

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DENİZEL ÇELİK-KOMPOZİT YAPILARIN
OPTİMİZASYONU

Nurhan NEŞER

Kasım, 2012

İZMİR

DENİZEL ÇELİK-KOMPOZİT YAPILARIN OPTİMİZASYONU

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

Gemi İnşaatı Programı, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Anabilim Dalı

Nurhan NEŞER

Kasım, 2012

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

NURHAN NEŞER, tarafından DOÇ. DR. ÇİÇEK ÖZES yönetiminde hazırlanan “DENİZEL ÇELİK-KOMPOZİT YAPILARIN OPTİMİZASYONU” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.



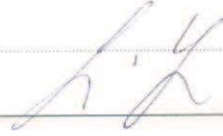
Doç. Dr. Çiçek ÖZES

Yönetici



Doç. Dr. Aytunç EREK

Tez İzleme Komitesi Üyesi



Doç. Dr. E. Çınar YENİ

Tez İzleme Komitesi Üyesi



Doç. Dr. Bülent Murat İÇTEN

Jüri Üyesi



Yrd. Doç. Dr. A. Zeynep Seyhan

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Çelik malzemeden inşa edilmiş gemilerin gerek düzenli bakım-tutum çabaları arasındaki süreleri açarak gerekse sözü edilen malzemenin ömrünü uzatarak gemi işletmeciliğini daha ekonomik hale getirmeyi amaçlayan kompozit kaplamalar konusundaki bu çalışmayı kurgulayarak, yapıcı önerileriyle yöneten değerli hocam **Doç. Dr. Çiçek Öz**es başta olmak üzere, deney numunelerimin hazırlanması aşamasında malzeme desteği vererek, uygulamaları konusunda yönlendiren **BRV Epoksi Sistemler A.Ş.**'ye, **Duratek Epoksi ve Poliüretan Sistemler A.Ş.**'ye, **Telatex A.Ş.'nin Metyx Birimi**'ne, numunelerin imalat aşamalarında emek harcayan fiberglas atölyesindeki çalışma arkadaşlarıma, son derece yoğun çalışma koşullarına karşın deneylerin gerçekleşmesine olanak sağlayan ve önerileriyle yönlendiren başta **Doç. Dr. Cesim ATAŞ** ve **Araş. Gör. Dr. Mehmet Emin Deniz** ile **Araş. Gör. Mustafa Özen** olmak üzere, **Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ) Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarı**'nın değerli araştırmacılarına içten teşekkürü bir borç bilirim.

Nurhan NEŞER

DENİZEL ÇELİK – KOMPOZİT YAPILARIN OPTİMİZASYONU

ÖZ

Gemi yapılarını hafifletmek ve bu yolla gerek gemi stabilitesinde iyileştirmeler yapmak, gerekse hafifletilen yükün yerine işleve uygun donanım ekleyerek işlevselliği arttırmak, işletme ömrü ve maliyetlerinde iyileştirmelere gidebilmek, ayrıca denizel çevrenin aşındırıcı etkisine karşı koruma sağlamak amaçlarıyla Elyaf Takviyeli Polimer malzemedan üst yapıların yapımı yaygınlaşmaktadır. Gemi inşaatı endüstrisi için son derece önemli ve güncel olan bu uygulamalara katkıda bulunmak amacındaki bu deneysel çalışma, nitelikleri oldukça farklı iki malzeme olarak çelik ve ETP'nin birleşiminin performansı konusuna eğilmektedir.

İki farklı malzemenin birleşiminin güvenilirliğini değerlendirebilmek için, katmanlararası zafiyetin olduğu arayüzeydeki kırılma hasarı üzerinde çalışmak gerekecektir. Bu nedenle çalışmada, gemi inşa çeliği ile reçine olarak kullanımı yaygınlaşan epoksi temelli ve E-cam elyafından oluşan kompozitin birleşiminin Mode I, Mode II ve tek karşılıklı yapıştırırmalı bağlantılarda kesme yükleme koşulları altındaki performansları ölçülmüştür.

Performans ölçütü olarak alınan gerinme enerjisi bağlamında üç ayrı yükleme koşulunda, SA0 (işlem görmemiş yüzey), SA1 ve SA2.5 boyutlarındaki üç adet çelik yüzey pürüzlülüğü, iki farklı üreticinin ürünü olan epoksiler için hesaplanmıştır. Deneysel hataları en aza indirmek amacıyla da her sistemden beş adet numune teste tabi tutulmak suretiyle toplam 90 numune için deneyler gerçekleştirilmiştir.

Bu testlerin ve hesaplamaların sonuçlarından yola çıkarak,

- Çelik malzemenin yüzey pürüzlülüğünün çelik-kompozit bileşik yapıların iki farklı malzemenin arayüzeyi ayrışma hasarını ve hasar toleransını önemli ölçüde etkileyen bir parametre olduğu,
- Deneylerden epoksilerin kalitesini ölçmek amacıyla da yararlanılabileceği,

- Katmanlama reçinesindeki performans düşüklüğünün yüzey toleranslı astarlarla ekonomik bir şekilde iyileştirilebileceği,
- Mode I verilerinin işlenmesinde Alan Yöntemi'nin Modifiye Edilmiş Kiriş Kuramı Yöntemi'ne göre daha iyi sonuçlar verdiği,
- Mode II deneylerinin çelik-ETP bağlantılarının performansının değerlendirilmesinde, malzemelerin davranış ve niteliklerinde farklılıklar nedeniyle yeterli düzeyde aydınlatıcı olamadığı,
- Mode II yerine tek karşılıklı yapıştırırmalı bağlantılara uygulanan çekme deneyinin anılan bağlantıların performans analizinde pratik bir yöntem olduğu sonuçlarına varılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Çelik gemi inşaatı, çelik – ETP birleşimi, kırılma mekaniği, Mode I, Mode II, tek karşılıklı yapıştırırmalı bağlantı, yüzey pürüzlülüğü

OPTIMIZATION OF STEEL – COMPOSITE MARINE STRUCTURES

ABSTRACT

To improve stability and functionality of a ship by reducing and re-distributing its weights, to make management of ship much more cost-effective, to protect its hull from the harmful impacts of marine environment, constructing steel ship's superstructure by using Fibre Reinforced Polymer based composites (FRP) has been found very wide application area in today's shipbuilding industry. This experimental study aiming to contribute the related efforts which the industry pays a lot of importance has been focused on the bonding performance of two materials which have very different properties: steel and FRP.

To determine the reliability of bonding of these two materials, it is necessary to study on the fracture failure mechanism on the interface of the related materials. Considering this very critical failure for laminated materials, E-glass/epoxy composites and shipbuilding steel bonding's performance has been measured under Mode I, Mode II and single-lap adhesively bonded joints' tensile loading conditions as the case studies.

Strain energies as the measures of the performance have been calculated under three different loading conditions, for three roughness values of steel surface namely SA0, SA1 and SA2.5 and for two epoxy products of different producers. To minimize test errors, five specimens for each system have been produced. So, totally 90 tests have been performed.

From the results obtained from the tests and the calculations, it has been concluded that:

- The surface roughness of steel has a significant effect on the bonding performance of such kind of materials combination.
- These tests can be used as a quality assurance tools for epoxy products.,

- The strength of interfaces under shear loads (Mode II) are much more higher than which under tensile loads (Mode I).
- The performance of the resin can be improved by using the undercoat materials in an economical way.
- For the reduction of Mode I data, Area Method is much more advisable than Modified Beam Theory Method.
- To evaluate steel – FRP adhesive joints' performance Mode II test could not be found adequately useful because of the differentiation of the related materials' properties and behaviors.
- Instead of Mode II test, tensile test for single lap adhesive joints has been concluded as a practical way to determine an even to optimize steel – FRP bondings.

