gösterilmiştir. Cihaz Schmadzu AG-50kNG model olup 50kN çekme yükü uygulayabilmektedir. Deney 21 °C sıcaklık ve % 50 bağıl nem koşullarında yapılmıştır.



Şekil 3.2 Deney cihazı.

Deney için cihazın programabilirlik özelliğinden yararlanılmış olup kullanılan program Tablo 3.2 ile verilmiştir. Ayrıca deney cihazına bağlı bilgisayarda deney ile eş zamanlı yük-deplasman grafiği oluşmuştur. Deney cihazı herhangi bir kalibrasyon bozulmasına karşın 10 N luk bir ön yükleme ile programlanmıştır, her adımdan sonra çeneler 10 N luk yüklemeye geri döndüğünde grafik üzerinde kapalı alan oluşmuştur. Program sekiz döngüden oluşmaktadır. Sekiz adet döngü için deplasman adımları 4 mm, 6 mm, 10 mm, 16 mm, 26 mm, 38 mm, 52 mm ve 70 mm olarak belirlenmiştir. Çene hareket hızları ilerleme için 4 mm/dk geri dönüş de ise 15 mm/dk olarak belirlenmiştir. Her adım bitiminde geri dönüş başlamadan önce 60 saniyelik bekleme süresi verilmiş bu süre içinde numune üzerinden çatlak boyu manuel olarak 0,01 hassasiyetli digital kumpas ile ölçülmüş ve not edilmiştir. Bu adım için yük değerini cihaz kendisi ekranında göstermektedir.

Tablo 3.2 Mod I deneyinde kullanılan program

Komutlar	Parametre	Birim	
<b>Control</b>			
Stop			
Get Data			Birinci Döngü
Speed	4	mm/min	
Up			
Load>=	10	N	

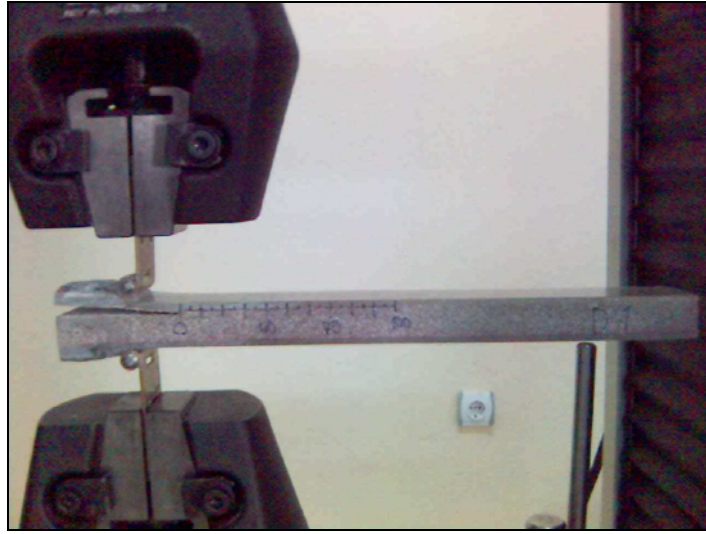
Stop			
Get Data			
Up			
Stroke $\geq$	4	mm	
Stop			
Get Data			
Timer	60	sec	
Get Data			
Speed	15	mm/min	
Down			
Load $\leq$	10	N	
Stop			
Get Data			
Speed	4	mm/min	İkinci Döngü
Up			
Stroke $\geq$	6	mm	
Stop			
Get Data			
Timer	60	sec	
Get Data			
Speed	15	mm/min	
Down			
Load $\leq$	10	N	
Stop			
Get Data			
Speed	4	mm/min	
Up			
Stroke $\geq$	10	mm	
Stop			
Get Data			
Timer	60	sec	

Get Data			
Speed	15	mm/min	
Down			
Load<=	10	N	
Stop			
Get Data			Dördüncü Döngü
Speed	4	mm/min	
Up			
Stroke>=	16	mm	
Stop			
Get Data			
Timer	60	sec	
Get Data			
Speed	15	mm/min	
Down			
Load<=	10	N	
Stop			
Get Data			
Speed	4	mm/min	
Up			
Stroke>=	26	mm	
Stop			
Get Data			
Timer	60	sec	
Get Data			
Speed	15	mm/min	
Down			
Load<=	10	N	
Stop			
Get Data			Altıncı Döngü
Speed	4	mm/min	

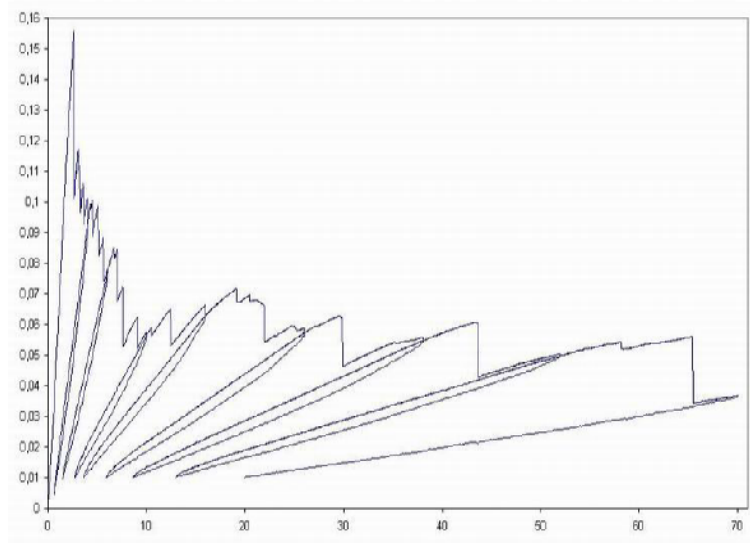
Up			
Stroke>=	38	mm	
Stop			
Get Data			
Timer	60	sec	
Get Data			
Speed	15	mm/min	
Down			
Load<=	10	N	
Stop			
Get Data			
Speed	4	mm/min	Yedinci Döngü
Up			
Stroke>=	52	mm	
Stop			
Get Data			
Timer	60	sec	
Get Data			
Speed	15	mm/min	
Down			
Load<=	10	N	
Stop			
Get Data			Sekizinci Döngü
Speed	4	mm/min	
Up			
Stroke>=	70	mm	
Stop			
Get Data			
Timer	60	sec	
Get Data			
Speed	15	mm/min	

Down			
Load<=	10	N	
Stop			
Get Data			
End			

Şekil 3.3 ile deney cihazına numunenin bağlanma şekli, Şekil 3.4 ile yük-deplasman grafiği örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Deney cihazına numunenin bağlanması.



Şekil 3.4 Yük deplasman grafiği örneği (numune kuru 3).

Numunelerin kırılma tokluğunun hesaplanabilmesi için bilmesi gereken yük deplasman grafiğindeki kapalı alanların değeri LUCIA 4.51 paket programı yardımı ile bulunmuştur. Bunun için deney cihazına bağlı olarak çalışan bilgisayardan saniyede iki veri olarak çizdiği yük deplasman grafiğinin koordinatları .txt dosyası olarak alınıp bu koordinatlar ile Excel paket programında grafik çizdirilmiştir. Bu grafik LUCIA 4.51 paket programının kabul edeceği bir dosya biçiminde (.jpeg) kaydedilmiştir. Kaydedilen grafik LUCIA 4.51 paket programında açıldıktan sonra, her bir kapalı alan içinde kalan piksellerin sayılması yoluyla bir alan hesap edilmiştir. Ayrıca grafik üzerinden program kalibre edilip 1kNmm lik alanın gerçekte kaç piksele denk olduğu bulunmuştur. Bulunan bu değer her bir kapalı alan için düzeltme faktörüdür. Yani programdan bulunan her bir kapalı alan değeri düzeltme faktörü ile çarpılarak gerçek değer elde edilir. Örnek olarak yük-deplasman grafiğinin verildiği kuru 3. numunenin ilk kırık adımının kırılma tokluğu hesabı gösterilmiştir. Hesapta kullanılan formül (Shivakumar ve Smith, 2004) (Kolat vd, 2006):

$$G_{IC} = \frac{P_c^2}{2t} \left( \frac{\partial s}{\partial a} \right)_c = G_c = \frac{1}{b} \cdot \frac{\Delta E}{\Delta a} \quad \text{dır.} \quad (3.1)$$

Burada;  $G_c$ : Numunenin kritik kırılma tokluğu,  $b$ : Numunenin genişliği,  $\Delta E$ : Kırık ilerlemesi ile açığa çıkan enerjiye bağlı yük-deplasman grafiği altında kalan alan,  $\Delta a$ : Kırık ilerleme miktarıdır.