Keywords: Steel shipbuilding, steel-FRP bonding, fracture mechanics, Mode I, Mode II, single-lap adhesively bonded joint, surface roughness

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	vi
BÖLÜM BİR – GİRİŞ.....	1
1.1 Çelik Yapılarda Polimer Esaslı Kompozit Malzeme Kullanımı.....	1
1.2 Denizel Çelik – Kompozit Bileşimleri.....	6
1.3 Gemi İnşaatı Çeliklerine Genel Bakış.....	9
1.4 İleri Kompozit Malzemeler.....	10
1.5 Yapıştırma Yoluyla Çelik – Kompozit Bağlantısı.....	11
1.5.1 Yüzey Hazırlığı Etkisi	13
1.5.2 Bağlantı Şeklinin Etkisi	14
1.5.3 Yapıştırıcı Özellikleri	20
1.5.4 Hasar Biçimleri	23
1.5.5 Epoksi Yapıştırıcılar	25
1.5.6 Yapıştırma İçin Yüzey Hazırlığı	28
BÖLÜM İKİ – KATMANLARARASI KIRILMA HASARININ	
İNCELENMESİ.....	18
2.1 Katmanlararası Kırılma Hasarı.....	33
2.1.1 Griffith Analizi	34
2.1.1.1 Irwin Modifikasyonu.....	36
2.1.1.2 Kırılma Yükleme Koşulları.....	40

2.1.2 Mode I Çift Konsol Kiriş (ÇKK) Testi	41
2.1.2.1 ÇKK Numunesinin Hazırlanması ve Test Prosedürü.....	45
2.1.2.2 ÇKK Testi Veri İşleme	46
2.1.3 Mode II Ucu Çentikli Eğilme (UÇE) Testi.....	50
2.1.3.1 UÇE Numunesinin Hazırlanması ve Test Prosedürü.....	53
2.3.2 UÇE Testi Veri İşleme.....	54
2.2 Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantıların Analizi: Analitik Yöntemler.....	56
2.2.1 Volkersen Analizi.....	62
BÖLÜM ÜÇ – MALZEME ve YÖNTEM.....	66
3.1 Gemi İnşaa Çeliği.....	66
3.1.1 Sıyırma Raspalar.....	67
3.1.2 Çekiç Raspası.....	67
3.1.3 Kum Raspalar.....	68
3.1.4 Tel Fırçalar.....	68
3.1.4.1 El Tel Fırçası.....	68
3.1.4.2 Motorlu Tel Fırçalar.....	68
3.1.5 Kimyevi Boya Çıkarıcılar.....	69
3.1.6 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü.....	69
3.2 Numunelerin Yüzey Pürüzlülüğünün Saptanması.....	70
3.3 Numunelerin Üretimi	72
3.4 Numunelerin Üretiminde Kullanılan Epoksi.....	72
3.4.1 Epoksi Astarlar.....	73

3.4.1.1 Raspalanmamış Yüzeylere Uygulanan Yüzey Toleranslı Epoksi Astar (Üretici – 1).....	73
3.4.1.2 Raspalanmış Yüzeylere Uygulanan Çinkoca Zengin Epoksi Astar (Üretici – 1).....	74
3.4.1.3 GR 4480 Solventli Yüzey Toleranslı Epoksi Astar (Üretici – 2)	76
3.4.2 Epoksi Katmanlama Reçineleri.....	77
3.4.2.1 Ürün No.1	77
3.4.2.2 Ürün No.2	78
3.5 Cam Elyafı.....	78
3.6 Birleştirme ve Katmanlama.....	80
3.7 Deney Düzeneği.....	82
3.8 Gerçekleştirilen Deneyler.....	86
BÖLÜM DÖRT – SONUÇLAR.....	89
4.1 Mode I Yükleme Koşulları Deney Sonuçları.....	90
4.2 Mode II Yükleme Koşulları Deney Sonuçları	94
4.3 tek Karşılıklı Yapıştırırmalı Bağlantı Kesme Deneyi Sonuçları.....	94
BÖLÜM BEŞ – DEĞERLENDİRME.....	100
KAYNAKLAR.....	103

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Çelik Yapılarda Polimer Esaslı Kompozit Malzeme Kullanımı

Bilindiği gibi, ileri polimer kompozit malzemelerin uygulamaları son derece güncel olup, çeşitli endüstri dallarında hızla ve yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Çelik yapıların onarımı ve iyileştirilmesi, anılan kullanım alanlarından biridir. Plaka şeklinde kaplama veya sarım teknikleri, mukavemet ve katılığı olduğu kadar, konu beton kırışlar olduğunda sünekliği de arttırmaktadır (Büyüköztürk vd., 2004). Polimer kompozitlerin diğer alışlagelmiş güçlendirme yöntemlerine göre ömür ve ömrü boyunca maliyet anlamında da ilk bakışta görülmeyen üstünlükleri vardır (Pendhari vd., 2008).

Birçok nedenden ötürü, betonarme, çelik ya da dökme demir yapılar yapısal olarak yetersiz hale gelebilmektedir. Tasarım aşamasında beklenen mukavemet değerlerine, yine bu aşamadaki hatalar nedeniyle uygulamada ulaşılamayabilmektedir. Bu hatalar, yetersiz güvenlik katsayısının kullanımıyla ortaya çıkan marjinal tasarım ve/veya tasarım hataları, düşük nitelikli malzeme kullanımı, ya da yapının yetersiz işçilik / yönetim ile tamamlanması şeklinde sıralanabilir. Hizmet ömrü boyunca ise, güvenlik gerekliliklerinin artışı, kullanım amacında değişim ya da modernizasyon gereksinmesi gerilmelerin dağılımında, uygulanan yüklerin büyüklüğünde, yoğunluğunda veya konumunda değişikliklerle değişime yol açacaktır. Bu da yapının tamamının ya da bir kısmının yetersiz kalması suretiyle desteklenmesi ihtiyacını doğuracaktır.

Metal yapıların iyileştirilmesi gerekliliğinin birçok gerekçesi olabilmektedir. Örneğin metal bir köprünün, yoluna dökülen buz giderici tuzdan kaynaklanan korozyon nedeniyle aşınması rehabilitasyon ihtiyacını doğurmaktadır. Benzer şekilde denizel ortamın korozif etkisine maruz kalan gemiler de dahil olmak üzere çelik yapılar doğan aşınımından dolayı onarım gereksinmesi içinde olabilecektir. Ayrıca

aşırı ve döngüsel yüklemelerin yol açtığı yorulma kırıkları da aşırı çökme ve malzeme hasarı şeklinde ortaya çıkabilecektir.

Bakımın ve yerel onarımın hasarlanmış yapıyı gerektiği gibi iyileştirmediği hallerde geriye başvurulacak iki seçenek kalmaktadır: yapıyı tamamen veya kısmen ortadan kaldırarak yeniden yapmak ya da bir güçlendirme programı başlatmak.

Güçlendirme ile yıkıp yeniden yapmak arasındaki seçenekler malzeme ve işçilik maliyetleri, iyileştirme sırasında yapının işlevselliğini yitireceği zamanın önemi ya da diğer yapı ve tesislere olan etkisi gibi etmenlere bağlı olarak saptanacaktır. Bununla birlikte güçlendirmenin sağlayacağı finansal yarar, yıkıp yeniden yapmanın karşısında eğer basit ve çabuk bir güçlendirme ile daha fazla ise, bu son seçenek çoğunlukla tercihe değer bulunmaktadır. Ayrıca, eğer söz konusu yapının, örneğin tarihsel bir değeri varsa yıkma / ortadan kaldırma seçeneği devre dışı kalacaktır.

Metal yapıların güçlendirilmesi veya daha katı hale getirilmesi için uygulanan alışlagelmiş teknikler yapıya ilave çelik plakaların perçinle, kaynakla veya yapıştırıcı yardımıyla bağlanmasını içermektedir. Bu tekniklerin pratikteki başarısı yadsınmamakla birlikte genelde çelik plakaların kullanımının, özelde ise bağlama çelik plakaların kullanımının olumsuzlukları vardır. Sadece yapıştırıcıyla bağlanmış çelik plakların durumu göz önüne alınacak olursa, bazı olumsuzluklar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Ömrü etkileyen faktörler ve korozyon etkileri belirsiz olarak kalacaktır,
- Yapısal elemanlardaki yabancı maddeler bağlantı öncesi ortadan kaldırılmamış olabilir,
- Plakalar mutlaka yüzey hazırlama işlemine tabi tutulmuş olmalıdır,
- Yüzey temizleme / kumlama işlemi sırasında bozunmalardan kaçınmak için plakanın kalınlığının belli bir limitin altında olmaması gerekmektedir ki bu diğer, genellikle 5 mm olarak öngörülür, (Ayrıca plakanın düzgünlüğünü güvence altına almak için ise plakaların boyunun 6 – 8 metreyi geçmemesi gerekmektedir.)

- Karmaşık profilleri destekleme, bu yapılara plaka yerleşimi güç olacaktır,
- Plakaların ağırlığı da taşıma ve yerleştirmeyi güçleştirmektedir,
- Bağlantı sırasında çelik işlerini gerçekleştirmek için genellik maliyeti arttırıcı bir iskele ihtiyacı söz konusudur.

Güçlendirmede, yapıyı iyileştirmede çelik plakayla bağlantıyla, elyaf takviyeli polimer (ETP) kompozitlerin kullanımı karşılaştırılacak olursa ise,

- Elyafların istenilen konum, hacim oranı ve doğrultuda yerleştirme imkanı olduğu için ihtiyaca en uygun çözümü sunabileceği,
- Kullanılacak çeliğin ağırlığıyla kıyaslanmayacak kadar az bir ağırlıktaki malzemenin lifleri doğrultusunda istenilen mukavemet ve katılık değerlerine ulaşılabilceği,
- Taşıma ve işlemenin ETP malzemeler için çok daha kolay olduğu,
- İşten önce yapılacak hazırlıkların ETP malzemeler için çok daha az olduğu, bununla birlikte erişilmesi güç konumlara daha kolay ulaşılabilceği,
- Özellikle karbon elyaf ile güçlendirilmiş polimerler (carbon-fibre-reinforced polymers, CFRP) ve aramid elyaf ile güçlendirilmiş polimerlerin (aramid-fiber-reinforced polymer, AFRP) iyi yorulma ve sünme (creep) direnci gösterdiği,
- ETP'lerin üretim ve taşınmaları için gereksindikleri birim kütle başına enerjinin çelikten çok daha az olduğu söylenebilir.