Örnek olarak kuru 3. numunenin ilk döngüdeki kırılma tokluğunu hesaplırsak:

Numune genişliği  $b = 38$  mm,

Grafik üzerindeki LUCIA paket programı ile bulunan ilk alan = 66,87 piksel

Düzeltilme faktörü =  $\frac{1}{445,76}$  kNmm/piksel

İlk alanın gerçek değeri  $\Delta E_1 = 66,87 * \frac{1}{445,76} = 0,15$  kNmm (Joule)

Kırık ilerleme miktarı  $\Delta a = 7,44$  mm

$G_{c1} = \frac{1}{0,038} \cdot \frac{0,15}{0,00744} = 530,560$  J/m<sup>2</sup> = 0,53056 kJ/m<sup>2</sup> bulunur. Kuru 3. numunenin

kırılma tokluğu ise tüm döngülerin kırılma tokluklarının ortalamasıdır.

### 3.2 Deney Sonuçları

Şekil 3.5 ile kuru numunenin deneyinden bir örnek görüntü ve Şekil 3.6 ile tuzlu suda bekletilmiş numunenin deneyinden bir görüntü örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.5 Kuru numunenin deneyinden bir örnek görüntü.

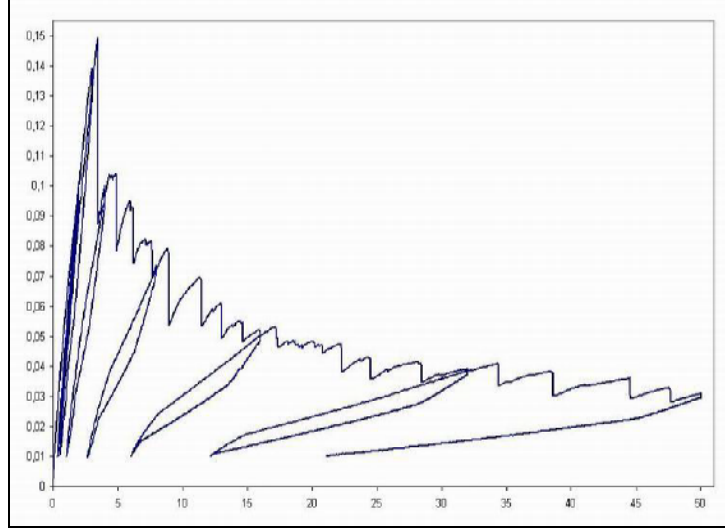


Şekil 3.6 Tuzlu suda bekletilmiş numunenin deneyinden bir görüntü.



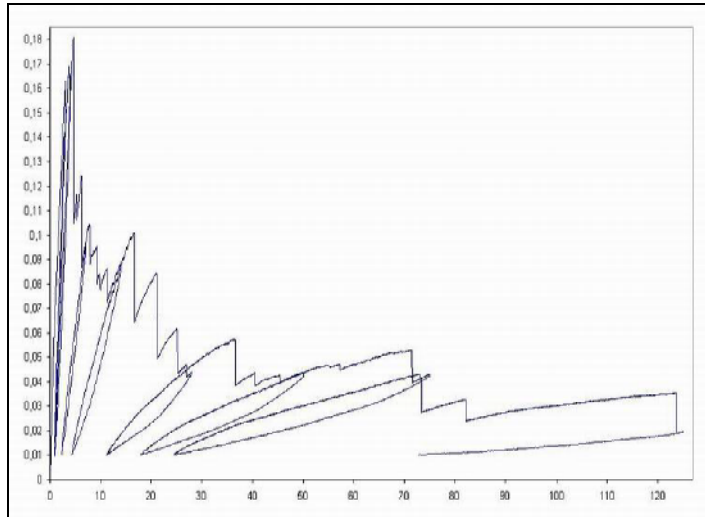
### 3.2.1 Kuru Numunelerin Sonuçları

Kuru 1. numunenin deneyinden elde edilen yük-deplasman grafiği Şekil 3.7 ile verilmektedir.



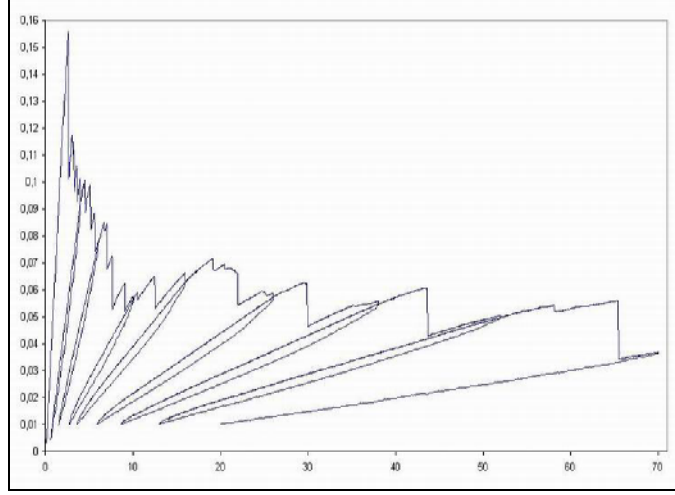
Şekil 3.7 Kuru 1. numune yük-deplasman grafiği.

Kuru 2. numunenin deneyinden elde edilen yük-deplasman grafiği Şekil 3.8 ile verilmektedir.



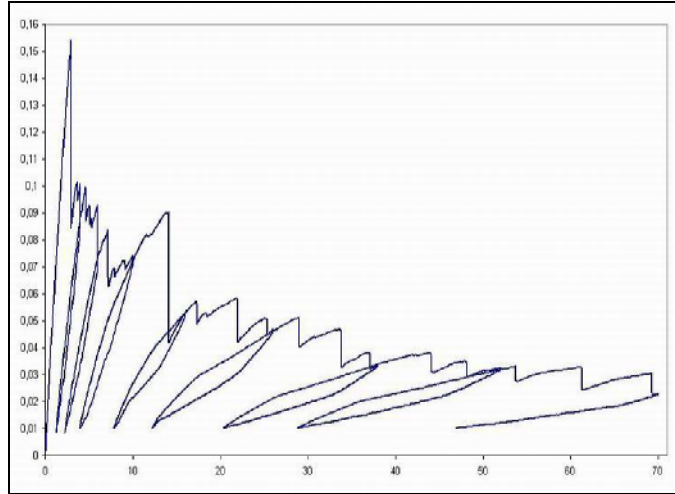
Şekil 3.8 Kuru 2. numune yük-deplasman grafiği.

Kuru 3. numunenin deneyinden elde edilen yük-deplasman grafiği Şekil 3.9 ile verilmektedir.



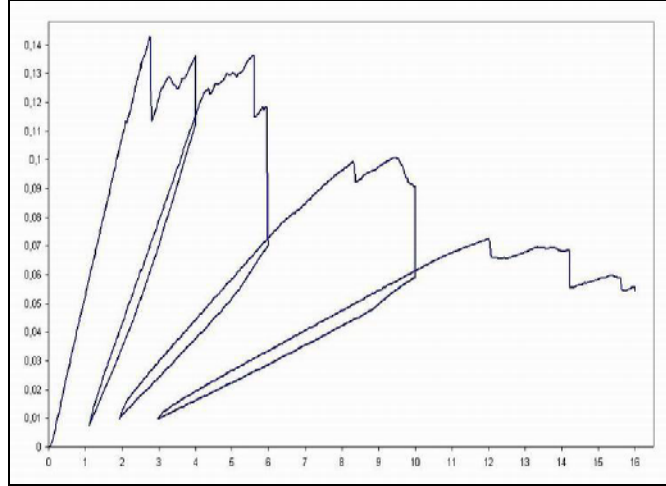
Şekil 3.9 Kuru 3. numune yük-deplasman grafiği.