ETP'lerin olumsuzlukları ise şöyle sıralanabilir:

- Birbirleriyle aynı hizada olmayan bağlantı yüzeylerine karşı toleranslı olmamaları oluşturulan plakanın yüzeyden tabaka tabaka ayrışmasına neden olabilmektedir,
- Gevrek kırılma modları olasılığı çok daha fazladır,
- Malzeme maliyetleri yüksektir. Birim hacim temelinde, ETP'ler çelikten 4 – 20 kez daha yüksek maliyet gereksinirler.

Çelik yapıların yenilenmesine bazı önemli zorlukları içermesi açısından sık rastlanmaz (Mertz ve Gillespie, 1996; Mertz vd., 2001). Öncelikle, yüksek mukavemete ve katılığa sahip olması çeliği güçlendirmesi zor bir malzeme haline getirmektedir. Özellikle çelikten çok daha düşük elastisite modülüne sahip kompozitlerin kullanımı söz konusuysa. Böyle bir durumda izin verilebilir bir uzama halinde güçlendirici malzeme, çeliğin bazı geometrik koşullar ve yükleme koşulları altında akmasına izin verilmediği takdirde daha düşük gerilme değerleri altında çalışacaktır. Sonuçta kompozit malzeme – yapıştırıcı bağlantısı en zayıf nokta olacak ve hasarın oluşumunu kontrol edecektir. Örneğin, epoksi yapıştırıcı çelikten çok daha zayıftır ve nonlinear bir sonlu elemanlar modeliyle (Sen vd., 2001), bu yapıştırıcının yüksek katman ayrışması gerilmelerinin doğduğu ETP plakalarının uçlarında hasara uğrayacağı görülmektedir.

Korozyona uğramış çelik yapıları güçlendirmenin geleneksel yöntemi civatalama veya kaynak yöntemiyle çelik plakların bağlanmasıdır. Bununla birlikte, bu tekniğin birçok olumsuzlukları vardır:

- Kullanılan montaj yöntemi emek-yoğun ve zaman alıcıdır.
- Prosedür, delme, üstüste bindirme ve fabrikasyon tamamlanana kadar ağır çelik plakaların oldukları pozisyonda kalmasını gerektirmektedir.
- Plakların uçlarında kaynak yorulmasından doğan kırıkların olması ve tüm sistemde de şekilsel bozunmaların görülmesi ihtimali her zaman vardır.
- Yapısal elemanların ağırlıklarındaki artış söz konusu elemanların taşıma kapasitesinde zaafların ve çökmelerin artışına neden olacaktır.
- Varolan yapının delinmesi de yapıda geçici de olsa zafiyete neden olacaktır.

Çalışan kirişlerin dışından kompozit plakalarla kaplanması uygulaması ise oldukça yaygındır, çünkü bu tekniğin bir çok avantajı vardır:

- Uygulama alanında / yerinde doğrudan gerçekleştirilebilir.

- Plaklar hafif olduğundan yapıştırıcıların polimerizasyonu sırasında ağırlık destekleme donanımı gereksinimi yoktur.
- Uygulama süresi azdır.
- Ömrü uzundur.

Bu avantajlar, doğabilecek bir maliyet fazlalığını da bertaraf edecektir.

Metal kirişlerin iyileştirilmesi, tipik olarak polimer kompozit plakların ya da önceden hazırlanmış tabakaların metalik kirişin flencine bağlanması ve böylelikle metalik kirişe ek bir flenç katılığı ve mukavemeti sağlanması uygulamasını içerir.

Kompozit plaka, yalnızca orijinal metalik bileşenin muadili olarak gerek mukavemet, gerekse mimari açıdan düşünülemez. Bu uygulama aynı zamanda olumsuz çevresel koşullarda bir dayanım da sağlamaktadır. Bu dayanım, kompozit malzemenin sahip olduğu mukavemet ve mekanik performansın ötesinde bir önem taşımaktadır. Çünkü sözü edilen dayanım, malzemelerin ve birleşim noktalarının çalıştıkları çevreye olan maruziyet süresinin bir fonksiyonu olarak düşünülebilirler. Buna ilaveten, nem ve ısıнын birlikte oluşturdukları etki, uygulanan gerilmenin de etkimesiyle yapışma davranışında ve/veya yapıştırıcı malzemenin katılığının değişmesi şeklinde gözle görülebilir sonuçlar doğuracaktır. Bağlantılara etkiyen çoğu çevresel girdi sınır bölgelerde görülmektedir ki başlangıçtaki yüklerin çoğu bu bölgelerden içe doğru aktarılmaktadır. Sonuç olarak, herhangi bir bağlantı noktası için başarı kriterleri yüksek kalite ve bütünselliktir. Rehabilitasyon veya onarımın hizmet ömrü, büyük bir oranda, bağlantının yükü transfer edebilmesinde ve çevresel etmenlere karşı dayanımına bağlıdır.

Konuyla ilgili olarak geliştirilmiş olan yöntemlerin etkinliği ve nihai başarısı, yükün ve çevresel etmenlerin seçilen sistemin bağlantı bütünlüğü ve stabilitesi üzerindeki etkilerini iyi anlayarak, uygun kompozit uygulamaları seçmekten geçmektedir. Bir kompozit sistemle ona uygun olarak seçilen yapıştırıcının çevresel dayanımı plaka bağlantılarında doğru uygulamalar yapabilmek için çok büyük önem taşımaktadır.

1.2 Denizel Çelik – Kompozit Bileşimleri

Deniz araçlarının performansını yalnız imalat teknolojileri bağlamında değil, bununla birlikte hizmet ömrü boyunca arttırmaya yönelik çabalar gözle görülür bir artış içindedir. Gerek ticari, gerek özel kullanım amaçlı teknelerdeki yapısal ağırlık azaltması, tasarım amacına hizmet edecek bir şekilde yük veya hız artımına karşılık gelecektir. Bunun yanı sıra, yapısal ağırlıktaki azalma, ağırlığın yeniden dağılımı yardımıyla teknenin performansına da hizmet edecektir. Böyle olunca hem düşük ağırlık, hem de uygun yük dağılımı tüm tekne endüstrisinin yararına bir çabadır (Boyd vd., 2008).

Askeri gemiler, temelde askeri operasyonların yürütüldüğü platformlardır. Bu tür gemiler, hava ve deniz koşulları ne olursa olsun açık denizde çalışabilmelidir. Böyle olunca, geminin stabilitesi yaşamsal önem taşıyan bir unsur olarak görülmelidir. Gemi dengesine etkiyen en önemli unsur da, enine ağırlık dağılımıyla doğrudan ilgili olan ağırlık merkezinin dikey konumudur. Eğer üstyapı ağırlığında bir azaltma sözkonusu olursa, ağırlık merkezinin yerinde de bir düşme ve dolayısıyla gemi dengesinde bir artış olacaktır. Geleneksel çelik üstyapılar yerine hafif kompozit üstyapıların uygulanmasının yaygınlaşmasına, bu araştırmanın da katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Örneğin Fransız donanmasının sahip olduğu çok sayıda çelik malzemeyle inşa edilmiş fırkateynde kompozit helikopter hangarı yer almaktadır (Le Lan vd., 1992). Bir gemi, özel bir yük dağılımı ve bunun sonucunda iyileştirilmiş bir denge ile çalışmak amacıyla tasarlanabilse de ortaya çıkan form geminin amaçlarına hizmet etmeyebilecektir. Askeri gemiler, hız ve yüksek manevra yeteneği, gerek coğrafi ve gerekse askeri anlamda dost olmayan ortamlarda çalışabilmeleri amacıyla uzun ve ince bir formda tasarlanmaya bir eğilim içindedirler. Modern gemiler, son derece sofistike savunma sistemleriyle birlikte, navigasyon ve haberleşme sistemlerinin de bulundurmaktadırlar. Bu sistemler genellikle üst yapıda yer almaktadır ve bu durum da denge açısından sorun yaratma potansiyeli taşımaktadır. Bu sorun ancak iki

şekilde çözülebilir. Bu yollardan birincisi, gemi genişliğini ve bu yolla dengeyi arttırmaktır ki, sonuçta boya nazaran genişlik boyutu büyüyeceği için performansta düşme yaşanacaktır (Lewis, 1992). Alternatif çözüm ise, geminin su üstündeki kısmının ağırlığını eklenen cihazların ağırlığını telafi edecek şekilde düşürmektir. Bu araştırma kapsamında yapılacak olan deneysel çalışma, ikinci çözüm yolunun etkinliğini arttırmak amacını taşımaktadır.

Üstyapıların imalatında kompozit malzemelere başvurmaın ek bazı yararlarından daha söz edilebilir. Bilindiği gibi üstyapılar iki şekilde tasarlanabilir. Bunlardan birincisi tekne kirişinin bütüncül mukavemetine katkıda bulunmalarının istendiği haldir. Bu amaca ulaşabilmek için, güverte ile üstyapının bağlantısının rijit olması, üstyapının mümkün oluğunca uzun tutulması ve gemi genişliği boyunca olmasıyla birlikte boyuna mukavemet elemanları içermesi gereklidir. İkinci çözüm olarak ise, üstyapının boyu kısa tutulmak ve ana yapıdan ayırştırmak suretiyle tekne rijitliğine hizmet etmeyerek tasarlanması seçeneği vardır. Ayırştırma, çoğunlukla düşük modüllü malzemeler kullanılarak yapılır. Kompozit malzemeler, çelik ile neredeyse aynı çekme ve basma mukavemetine sahipken elastisite modülleri çeliğin ancak %10'u kadardır. Böyle olunca kompozitlerin kullanımı, üstyapıların teknedan ayırştırılması için son derece uygun olduğu görölmektedir.

Ayrıca, bir geminin güvertesinde yeralan ve dalga nedeniyle tekne görderinde oluşan döngüsel eğilme gerilmelerine maruz kalan uzun çelik üstyapılar, kendilerinin uç noktalarındaki güverte bağlantılarında veya süreksizliğin olduğu noktalarda gerilme yığılmalarına neden olacaktadırlar. Buna kanıt olarak, Avustralya Kraliyet Donanması adına Amerika Birleşik Devletleri'nde inşa edilmiş olan Adeliaide sınıfı firkateynlerin alüminyum üstyapılarında ve gemi boyunun %55'i boyunca rastlanan yorulma kırılmaları örnek gösterilebilir (Grabovac, 2003). Kompozit malzemelerin kullanımı ve bu malzemelerin çelikle uyumsuz olan modülleri sayesinde gerilme yığılmaları ve böylelikle yorulma kırılmaları önlenabilmektedir (Smith ve Murphy, 1986).

Çelik ve alüminyum malzemeden inşa edilmiş gemiler, tıpkı dinamik olarak yüklenmiş diğer metal yapılar gibi yorulma ve kırılmaya uğrama potansiyeline sahiptirler. Bu hasarlarla baş etmek için tercih edilen yöntem ise, yorulma mukavemetinin altında çalışacak bir yapının tasarım aşamasında daha kalın malzeme kullanmak, genişleme bağlantıları (expansion joints) gibi elemanlara veya doğacak gerilmeleri yayacak şekilde yuvarlatılmış köşeler, şaşırtmacalı olarak yerleştirilmiş açıklıklar gibi iyi düşünülmüş formlara başvurmaktır (Grabovac, 2009). Tüm bu önlemlere karşın, özellikle savaş gemileri gibi yüksek performanslı bir geminin servis ömrü boyunca bünye çatlaklarına rastlanması kaçınılmaz olmaktadır.

Bu tür hasarların kalıcı bir şekilde onarılması, tekne üzerinde bazı değişikliklerin yapılmasını kaçınılmaz kılmaktadır. Değişiklik aşamaları, kırılmaya yol açan çatlakların kaynağını bulmak amaçlı analizler ve bu analizler doğrultusunda da mevcut tasarımın değiştirilerek onaylanmış yeni yapının yerleştirilmesini içermektedir. Sözü edilen işlemin uzun süren ve pahalı bir işlem olduğu açıktır. Yapının yeniden düzenlenmesi çoğu ağır birçok donanımın kaldırılmasını gerektirecektir. Bunca kapsamlı işlerin genellikle 5 yıllık havuz bakım-onarım dönemine ertelenmesi gerekecektir.

Sonuç olarak, kırık ilerlemesini durduracak geçici onarımlar gerekli hale gelmektedir. Kırık çevresini delip kaldırarak ve yeniden parça kaynatmak suretiyle yapılan geleneksel onarımlar iyi sonuç vermemektedir. Bu doktora çalışmasında, üzerinde durulacak olan plastik kompozit malzeme ve metalik yapı bağlantıları, metalik yapının üzerine kompozit yama işleyerek kırılmanın ilerlemesinin önüne geçmek niteliğiyle uygulamada iyi sonuçlara varmaya yardımcı olmaktadır.

Kompozit üstyapıların çelik güverteye bağlanması problemi birçok çalışmayla incelenmiştir. Smith ve Murphy (1991), çelik postalarla kuvvetlendirilmiş Cam Takviyeli Plastik (CTP) üst yapıların nükleer bir patlamaya maruz kalma halini incelemişlerdir. Bu çalışma Dow (1994) tarafından da sürdürülmüştür. Bu çalışmaların sonucunda görülmüştür ki, CTP'nin ağırlık bakımından tüm yararlarına karşın patlamanın oluşturulduğu senaryolarda zafiyet gösterdiği görülmüştür.

Zafiyetin nedeninin, CTP malzemenin patlama enerjisini, deformasyonla sönmölemekdeki başarısızlığıdır. Kompozit malzemelerin plastik bölgesi yoktur ve yüksek gerinme değeri matris kırılmalarına yol açıp yapısal bütünlüğü bozmaktadır. Hibrid yapı ancak içinde bulunan çelik postalar yardımıyla plastik deformasyona uğramaktadır. CTP paneller yalnızca elastik deformasyona uğramak suretiyle yapısal bütünlüğü sürdürebilmektedir. Chalmers (1994), savaş gemilerinde CTP kullanmanın avantajlarını ortaya koyan bir çalışma yapmıştır ki çalışmasında üstyapılarda bu tür malzemeden yararlanma konusuna özel bir vurgu yapmaktadır. Bununla birlikte vardığı yargıda, çelikle kompozit üstyapı bağlantılarının nasıl olması gerektiği ve bu bağlantıların denizel ortamda veya bir yangın halinde nasıl çalışacağına dair bilgilerin yetersizliğinden söz etmektedir. Ardından Boyd (2008) tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, bir çelik-kompozit bağlantının yorulma performansının ve hidrotermal yaşlandırmadan sonraki performansının çok da endişe edilecek düzeyde olmadığını göstermektedir.

1.3 Gemi İnşaatı Çeliklerine Genel Bir Bakış

Metal yapıları kompozit plak ile kaplama konusunun tasarımı ve analizi için uygun yöntemin seçimi, metal yapının malzemesi ve kesit geometrisiyle yakından ilgilidir. Gemi yapılarının imalatında kullanılan metalik malzemeler genel olarak karbon çelik olarak adlandırılır.

Çelik, demir ingotlarından ısıt işlemler uygulanarak saflaştırma ve şekillendirme işlemleriyle elde edilir. Ana unsurları büyük ölçüde demir ve kontrollü miktarda karbondur. Üretimde metal bazlı olmayan kükürt, silikon ve fosfor gibi maddelerin miktarının en azda tutulması önemlidir. Çelik malzemenin teknik karakteristikleri kimyasal yapı değişikliği ile sağlanır. Örneğin; çekme mukavemeti çelikteki karbon miktarını değiştirerek veya kimyasal yapıya krom, nikel, manganez gibi alaşım maddeleri katılarak değiştirilebilir. Genelde karbon miktarının artırılması çeliğin sertliğini artırır.

Gemi inşaatında genelde kullanılan çelik fiyat, özellik ve bulunabilirlik yönünden uygun olan “yumuşak çelik (= mild steel)” malzemedir. Soğuk ve sıcak şekil vermeye ve kaynağa uygun olan bu malzemenin işleme sıcaklıklarında mekanik özelliklerinde önemli bir değişme gözlenmez. Ancak çok düşük sıcaklıklarda darbe sertliğini kaybeder, kırılabilirlik kazanır ve bünyede kırılabilirlik zafiyeti (= brittle fracture) yaratabilir. Bir çeliğin gemi inşaatında kullanılabilmesi için gemiyi belgeleyecek sınıflandırma kurumunca denetlenmiş, test edilmiş ve damgalanmış olması gerekir.

Sınıflandırma kurumları gemi inşaatında kullanılan çelikleri belirli bir gruptandırmaya tabi tutmuş ve bunlara A’dan E’ye semboller vermiştir. Genelde A ve B yumuşak çelik türleridir. Sınıflandırma kuruluşlarının kuralları hangi tip çeliklerin hangi şartlar altında kullanılacağını ve mekanik özelliklerinin ne olması gerektiğini net ve açık bir şekilde belirtir.