Kuru 4. numunenin deneyinden elde edilen yük-deplasman grafiği Şekil 3.10 ile verilmektedir.



Şekil 3.10 Kuru 4. numune yük-deplasman grafiği.

Kuru 5. numunenin deneyinden elde edilen yük-deplasman grafiği Şekil 3.11 ile verilmektedir.



Şekil 3.11 Kuru 5. numune yük-deplasman grafiği.

Kuru numunelerin her döngü için deney sonuçları Tablo 3.3 ile verilmektedir.

Tablo 3.3 Kuru numunelerin deney sonuçları

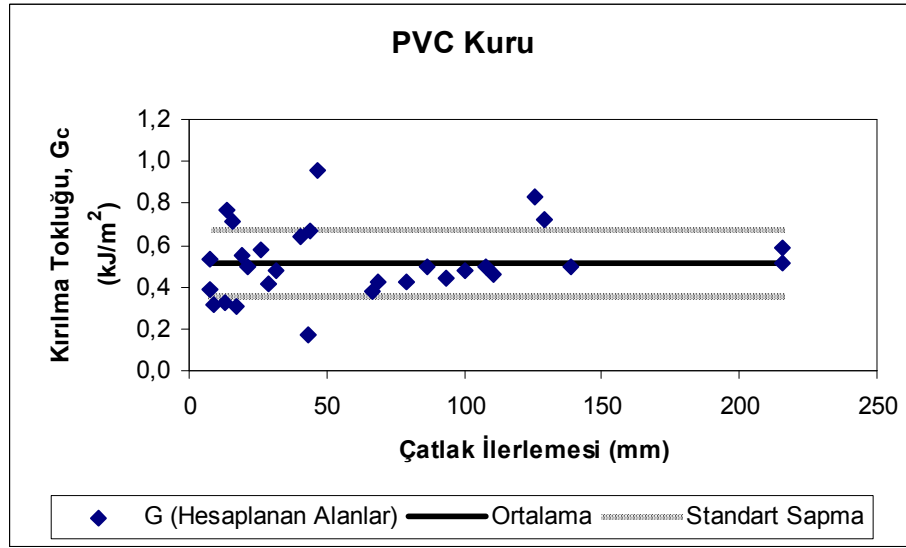
<b>Kırılma tokluğu, <math>G_c</math> ( <math>\text{kJ/m}^2</math> )</b>								
	1.Döngü	2.Döngü	3.Döngü	4.Döngü	5.Döngü	6.Döngü	7.Döngü	8.Döngü
<b>1.</b>	0	0	0	0,391	0,494	0,588	0,315	0,479
<b>2.</b>	0	0	0,709	0,480	0,427	0,496	0,722	0,517
<b>3.</b>	0,530	0,306	0,173	0,960	0,427	0,493	0	0,828
<b>4.</b>	0,326	0,550	0,412	0,669	0,379	0,446	0,462	0,492
<b>5.</b>	0	0,770	0,578	0,643	-	-	-	-

Kuru numunelerin kırılma toklukları Tablo 3.4 ile verilmiştir.

Tablo 3.4 Kuru numunelerin kırılma toklukları (  $\text{kJ/m}^2$  )

1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	5. Numune	Ortalama	Standart Sapma
0,453	0,558	0,531	0,467	0,663	0,534	$\pm 0,159$

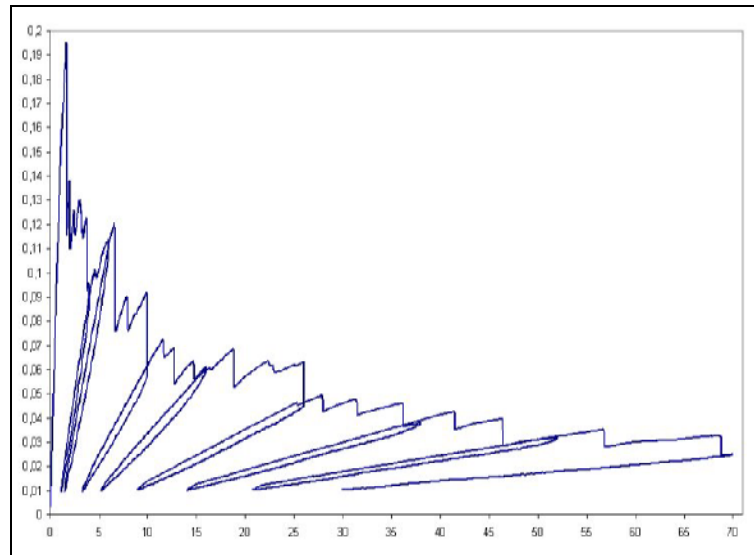
Kuru numunelerin kırılma tokluğu grafiği Şekil 3.12 ile verilmiştir.



Şekil 3.12 Kuru numuneler kırılma tokluğu grafiği.

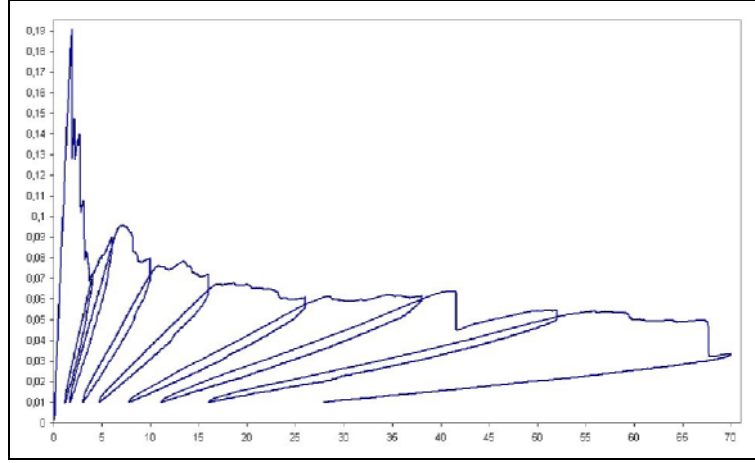
### 3.2.2. Tuzlu Suda Bekletilmiş Numunelerin Deney Sonuçları

Tuzlu suda bekletilmiş 1. numunenin deneyinden elde edilen grafik Şekil 3.13 ile verilmiştir.



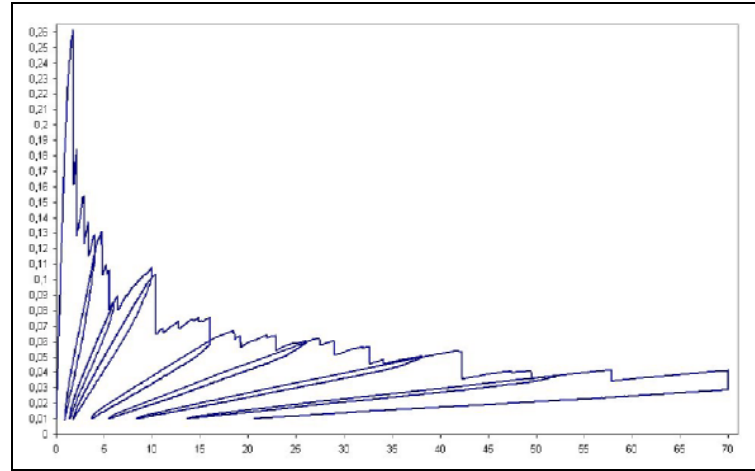
Şekil 3.13 Tuzlu suda bekletilmiş 1. numune yük-deplasman grafiği.