Genelde gerilmelerin yüksek olduğu büyük tanker ve dökme yük gemileriyle ağırlığın önemli olduğu savaş gemileri, ro-ro feri ve yolcu gemileri gibi konstrüksiyonlarda yüksek gerilim çelikleri kullanılır. Benzer şekilde soğutulmuş LPG ve LNG taşıyan gemilerinin tanklarında soğuk ortamda kırılabilirleşmeyen ve tanklarında korozyon etkisi yüksek maddeler taşıyan tankerlerde ise korozyona mukavemetli çelik malzeme kullanılır.

1.4 İleri Kompozit Malzemeler

Metalik yapıların onarımında başvurulmuş elyaf takviyeli polimer plakalarda kullanılan temel lifler karbon lifleri, aramid lifleri ve E-cam lifleridir.

Kompozit malzeme, ya fabrika koşullarında profil çekme gibi yöntemlerle üretilmiş olmalı, ya da yerinde imal edilecektir. Her iki durumda da polimer kompozitin mekanik özellikleri elyaf hacim oranına ve elyaf doğrultusuna bağlı olarak değişecektir. Bu özellikler ise üretici tarafından tanımlandığı gibi, üretilen malzemelerden numune alınarak test edilmek suretiyle de öğrenilebilecektir.

1.5 Yapıştırma Yoluyla Çelik – Kompozit Bağlantısı

Metalik bir yüzeye ileri kompozitin bağlanması en zayıf noktaya iki yapıyı bir arada tutan yapıştırıcı bölgesinde rastlanır.

Yapıştırıcı ile birleştirmek, yapıştırılacak yüzeylere uygulanan yapıştırıcının katılarak bağ oluşturması sürecinden oluşan bir malzeme bağlama yöntemidir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, mühendislik uygulamalarındaki mekanik bağlantılara alternatif olarak gelişmekte ve mekanik birleştiricilere göre birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Bu avantajlar arasında düşük yapısal ağırlık, düşük üretim maliyeti ve iyileştirilmiş hasar toleransı sayılabilir. Bu tip bağlantıların ETP'den yapılmış yapısal bileşenlere uygulanması son yıllarda dikkat çekici bir şekilde artmıştır. Geleneksel bağlayıcılar, genellikle elyafların kesilmesine ve gerilme yığılmasına neden olmaktadır ki her iki olumsuzluk yapısal bütünlüğü bozan niteliğe sahiptir. Bunun tersine yapıştırılmış bağlantılar daha sürekli olup mukavemet – ağırlık oranı, tasarım esnekliği ve imalat kolaylığı bakımından potansiyel avantajlara sahiptir. Yapıştırıcıyla bağlantı havacılık, uzay, elektronik ve otomotiv gibi ileri teknoloji uygulama alanlarından inşaat, spor malzemeleri ve paketlenme gibi geleneksel endüstriye dek geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Bu uygulamalar tek gövdeli olduğu kadar sandviç yapıları da içermektedir (Banea ve da Silva, 2009).

Yapıştırıcılı bağlantıların yapının yük taşıma kapasitesini azaltmadan, yeterli bir zaman dilimi ölçüsünde, statik ve döngüsel yüklere dayanması arzu edilir. Uygun malzeme modellerinin ve hasar kriterlerinin olmayışı kompozit yapıların 'aşırı tasarım'ına yol açmaktadır. Güvenlik önlemleri ise çoğunlukla yapıştırıcıyla oluşmuş bağlantıların sıklıkla mekanik bağlantı elemanlarıyla (örneğin civatalar) bir ek güvenlik önlemi olarak güçlendirilmelerini gerektirmektedir. Bu tür uygulamalar, pahalı ve ağır yapıların oluşmasına neden olur. Güvenilir tasarım ve kestirim yöntemlerinin gelişmesinin kompozitler ile birlikte yapıştırıcıların daha etkin kullanımına yol açması beklenebilir. Mühendislik yapılarında yapısal bağlantıları tasarlayabilmek için onları analiz edebilmek gerekir. Bunun anlamı, verilen bir

yükleme altında gerilme ve gerilmeleri belirleyebilmek ve muhtemel hasar noktalarını tahmin edebilmektir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların analizi için iki temel matematiksel yaklaşım vardır: kapalı form (analitik yaklaşımlar) ve sayısal yöntemler (sonlu elemanlar analizi, vb.).

Diğer taraftan, sandviç kompozit yapıların kullanımı yüksek mukavemet ve düşük ağırlık bileşimini sağladıkları için ve böylelikle oldukça verimli yapılara imkan tanıdıkları için birçok endüstri alanındaki çeşitli uygulamalarla artmaktadır. Sandviç yapılar tarafından sunulan diğer avantajlar kaynak işleminin azalması, yüksek yalıtım kalitesi ve tasarım çeşitliliğidir. Bir sandviç sistemin en basit formunda iki ince, katı ve mukavim malzemeden oluşan dış yüzey ve bu yüzeyleri ayırıştıran kalın, hafif nüve malzeme katmanı vardır. Katman dökümden önyapıya kadar her tip kompozit malzeme yüzey malzemesi olarak kullanılırken polimerik, metalik ve seramik malzemeler de nüve malzemesi olarak işlev görmektedir.

Kompozitlerin yapıştırıcıyla birleştirilmesi üzerine yapılan ilk çalışmaların çoğu 1970'ler ve 1980'lerin başında uzay endüstrisiyle ilintili olanlardır. Yıllar boyunca ise konuyla ilgili analitik, sonlu elemanlar temelinde sayısal ve deneysel birçok çalışma yürütülmüştür. Matthews vd. (1982) ETP'lerin yapıştırıcı bağlantılarındaki mukavemet konusunda oldukça kapsamlı bir değerlendirme sunmuşlardır. Bundan sonra dikkate değer sayıda araştırma çalışması gerçekleştirilmiş, yeni analitik yaklaşımlar geliştirilmiş ve sonlu elemanlar yöntemi geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Kompozit yapıların yapıştırıcıyla bağlanması konusundaki literatür, bağlantı mukavemeti konusuna odaklanmıştır. Özel olarak ilgilenilen konu başlıkları: yüzey hazırlama, bağlantı şekli, yapıştırıcı nitelikleri, çevresel koşullar, bağlantıların analitik ve sonlu elemanlar yöntemiyle analizi ve test yöntemleri olarak belirmektedir. İster tek yüzey, ister sandviç kompozit yapıların ağırlık azaltması gereken haller için uygulamalarında günden güne artan bir öneme sahip olmalarına karşın, yapıştırıcıyla bağlantının temel yapısal yük taşıma uygulaması olarak kabul edilebilmesinin önünde güvenilir bir malzeme modeli bulunmamasından kaynaklanan sınırlandırmalar vardır.

1.5.1 Yüzey Hazırlığı Etkisi

Yüzeyler birleştirme sürecinde önemli bir rol oynarlar ve belki de bu bir yapıştırıcıyla birleştirme bağının kalitesini güvence altına alan en önemli süreçtir (Baldan, 2004). Uygun ve doğru bir biçimde gerçekleştirilen ön işlem yüzeylere zaman zaman ek özellikler katarlar. Yapıştırıcıların uygulanması öncesi yapılan yüzey hazırlığı maksimum mekanik mukavemete erişebilmek için önerilmektedir. Birleşim mukavemeti birleştirilecek parçalara uygulanacak birleştirme öncesi yüzey hazırlığıyla belirgin bir şekilde artacaktır. Uygun bir yüzey kimyasının oluşması, yüzey hazırlama sürecinin en önemli aşamasıdır. Çünkü Davis ve Bond (1999) tarafından da belirtildiği gibi yapıştırıcıyla bağlantının dayanımı yüzeyin bütüncüllüğü ile doğrudan ilgilidir. Anılan araştırmacılar bağlantıların dayanım problemini ‘temiz yüzey kavramı’ yaklaşımı kullanarak incelemişlerdir. Yüzey hazırlığında yapılan en yaygın yanlışlık, iyi bir bağlantı için sadece temiz bir yüzeyin yeterli olduğu görüşüdür. Yapışma için temiz bir yüzey gerekli bir koşuldur fakat bağlantı dayanım için yeterli değildir. Çoğu yapısal yapıştırıcılarda, yapıştırılan parçaların yüzeylerindeki atomlar ve yapıştırıcıyı oluşturan bileşenler kimyasal bağların oluşması sonucunda çalışmaya başlar. Bunlar temelde kovalent bağlar olup, bazı iyonik ve statik çekicilikte bağlar da yapıda bulunabilir. Bu kimyasal bağlar, yapıştırılan parçalar arasındaki yük aktarma mekanizmalarıdır. Birçok yapıştırıcı bağlantısı, üretim sırasındaki kötü süreçler, kaliteli yüzey hazırlığının olmaması nedeniyle hasara uğrar (Davis ve Bond, 1999).