Tuzlu suda bekletilmiş 2. numunenin deneyinden elde edilen grafik Şekil 3.14 ile verilmiştir.



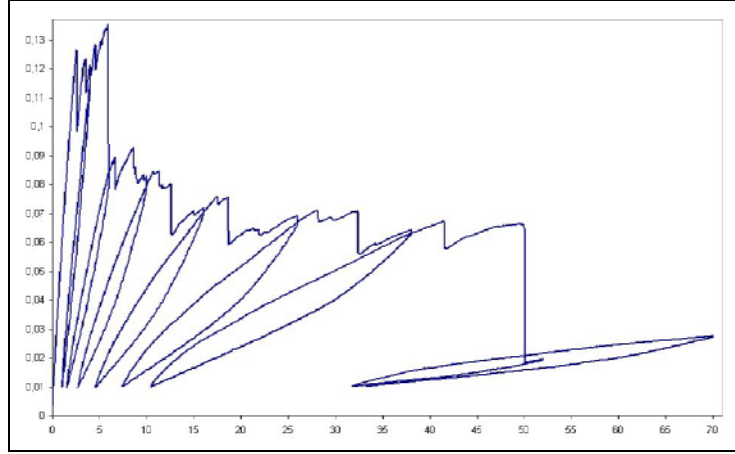
Şekil 3.14 Tuzlu suda bekletilmiş 2. numune yük-deplasman grafiği.

Tuzlu suda bekletilmiş 3. numunenin deneyinden elde edilen grafik Şekil 3.15 ile verilmiştir.



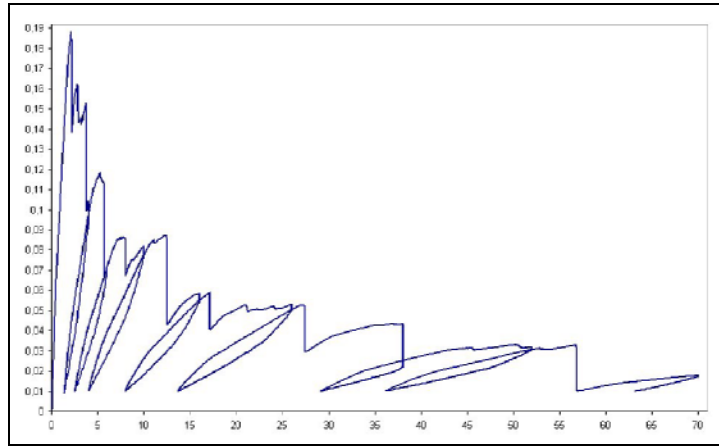
Şekil 3.15 Tuzlu suda bekletilmiş 3. numune yük-deplasman grafiği.

Tuzlu suda bekletilmiş 4. numunenin deneyinden elde edilen grafik Şekil 3.16 ile verilmiştir.



Şekil 3.16 Tuzlu suda bekletilmiş 4. numune yük-deplasman grafiği.

Tuzlu suda bekletilmiş 5. numunenin deneyinden elde edilen grafik Şekil 3.17 ile verilmiştir.



Şekil 3.17 Tuzlu suda bekletilmiş 5. numune yük-deplasman grafiği.

Tuzlu suda bekletilmiş numunelerin her döngü için deney sonuçları Tablo 3.5 ile verilmektedir.

Tablo 3.5 Tuzlu suda bekletilmiş numunelerin deney sonuçları

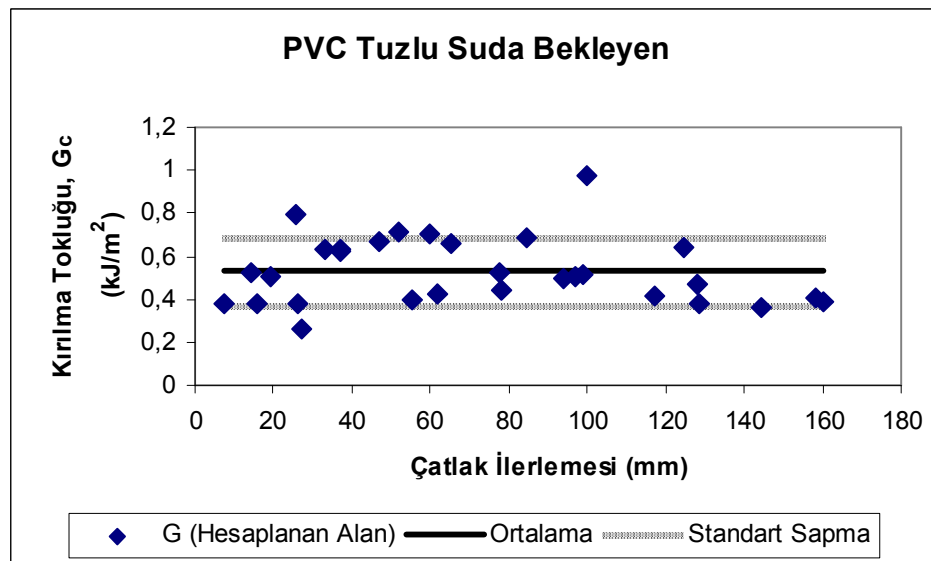
Kırılma tokluğu, $G_c$ ( $\text{kJ/m}^2$ )								
	1.Döngü	2.Döngü	3.Döngü	4.Döngü	5.Döngü	6.Döngü	7.Döngü	8.Döngü
1.	0,378	0,509	0,388	0,396	0,523	0,504	0,411	0,364
2.	0,378	0	0,730	0,633	0,712	0,656	0,684	0,641
3.	0,266	0,631	0,627	0,423	0,446	0,513	0,377	0,403
4.	0,865	0,258	0,532	0,624	0,499	0,708	0,532	0
5.	0,526	0,376	0	0,653	0,704	0,493	0,973	0,473

Tuzlu suda bekletilmiş numunelerin kırılma toklukları Tablo 3.6 ile verilmiştir.

Tablo 3.6 Tuzlu suda bekletilmiş numunelerin kırılma toklukları (  $\text{kJ/m}^2$  )

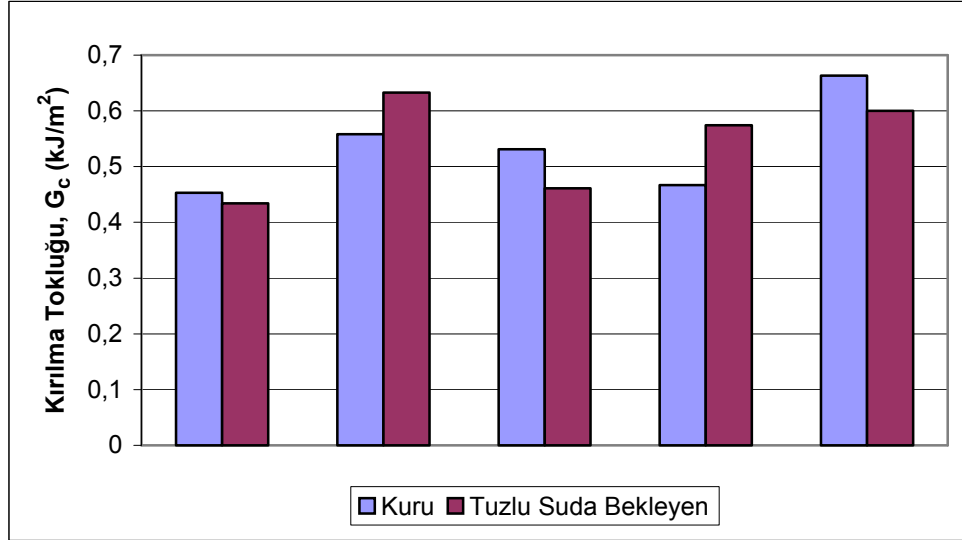
1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	5. Numune	Ortalama	Standart Sapma
0,434	0,633	0,461	0,574	0,6	0,540	$\pm 0,157$

Tuzlu suda bekletilmiş numunelerin kırılma tokluğu grafiği Şekil 3.18 ile verilmiştir.