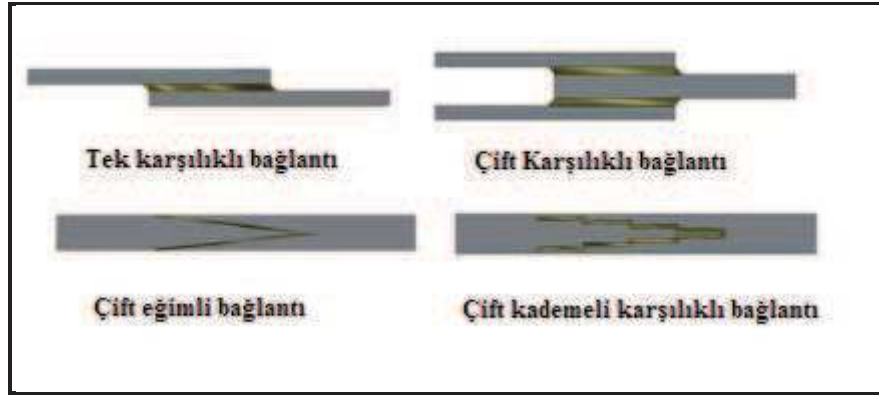
Termoset kompozitler için tipik kompozit yüzey iyileştirmeleri geleneksel pürüzlüleştirme / çözelti temizleme tekniklerini içermektedir. Bu tür kompozitler, mukavim ve uzun ömürlü bir bağlantı için yüzey kimyası ve yüzeyde topolojik değişime gereksinim duyarlar. Bu kompozitler için yüzey hazırlığının temel amacı yapıştırılacak parçanın yüzey enerjisini mümkün olduğunca fazla arttırmaktır. Yüzey hazırlığı suyla temas açısını azaltır, yüzey gerilmesini artırır ve böylelikle de bağlantı mukavemetini iyileştirir (Molidor vd., 2001).

Yüzey hazırlığının birçok çeşidi yüzey gerilmesinin artırımını, yüzey pürüzlülüğünün artırımını, yüzey kimyasının değişimini ve böylelikle bağlantı mukavemetinin ve ömrünün artırımını farklı başarı düzeylerinde sağlarlar: pürüzlendirme / çözücü temizliği, raspalama, kabuk soyma, katman ayrıştırma, asitle muamele, korona boşaltım iyileştirmesi, plazma iyileştirmesi ve lazer iyileştirmesi. Bununla birlikte bu tip kompozitler için önerilen yüzey hazırlama yöntemi kuru nitrojen içinde bir hafif alüminyum oksit raspadır (Davis ve Bond, 1999). Pürüzlülük, elyafları ortaya çıkarmayacak bir şekilde reçine yüzeyinin ortadan kaldırılmasıdır. Epoksiler arası yüzey bağlantıların iyi gerçekleşmesi nedeniyle bu tür bağlantılarda kimyasal modifikasyona gerek yoktur.

1.5.2 Bağlantı Şeklinin Etkisi

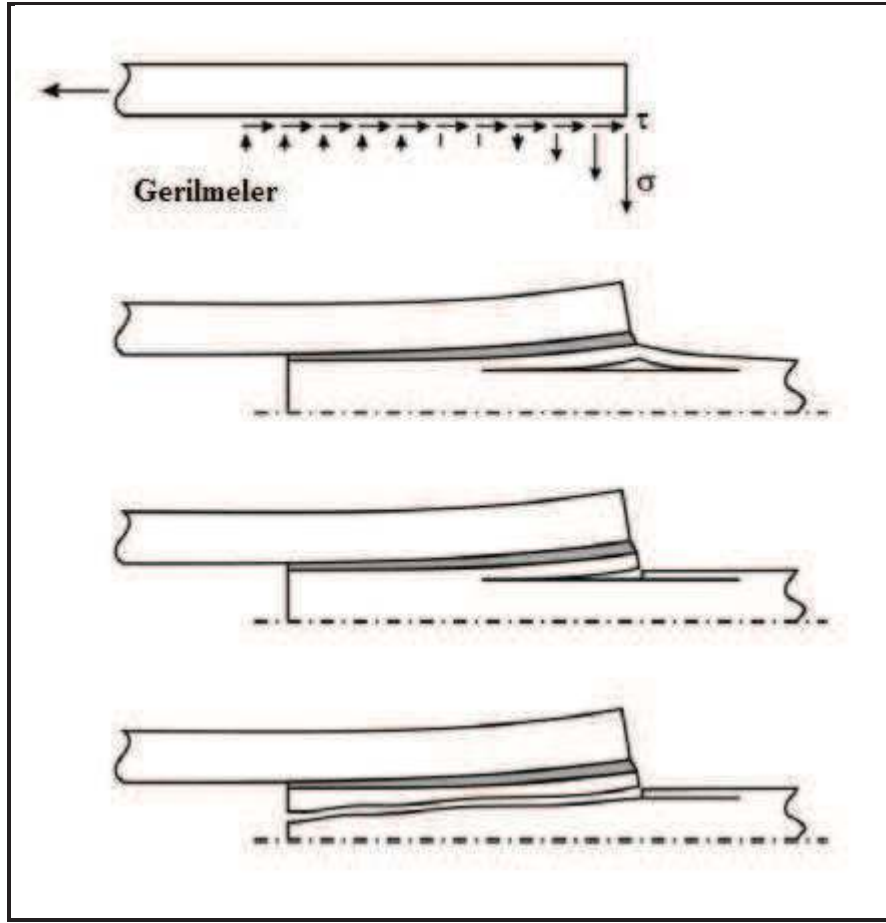
Bağlantılar yapıların tasarımında en büyük iddiaları sergilerler. Kompozit yapılarda durum ise özellikle böyledir. Çünkü bağlantılar yapının geometrisinde ve malzeme niteliklerinde süreksizlik yaratır ve böylelikle yüksek yerel gerilme yığılmalarına yol açarlar.

Yüzey hazırlığından farklı olarak bağlantı biçimi genellikle tasarımın bir ürünüdür. Adams ve Wake'in (1984) sunduğu gibi geniş bir çeşitlilikteki bağlantılar tasarımcıların kullanabileceği seçenekler arasında yer almaktadır. Yaygın olarak literatürde analiz edilen bağlantı şekilleri tek karşılıklı (single-lap), çift karşılıklı (double-lap), çift eğimli (double scarf) ve kademeli karşılıklı (stepped-lap) bağlantılardır (Şekil 1.1). Bunlar dışındaki bağlantı şekilleri de ender de olsa çalışılmıştır. Chamis ve Murthy (1991), sıcak ve ıslak hizmet ortamında, statik ve döngüsel yük altında çalışacak kompozit yapıştırırmalı bağlantının ön dizaynı için bir süreci adım adım tanımlamışlardır.



Şekil 1.1 Yapıştırırmalı bağlantı şekilleri

Verilen bir tip bağlantının verilen bir tip yükün altındaki mukavemeti bağlantıdaki gerilme dağılımına bağlıdır ki bu da bağlantı geometrisi ve yapıştırıcı ile yapıştırılan parçaların mekanik özellikleriyle ilintilidir. ETP kompozit bileşenler söz konusu olduğunda üst üste binmiş karşılıkların uçlarındaki kalınlık boyunca doğan gerilmeler özel bir ilgi gerektirir. Çünkü kompozit malzemelerin anılan doğrultuda oldukça zayıf oldukları bilinmektedir. Bunun neticesinde çoğunlukla yüksek mukavemetli bağlantılar gerçekleştirilir ki bu durumda yapıştırıcıdan önce kompozit yapıda bir hasar oluşumu görülecektir (Şekil 1.2). Bağlantı, gerilme yığılmasını minimize edecek şekilde tasarlanmalıdır. Bazı gerilmeler (sıyrılma ve yarıлма) minimize edilmeli, diğerleri (kesme ve basma) ise maksimize edilmelidir.



Şekil 1.2 Çift karşılıklı yapıştırırmalı bağlantılarda, kompozit bağlantı parçalarının kalınlık boyunca etkiyen enine gerilmeleri nedeniyle oluşan hasar

Kompozit – metal yapıştırırmalı bağlantılarda, kompozit tarafın katmanlı yapısı ve kalınlık doğrultusu boyunca olan zayıflık hasar mekanizmasını çok daha karmaşık hale getirir (Tong, 1997). Bağlantı mukavemetindeki bu belirsizlikler nedeniyle birçok tasarımcı, malzemeyi optimum kullanmama pahasına yapılarını yüksek güvenlik katsayıları kullanarak tasarlar. Örneğin, bağlantı tasarımındaki küçük değişiklikler sıyırma gerilmelerini etkiler. Tek karşılıklı, çift karşılıklı, çift eğimli ve kademeli bağlantıların karşılaştırmasından bunların sıyırma gerilmelerini azaltmak üzere tasarlandığı görülecektir. Yapıştırılacak parçalara şekil vermek de kompozit bağlantılardaki sıyırma gerilmesinin azaltılmasına yöneliktir.

Tek karşılıklı bağlantı, basitliği ve etkinliği nedeniyle en yaygın kullanılan bağlantı şeklidir. Bununla birlikte, bu bağlantıyla baş gösteren problemlerden biri

gerilme yığılmalarının (kesme ve sıyırma) karşılıklı parçaların ucunda ortaya çıkmasıdır. Tek karşılıklı bağlantıların etkinliğini iyileştirmek için araştırmacılar çeşitli teknikler geliştirmişlerdir. Bunlar yapıştırılan parçaların geometrisini değiştirmek (Kim vd., 2001; da Silva ve Adams, 2007; Kaye ve Heller, 2002), yapıştırıcı geometrisini değiştirmek (Mazumdar ve Mallick, 1998; Lang ve Mallick, 1999) ve taşıntı geometrisini değiştirmeyi kapsamaktadır.

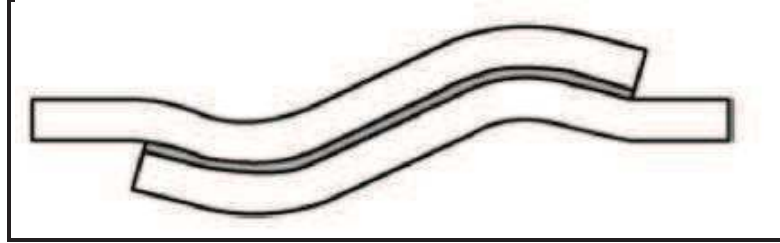
Yapıştırılan parçaların geometrisini değiştirmeyi çözüm olarak gören çalışmalar, bu parçaların uçlarına ve kademelendirmeye odaklanmışlardır. Uç açısı ve ucun sonunun kalınlığı birçok çalışmada ve tasarım rehberinde ele alınan parametreler olarak belirmektedir.

Lang ve Mallick (1999) karşılıklı parçaların arasındaki yapıştırıcı katmanından bir parçayı ayırmak suretiyle yeni bir bağlantı tekniği önermişlerdir. Çalışmaları bağlantının ortalama mukavemetinin bu ayrıştırma ile arttığını göstermiştir. Bu yaklaşım ayrıca ağırlık ve maliyet azaltımı konusunda da olumlu etkilere sahiptir. Bununla birlikte ayrıştırma nedeniyle oluşan kısa etkin bağlantı uzunluğunun yorulma hasarını olumsuz yönde etkilediği de görülmüştür.

Taşıntı şekli ve boyutu (taşıntı, bağlantı imalatı sırasında, bağlantı bölgesine sıkılan yapıştırıcının fazlalıklarını ifade eder), gerilme yığılmasının azaltılması konusunda göz önüne alınan bir diğer parametredir (Lang ve Mallick, 1998; Wang vd., 1998; Rispler vd., 2000; Belingardi vd., 2002). En büyük gerilme taşıntının boyut ve biçimine bağlıdır. Taşıntıya şekil vermenin bağlantı geometrisinde yumuşak geçişlere izin verecek gerilme yığılmalarını azalttığı görülmüştür (Lang ve Mallick, 1998).

Zeng ve Sun (2001) ise yeni bir dalgalı bindirme bağlantı konfigürasyonu önermiştir (Şekil 1.3). Bu bağlantıda bindirmenin uçlarındaki kalınlık boyunca gerilmeler basma türündedir ve bağlantı mukavemetine son derece olumlu etkisi vardır. Özellikle yorulma performansı da iyidir. Bununla birlikte geometrik değişiklikler imalat açısından bazı sınırlamaları beraberinde getirmektedir. Örneğin

Üretim açısından bakıldığında, yapıştırılacak parçaların şekli karşılıklı bindirme ve kademelendirmeye nazaran daha karmaşıktır. Üretim kısıtlamaları yapıştırıcı geometrisi seçeneklerine de benzer şekilde uyarlanabilir.



Şekil 1.3 Dalgalı bindirme bağlantısının görünümü (Zeng ve Sun , 2001)

Bugünlerde üzerinde yoğun bir şekilde durulan bir başka teknik ise üst üste binen parçalar arasında birden fazla yapıştırıcı kullanmaktır. Böylelikle değişken modlslere sahip yapıştırıcı bölgesi oluşturmak suretiyle uç bölgelerdeki gerilme yığılmasını, daha tekdüze gerilme dağılımı sağlayarak azaltmak amaçlanmaktadır (Srinivas, 1975; Patrick, 1976; Fitton ve Broughton, 2005; da Silva ve Adams, 2007a ve 2007b). Bu teknikte bir esnek ve bir sünek yapıştırıcı üst üste binen parçaların uçlarında yer alırken, rijid ve gevrek başka bir yapıştırıcı ise orta kesimde bulunmaktadır. Bu yaklaşım her ne kadar kuramsal olarak tartışılmış ise de (Srinivas, 1975; Patrick, 1976), görece olarak az yayınlanmış deneysel çalışma, bağlantı performansında belirgin iyileşmelere yol açtığına dair pratik bir yöntemi ortaya koyabilmiştir. da Silva ve Adams (2007a ve 2007b) kuramsal ve uygulamalı olarak ifte yapıştırıcılı metal – kompozit bağlantıların performanslarının, özellikle yapıştırıcıların ısıl genleşme katsayıları arasındaki fark büyükse iyileştiğini göstermişlerdir. Günümüze dek yapılmış çok az sayıda çalışma da yapıştırıcıların malzeme niteliklerinin tedricen arttırılmasıyla bağlantı performansının iyileştiğini göstermiştir.

Bir diğer teknik ise karşılıklı binme noktalarında yapıştırılan malzemenin niteliklerini değiştirmektir. Ganesh vd. (1998) malzeme nitelikleri sürekli bir şekilde değişen kompozitlerin, alışılagelmiş elyaf yerleştirme teknolojisinin modifikasyonuyla üretilebileceğini göstermişlerdir. Bu teknoloji ile tasarım doğrultusunda binme bölgesinde yapıştırılan malzemenin modülüsü

değiştirilebilecektir. Ganesh ve Choo (2002) bir tek karşılıklı yapıştırıcı bağlantının yapıştırılan parçasının elastik modülünün yükseltilmesi, en yüksek kesme kuvvetlerinin azaltılmasını sağlamış ve yapıştırıcı katmanında daha düzgün yayılmış gerilmeleri sağlamıştır. Boss vd. (2003) yapıştırılan bölgelerin geometrik olarak farklılaştırılmasıyla modülüs olarak farklılaştırılmasının gerilmelerde düşmeyi sağladığı ve modülüs ile geometri farklılaşmasının birlikte uygulanmasıyla daha yüksek performanslı bağlantı tasarımlarına ulaşılabileceğini göstermişlerdir.

Uygulamada yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar yapısal yüklere olduğu kadar ısı yüklerine de maruzdurlar. Yapıştırıcının ve yapıştırılacak olan kompozit parçaların ısı ve mekanik özelliklerinin uyumsuzluğu bağlantının tüm elemanlarındaki fakat özellikle yapıştırıcı tabakasındaki ısı alanlar tarafından harekete geçirilen deformasyonlar ve gerilmelere neden olmaktadır. Örneğin, yüksek kurlenme sıcaklığına sahip yapıştırıcılar, kurlenme sıcaklığından itibaren soğuma sırasında gelişen yüksek ısı gerilmeler nedeniyle düşük sıcaklıktaki bazı uygulamalar için uygun seçenek olmayabilir.

Isıl yükler, farklı ısı genleşme katsayısına sahip birbirine benzemeyen malzemelerin bağlantısında özellikle önem taşıyacaktır. Çünkü yapıştırılacak parçalar arasındaki ısı genleşme karakteristiklerindeki farklılıklar ciddi problemlere yol açar (Rastogi vd., 1998). Örneğin alüminyum – kompozit yapıştırıcı bağlantılar için yapıştırılacak parçaların ısı genleşmeleri arasındaki fark dikkate değer ölçüde ısı gerilmeler doğuracak şekilde oldukça fazladır. Buna ilaveten karbon/epoksinin oldukça düşük ısı genleşmesi söz konusudur ki metalle bağlandıklarında bu malzemeler yüksek ısı gerilmeler doğurmaya eğilimlidir.

Rastogi vd. (1998), alüminyumun kompozite simetrik çift karşılıklı ve düzgün ısı yüklerine maruz bağlantısında, üç-boyutlu ısı gerilme dağılımını çalışmışlardır. Bağlantı köşelerinin ayrışma başlangıcı için kritik noktalar olduklarını bulmuşlardır.

Owens ve Lee-Sullivan (2000) ise kompozit – alüminyum bağlantılardaki kırık ilerlemesi nedeniyle oluşan katılık kaybını incelemişlerdir. Oda sıcaklığında ve

-40°C’de, adeta statik koşullarda tek karşılıklı bağlantıları test etmişler ve bağlantı katılığının ince yapıştırıcı tabakasından ziyade yapıştırılan parçaların test sıcaklığına verdikleri tepkilerden etkilendiği sonucuna varmışlardır.