Şekil 3.18 Tuzlu suda bekletilmiş numunelerin kırılma tokluğu grafiği.

Kuru numuneler ile tuzlu suda bekletilmiş numunelerin kırılma tokluğu karşılaştırmalı grafiği Şekil 3.19 ile verilmiştir.



Şekil 3.19 Kuru numuneler ile tuzlu suda bekletilmiş numunelerin kırılma tokluğu karşılaştırmalı grafiği.



## BÖLÜM DÖRT

### SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

#### 4.1 Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Bulunması

Analiz için gerekli veri olan numunelerin elastisite modülleri ve Poisson oranları yapılan çekme deneyi ile bulunmuştur. Yapılan deney sonuçları Tablo 4.1 ve 4.2 ile verilmektedir.

Tablo 4.1 Kuru numune çekme deneyi sonuçları

Yük, F (N)	Çekme ekseninde şekil değişirme, $\epsilon_1$ ( $\mu$ )	Çekme eksenine dik şekil değişirme, $\epsilon_2$ ( $\mu$ )
0	5200	4152
180	5284	4125
260	5338	4108
440	5502	4056
635	5692	3994
790	5864	3938
955	6036	3885
1085	6180	3835
1140	6254	3816
1220	6354	3779
1360	6516	3730

Tablo 4.2 Tuzlu suda bekleyen numune çekme deneyi sonuçları

Yük, F (N)	Çekme ekseninde şekil değiştirme, $\epsilon_1$ ( $\mu$ )	Çekme eksenine dik şekil değiştirme, $\epsilon_2$ ( $\mu$ )
0	4685	3744
300	4830	3668
500	5012	3612
690	5188	3556
890	5389	3492
1050	5564	3438
1220	5742	3377
1345	5868	3334
1420	5954	3308
1530	6064	3268
1645	6189	3229

Numuneler için ölçülen bu değerlerden yük, deney cihazının ekranından okunmuş, çekme yönündeki şekil değiştirme  $\epsilon_1$  ve çekme yönüne dik şekil değiştirme  $\epsilon_2$  değerleri ise mikron olarak ayrıca bağlanan straingage göstergesinden okunmuştur. Uzama miktarlarının birimsizleştirme için işlem yapmadan önce  $10^{-6}$  ile çarpılması gerekmektedir.

Numunelerin elastisite modüllerinin hesabı için 10 adet  $\Delta F$  ve  $\Delta \epsilon_1$  değerleri hesaplanır.  $\Delta F$  değeri numune çekme kesit alanı olan  $0,003*0,038 \text{ m}^2$  ile bölünerek  $\Delta \sigma$  gerilme değeri bulunur. Bulunan her bir  $\Delta \sigma$  ve  $\Delta \epsilon_1$  değeri için  $E_1$  değeri bulunur.

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A} \left( \frac{N}{m^2} \right) \quad (4.1)$$

$$A = 0,003*0,038 = 0,000114 \text{ m}^2$$

$$E_n = \frac{\Delta\sigma_n \times 10^6}{\Delta\varepsilon_n} \left( \frac{N}{m^2} \right) \quad (4.2)$$

Hesaplanan on adet elastisite modülünün ortalaması alınarak numunelerin elastisite modülleri bulunur.

Numunelerin Poisson oranını bulmak için benzer olarak on adet  $\Delta\varepsilon_1$  ve  $\Delta\varepsilon_2$  hesaplanır ve on adet  $\nu_n$  bulunur. Poisson oranı hesabı için bulunan on adet  $\nu_n$  değerinin ortalaması alınır.

$$\nu_n = \frac{\Delta\varepsilon_2}{\Delta\varepsilon_1} \quad (4.3)$$

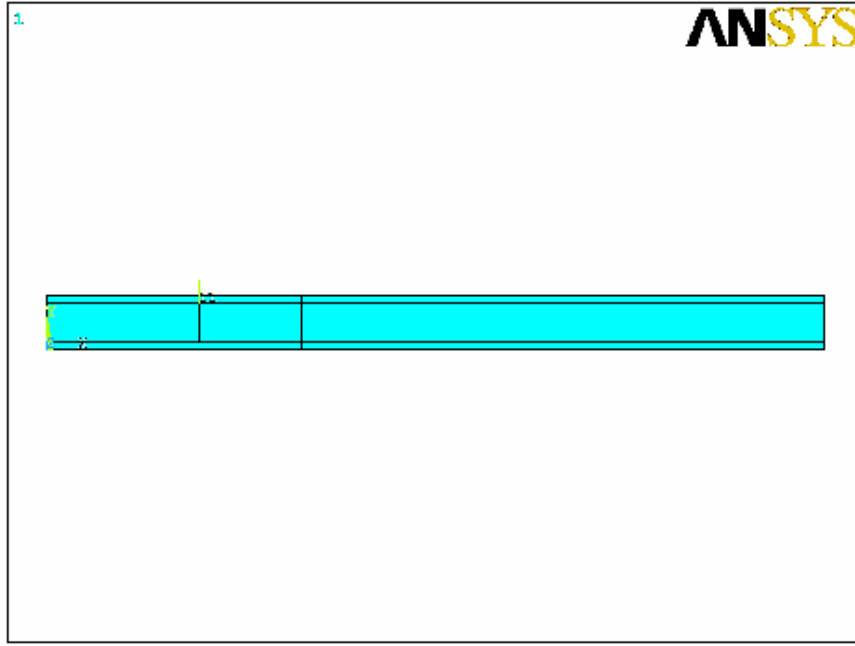
Yapılan bu hesaplamalar sonucu kuru numune için ve tuzlu suda bekleyen numune için bulunan elastisite modülleri ve Poisson oranlar Tablo 4.3 ile verilmiştir.

Tablo 4.3 Numunelerin elastisite ve Poisson oranları

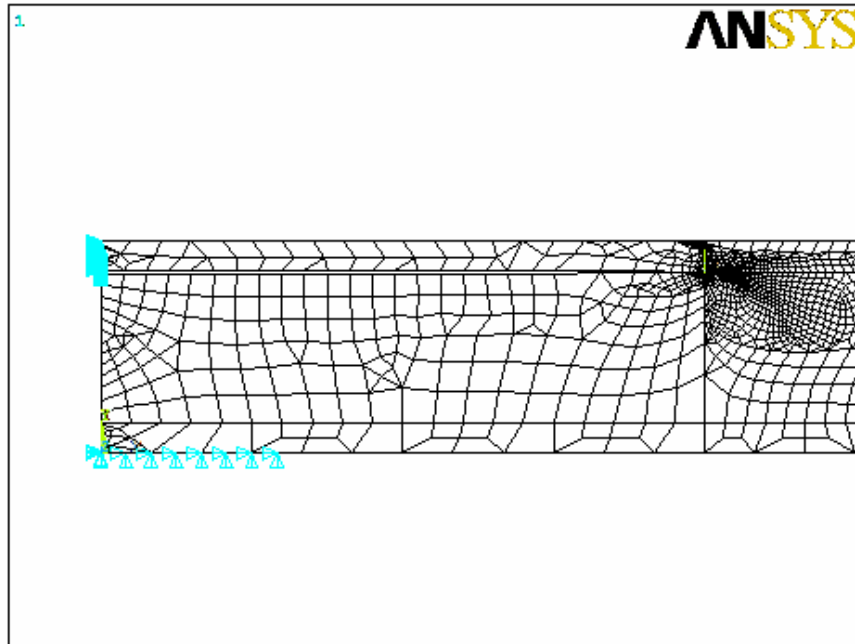
	<b>Kuru Numune</b>	<b>Tuzlu Suda Bekleyen Numune</b>
Elastisite Modülü (GPa)	9,58	9,56
Poisson Oranı	0,321	0,33

## 4.2 Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar analizi Ansys paket programı ile yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi için seçilen eleman tipi PLANE 82 sekiz düğümlü elemandır. Analiz için iki boyutlu numune modeli ve uygulanan sınır şartları Şekil 4.1 ve 4.2 ile görülmektedir.

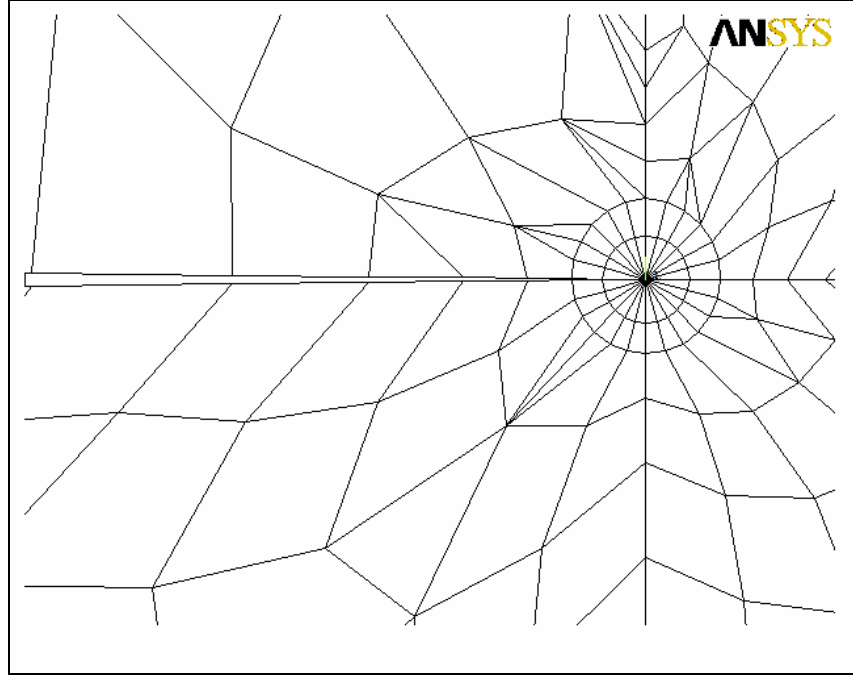


Şekil 4.1 2D numune modeli.



Şekil 4.2 Numune sınır şartları.

Analiz için çatlak ucu özel olarak tanımlanmış ve elemanlara bölünmüştür, Şekil 4.3.



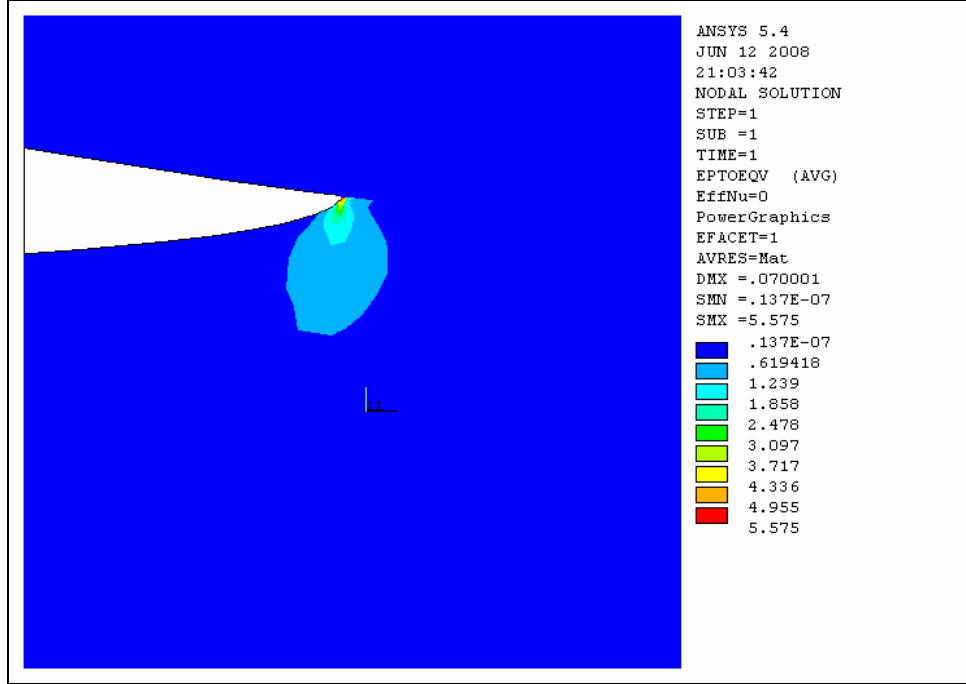
Şekil 4.3 Çatlak ucu modellenmesi.

Analiz için sonlu eleman modeli 2083 elemana bölünmüş ve toplam 5902 düğüm noktası için hesap yapılmıştır. Yapılan analizlerde, kuru numune ve suda bekleyen numuneyi aynı koşullarda analiz etmek adına, iki numune aynı sınır koşulları ve aynı sayıda eleman ve düğüm noktası ile analiz edilmiştir.

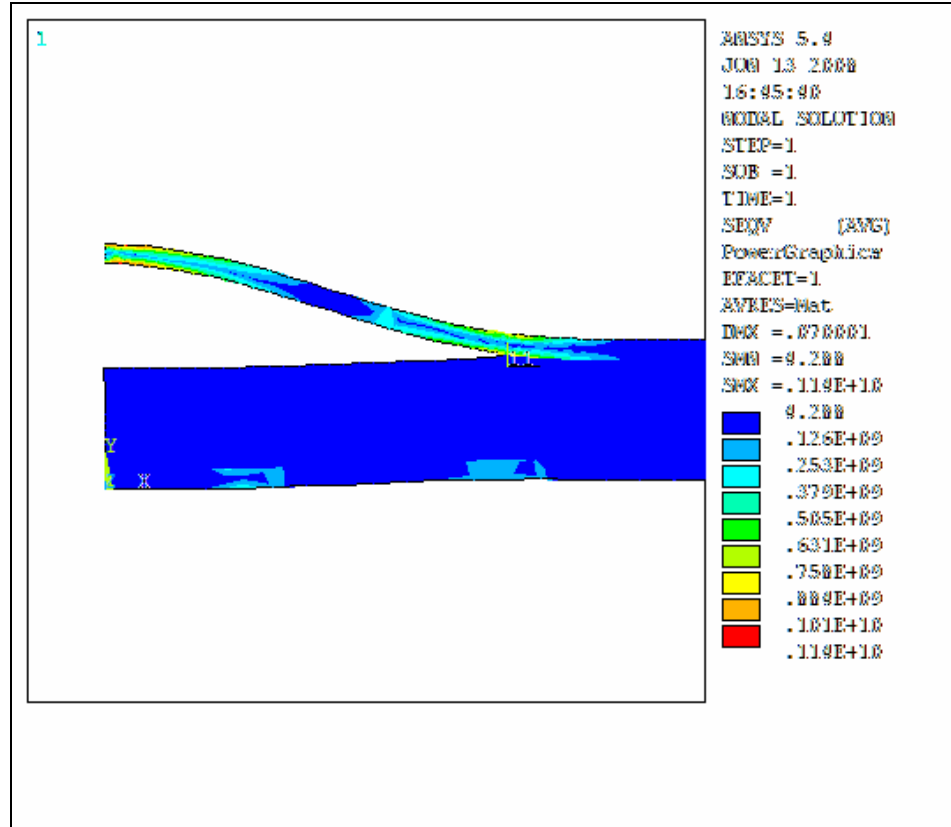
#### ***4.2.1. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları***

##### *4.2.1.1 Kuru numune analiz sonuçları*

Kuru numunenin analiz sonuçlarından şekil değiştirme ve gerilme grafikleri Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 ile görülmektedir.

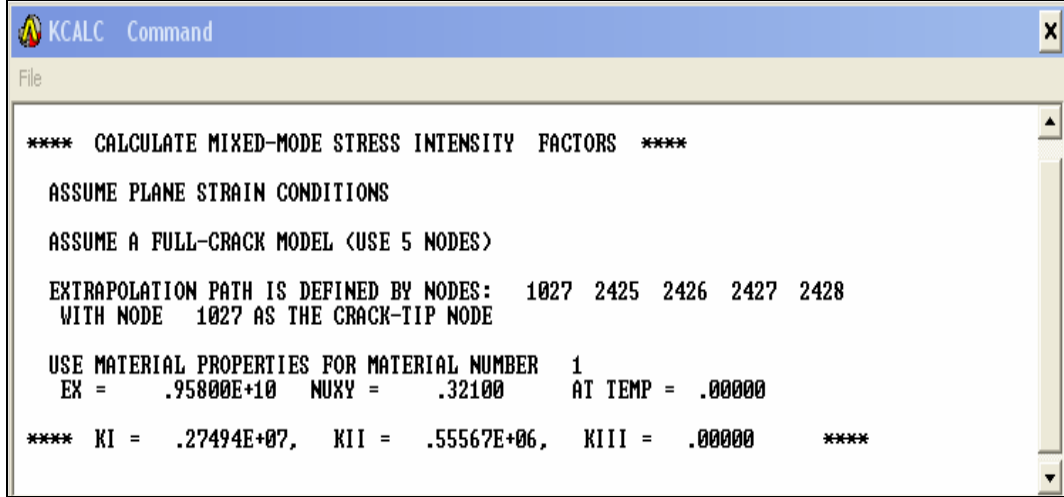


Şekil 4. 4 Kuru numune şekil değiştirme grafiği.



Şekil 4. 5 Kuru numune gerilme grafiği.

Kuru numune için analiz programı ile bulunan gerilme büyüklüğü faktörü (Stress Intensity Factor),  $K_I = 0,27494 \times 10^7 \text{ Pa}\sqrt{m}$  , Şekil 4.6 ile verilmiştir.



```

KCALC Command
File
**** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS ****
ASSUME PLANE STRAIN CONDITIONS
ASSUME A FULL-CRACK MODEL (USE 5 NODES)
EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES: 1027 2425 2426 2427 2428
WITH NODE 1027 AS THE CRACK-TIP NODE
USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER 1
EX = .95800E+10  NUXY = .32100  AT TEMP = .00000
**** KI = .27494E+07,  KII = .55567E+06,  KIII = .00000 ****

```

Şekil 4. 6 Kuru numune gerilme büyüklüğü faktörü,  $K_I$ .

Analiz ile elde edilen gerilme büyüklüğü faktörü ile, deneysel sonuçlardan elde edilen açığa çıkan enerji değeri arasındaki ilişki denklem 2.11, denklem 2.12 ve denklem 2.13 ile verilmiştir. Bu çalışmadaki numune kalınlığı sebebiyle düzlem şekil değiştirme esasına göre hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar sonucu

$$\left(0,27494 \times 10^7\right)^2 = G_c \times \frac{0,958 \times 10^{10}}{1 - 0,321}$$

$$G_c = 535,77 \quad \frac{J}{m^2} = 0,5358 \quad \frac{kJ}{m^2}$$

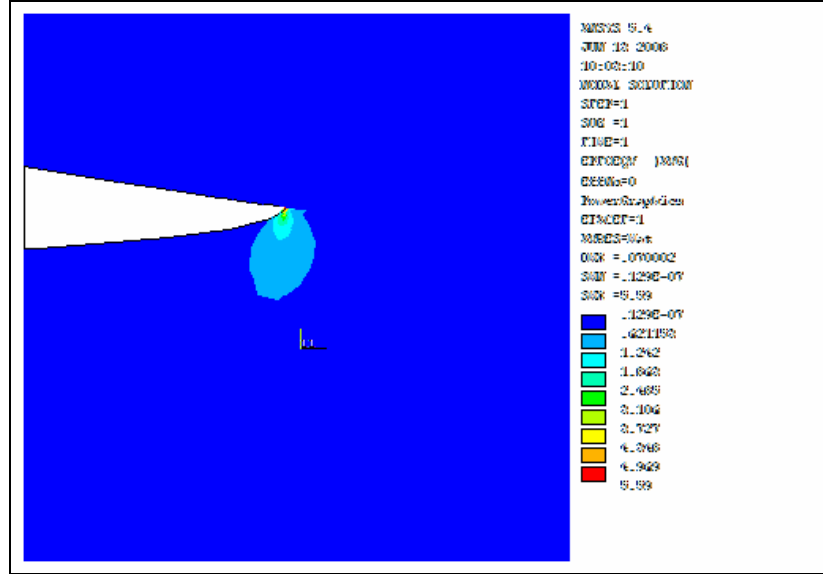
olarak bulur. Kuru numune için deneysel olarak bulunan değer

$$G_c = 0,534 \text{ kJ/m}^2$$

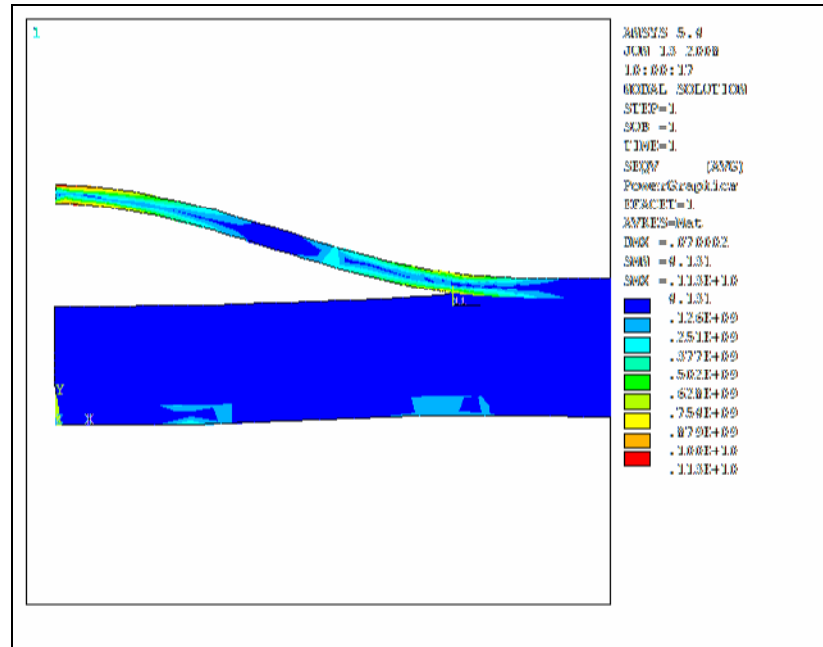
$$\text{Analizdeki hata oranı} = \frac{0,5358 - 0,534}{0,5358} = 0,00335 \text{ yani } \%0.336 \text{ dır.}$$

#### 4.2.1.2 Tuzlu suda bekletilmiş numunenin analiz sonuçları

Tuzlu suda bekletilmiş numunenin analiz sonuçlarından şekil değiştirme ve gerilme grafikleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 ile görülmektedir.



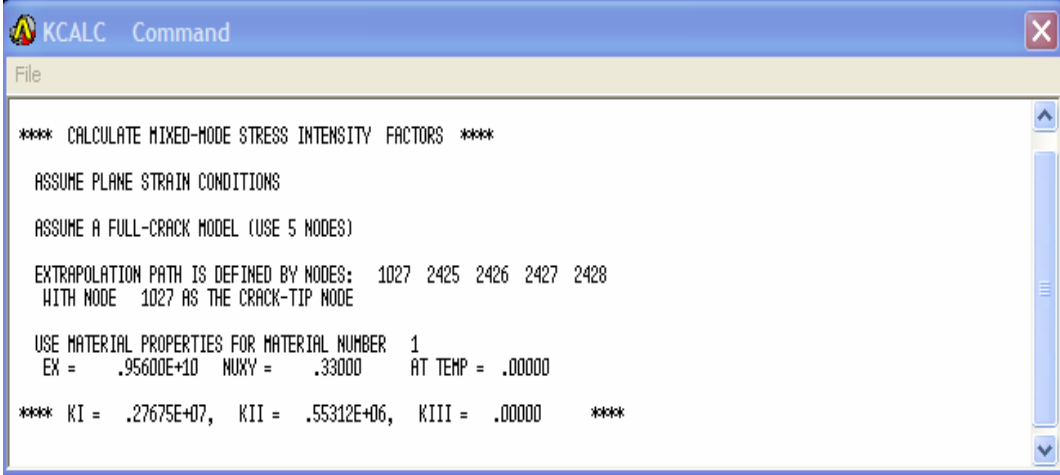
Şekil 4. 7 Tuzlu suda bekleyen numune şekil değiştirme grafiği.



Şekil 4. 8 Tuzlu suda bekleyen numune gerilme grafiği.



Tuzlu suda bekleyen numune için analiz programı ile bulunan gerilme büyüklüğü faktörü (Stress Intensity Factor),  $K_I = 0,27675 \times 10^7 \text{ Pa} \sqrt{m}$ , Şekil 4.9 ile verilmiştir.



```

KCALC Command
File
**** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS ****
ASSUME PLANE STRAIN CONDITIONS
ASSUME A FULL-CRACK MODEL (USE 5 NODES)
EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES: 1027 2425 2426 2427 2428
WITH NODE 1027 AS THE CRACK-TIP NODE
USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER 1
EX = .95600E+10 NUXY = .33000 AT TEMP = .00000
**** KI = .27675E+07, KII = .55312E+06, KIII = .00000 ****

```

Şekil 4. 9 Suda bekleyen numune gerilme büyüklü faktörü,  $K_I$ .

Tuzlu suda bekleyen numune için denklem 2.11 ve denklem 2.12 kullanılarak yapılan hesap ile

$$\left(0,27675 \times 10^7\right)^2 = G_c \times \frac{0,956 \times 10^{10}}{1 - 0,33}$$

$$G_c = 536,77 \frac{J}{m^2} = 0,537 \frac{kJ}{m^2}$$

sonuçları bulunur.

Tuzlu suda bekleyen numune için deneysel olarak elde edilen sonuç

$$G_c = 0,540 \text{ kJ/m}^2 \text{ 'dir.}$$

$$\text{Analizdeki hata oranı} = \frac{0,540 - 0,537}{0,540} = 0,00555 \text{ yani } \%0,555 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

## **BÖLÜM BEŞ**

### **DEĞERLENDİRME**

Yapılan bu çalışmada; GRP (cam takviyeli plastik) yüzey ve PVC çekirdek malzemeden oluşan sandviç malzemenin kırılma tokluğuna denizel çevrenin etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Ülkemizde tekne imalatında en yaygın imalat yöntemi olan el yatırması yöntemi ile üretilen on adet numunenin; beş adeti denizel çevrenin etkisini görmek amacıyla TSE de 120 saat süreyle, 50 °C sıcaklıkta, %5 NaCl çözeltisinde korozyon testine maruz bırakılmış, diğer beş numune ise deney sonuçlarını karşılaştırmak için kuru bırakılmıştır. Yapılan Mod I çekme deneylerinin sonucunda; tuzlu su testi ile korozyona tabii tutulan numunelerin kırılma toklukları ortalaması 0.540 kJ/m<sup>2</sup> (standart sapma ± 0,157) iken, kuru numunelerin kırılma toklukları ortalamaları 0,534 kJ/m<sup>2</sup> (standart sapma ± 0,159) olarak bulunmuştur. Elde edilen deney sonuçları, ayrıca sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan bilgisayar analiz ile de %1' in altında hata oranı ile doğrulanmıştır. Bu sonuçlardan yola çıkarak PVC çekirdekli sandviç kompozit malzemenin kırılma tokluğunun, denizel çevreden etkilenmediğini söylemek mümkündür.

## KAYNAKLAR

Borsellino, C., Calabrese, L., ve Valenza, A. (2004). Experimental ad numerical evaluation of sandwich composite structures. *Composite Science and Technology*, 64, 1709-1715. 27 Mart 2008, Elsevier

Bader, S. (1994). *Crystic polyester handbook*. UK: Scott Bader Company

Catwell, W. J., Scudamore, R., Ratcliffe, J. ve Davies, P. (1999). Interfacial fracture in sandwich laminates. *Composite Science and Technology*, 59, 2079-2085. 18 Aralık 2006, Elsevier

*Chopped Strand Mat*, (22 Temmuz 2006). 23 Kasım 2006, [http://drywallmesh.en.alibaba.com/product/50025829/50061616/Fiberglass\\_Woven\\_Roving/Chopped\\_Strand\\_Mat.html](http://drywallmesh.en.alibaba.com/product/50025829/50061616/Fiberglass_Woven_Roving/Chopped_Strand_Mat.html)

*Diabgroup Malzeme Katolođu*, (Aralık 2006). 13 Ocak, 2007; [http://www.diabgroup.com/europe/literature/e\\_pdf\\_files/ds\\_pdf/H\\_DS\\_EU.pdf](http://www.diabgroup.com/europe/literature/e_pdf_files/ds_pdf/H_DS_EU.pdf)

Dowling, E. N. (1998). *Mechanical behaviour of materials*. USA: Prentice Hall

Gibson, F. R. (1994). *Principles of composite material mechanics*. Singapore: McGraw-Hill

Kaw, A. K. (1997). *Mechanics of composite materials*. USA: CRC Press

Kolat, K., Neşer, G. ve Özes, Ç. (2006). The effect of sea water exposure on the interfacial fracture of some sandwich systems in marine use. *Composite Structures*, 78, 11-17. 24 Şubat 2006, Elsevier

Komarovsky, A. A. (2003) *Physics of strength and fracture control*. USA: CRC Press

Kutz, M. (2nd ed.) (1998). *Mechanical engineerings' handbook*. USA: John Wiley&Sons

Manet, V.(1998). The use of Ansys to calculate the behaviour of sandwich structures. *Composite Science and Technology*, 58, 1899-1905. 27 Mart 2008, Elsevier

*Marine Composites* (19 Aralık. 2005 ). 13 Ocak, 2007.  
[http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/cursosead/materiaiscompositos/compositomaterials/g\\_composite\\_materials.pdf](http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/cursosead/materiaiscompositos/compositomaterials/g_composite_materials.pdf)

Papanicolaou, G.C. ve Bakos, D., (1996). Interlaminar fracture behaviour of sandwich structures, *Composites Part A*, 27(3), 165-173. 16 Aralık 2006. Elsevier

Perez, N. (2004). *Fracture Mechanics*. USA: Kluwer Academic Publishers

Scudamore, R. J. ve Cantwell, W. J., (2002). The effect of moisture and loading rate on the interfacial fracture properties of sandwich structures. *Polymer Composites*, 23, (3) 406-417. 13 Ocak, 2007. Wiley InterScience

Shivakumar, K. N. ve Smith, S. A. (2004). In situ fracture toughness testing of core materials in sandwich panels. *Journal of Composite Materials*, 38, (8) 655-668. 16 Aralık 2006. Sage Publications

Schlotter, M. (2002). 14 Eylül 2006. *A comparison of core materials for sandwich composite constructions*.  
[http://people.bath.ac.uk/enpms/pdf\\_files/sandwcore\\_mat.pdf](http://people.bath.ac.uk/enpms/pdf_files/sandwcore_mat.pdf)

Ural, A., Zehnder, T. A. ve Ingrassia, R. A. (2003). Fracture mechanics approach to facesheet delamination in honeycomb: measurement of energy release rate of the adhesive bond. *Engineering Fracture Mechanics*, 70, 93-103. 18 Aralık 2006. Elsevier

Vasiliev, V. V. ve Morozov, V. E. (2001). *Mechanics and analyses of composite materials*. New York: Elsevier Science Ltd.

Xiaoming, L. ve Weitsman, Y. J.(2004). Sea-water effects on foam-cored composite sandwich lay-ups. *Composites: Part B*, 35, 451-459. 16 Aralık 2006. Elsevier