Kompozit bir noktada birleşen iki eğimli bağlantılar ya da onarımlar üzerinde birçok araştırmacının çalışması vardır (Adkins ve Byron Pipes, 1985; İkegami vd., 1990). Bununla birlikte bir kompozit yapıdaki anılan türdeki bir bağlantı birbiri üstüne binen veya kademeli olarak binen bağlantılardan çok daha karmaşıktır. Çünkü bağlantı yüzeyinin katılığı, bağlantı hattı boyunca değişmektedir. Gerilme dağılımı (sıyırma ve kesme) katman doğrultusuna bağlı olarak yapışma hattı boyunca değişebilecektir (Johnson, 1989). Belirli katmanlamaları olan kompozit parçalar arasındaki eğimli bağlantılarda belirgin gerilme yığılmaları vardır (Gunnion ve Herszberg, 2006; Harman ve Wang, 2006). Gerilme yığılması etmeni, katmanlamaların sıralamasına ve kalınlığına bağlıdır. Elyafların kendileri bağlantı hattından geçemedikleri için yapıştırıcı ile kompozit katmanların (özellikle 0° doğrultusunda olanların) katılığı arasında büyük farklar söz konusudur ve bu da eğimli bağlantı boyunca belirgin gerilme değişikliklerine yol açmaktadır.

Yapıştırıcı ile bağlanmış sandviç bağlantıların gelişimi, yapısal ağırlığın düşürülmesi gereklilikleri ve her zaman geçerli olan daha etkin yapılara olan talep nedeniyle gerçekleşmektedir.

1.5.3 Yapıştırıcı Özellikleri

Yapısal uygulamalarda kullanılan yapıştırıcılar: epoksiler (yüksek mukavemet ve sıcaklık dayanımına sahiptir), sianoaerilatlar (plastik ve kauçuğa hızlı yapışırlar, fakat nem ve sıcaklığa karşı düşük direnç gösterirler), anaeorobikler (silindirik şekillere yapışmaları kolaydır), akrilikler (hızlı kürlenme yeteneğine sahip ve kirli ve hazırlığı özenli yapılmamış yüzeyler için uygun geniş bir ölçekte ürünleri olan yapıştırıcılardır), poliüretanlar (düşük sıcaklıklarda iyi esneklik sağlarlar ve yorulma direncine dayanımları vardır), silikonlar (düşük gerilmelerdeki uygulamalarda son derece yüksek sızdırmazlık sağlar, çok yüksek derecede esnekliği vardır ve çok

yüksek sıcaklık dayanımları söz konusudur) ve yüksek sıcaklık yapıştırıcıları fenolikler, polimitler ve bismaleimitler. Tablo 1.1, farklı tiplerdeki yapıştırıcılar için tipik nitelikleri vermektedir.

Tablo 1.1. Yapıştırıcıların tipik özellikleri

	Açıklama	Çalışma sıcaklıkları (°C)	Kürlenme
<i>Epoksi</i>	Yüksek mukavemet, ısı direnç, görece olarak düşük kürlenme sıcaklığı, kullanım kolaylığı, düşük maliyet	-40 'dan +100'e	Tek komponentli epoksiler ısıyla kürlenirler. İki komponentli olanlar ise oda sıcaklığında kürlenir. Kürlenme sıcaklıkla doğru orantılı olarak hızlandırılabilir.
<i>Siyanokrilatlar</i>	Plastik ve kauçuk için hızlı bağlantı kurma yeteneği, nem ve ısıya karşı düşük dayanıklılık	-30'dan +80'e	Oda sıcaklığında neme maruz kaldığında dahi saniyeler veya dakika mertebesinde hızlı kürlenme.
<i>Anaerobikler</i>	Sızdırmazlığın önemli olduğu yerler için uygundur. İyi bir sızdırmazlık ışiksiz, ısı ve oksijenin olmadığı ortamlarda sağlanır. Silindirik şekilli cisimlerin bağlanması için uygundur.	-55'den +150'ye	Oda sıcaklığında havasız ve oksijensiz ortamda kürlenir.
<i>Akrilikler</i>	Hızlı kürlenme ve fazla hazırlığı yapılmamış, kirli yüzeyler için çok çeşitli yapıştırıcılardır.	-40'dan +120'ye	Serbest radikallerle kürlenirler.
<i>Poliüretanlar</i>	Düşük sıcaklıklarda iyi esneklik, yorulmaya karşı direnç, çarpma mukavemeti ve ömür sergilerler.	-200'den +80'e	Oda sıcaklığında.
<i>Silikonlar</i>	Düşük gerilmeleri uygulamalar için mükemmel sızdırmazlık sağlarlar, yüksek esneklikli olup, çok yüksek sıcaklığa karşı dirençlidirler. Uzun kürlenme süresi ve düşük mukavemete sahiptirler.	-60'dan +300'e	Oda sıcaklığında.
<i>Fenolikler</i>	Kısa zaman periyodunda mukavemetlerini iyi korurlar, ısı şoklara dirençleri sınırlıdır.	-40'dan +175'e	Isı ve yüksek basınçla kürlenirler.
<i>Polimidler</i>	Isı dengeli olup, dış faktörlerden oldukça etkilenirler ve işlenmeleri zordur.	-40'dan +250'ye	Isı ve yüksek basınçla kürlenirler.
<i>Bismaleymidler</i>	Çok rijit olup, düşük sıyrılma gerilmesine sahiptirler.	-50'den +200'e	Isı ve yüksek basınçla kürlenirler.

Yüksek sıcaklıkta kullanılacak reçine-matris sistemlerinin kullanımı arttıkça buna uygun ve eşit bir şekilde sıcaklık dengeli yapıştırıcı sistemlerine gereksinim artmaktadır. Kompozit matris reçine olarak sıklıkla kullanılan epoksi yapıştırıcılar, epoksi temelli matrisler için birleştirme kompoziti olarak reçine ve yapıştırıcı arasındaki uyum nedeniyle sıklıkla kullanılırlar. Farklı tiplerdeki yapıştırıcıların mekanik değerleri Tablo 1.2'de sunulmaktadır.

Tablo 1.2 Bazı yapıştırıcıların mekanik özellikleri (Banea ve da Silva, 2009)

Yapıştırıcı	Türü	Kesme modülüsü, G (MPa)	Kesme mukavemeti (MPa)	Kesme uzaması (%)
AV138	Epoksi	1559	30	7.8
DP805	Akrilik	159	8.4	180
SikaFlex265	Poliüretan	0.7	4.5	450
RTV 106	Silikon	-	1.3	400
AS1805	Silikon	0.68	1.47	330
Redux 326	Bismaleymid	1180	36.5	3.63

Bilindiği gibi, iyi bir birleşime ulaşmak için iyi bir yapıştırıcı ile işe başlamak gerekir. Yapıştırıcı seçim süreci, her uygulamada görevini gerçekleştirecek genel geçer bir yapıştırıcı bulunmadığı için zordur ve uygun yapıştırıcıyı seçmek, mevcut seçenek bolluğunda oldukça karmaşıktır. Bununla birlikte yapıştırıcı seçimi yapıştırılacak parçaların tipi ve yapısı, hazırlama ve yapıştırıcı uygulama yöntemi ve bağlantının hizmet ömrü boyunca karşılaşılabilecek umulan çevresel koşullar ve gerilmeler gibi birçok etmeni içermektedir. Bununla birlikte yapıştırıcının maliyeti de zaman zaman önemli bir unsur olarak belirebilir.

Bir yapıştırıcının bir uygulama için belirlenmesinden önce, izleme testleri birçok yapıştırıcı parametresini değerlendirmek ve karşılaştırmak amacıyla uygulanmalıdır. Bu durum özellikle, hasarların tahripkâr sonuçlara yol açacağı yapısal uygulamalar için gerekli bir önlemdir. Yapıştırıcıların özellikleri büyük bir ölçekte değişiklik gösterir ve uygun seçim iyi bir bağlantı için temel unsurdur. Böyle olunca, birçok konfigürasyon çeşitliliğinde yapıştırıcılı bağlantılardaki gerilmeleri ve gerinmeleri belirlemek yapıştırıcı davranışını, mekanik özelliklerini özellikle gerilme-gerinme eğrisi ve modülüsünü doğru karakterize etmeyi zorunlu kılar (Maheri ve Adams, 2002). Yapıştırıcıların niteliklerini belirlemek için kullanılan yaklaşımlar, kütle (bulk) yapıştırıcı numunelerin ve özel olarak tasarlanmış geometrideki bağlantıların içerdiği ince bağlantı hattının bir ölçüsüdür.

Test geometrilerinin ve numunelerin çok çeşitliliği söz konusudur ve bunlar yapıştırıcı niteliklerinin bulunmasında kullanılmaktadır. Ölçülen parametreler yük ve gerinme olup bunlar bir hasar yaratmak için gerekli unsurlardır. Test geometrisi, birleşim yüzeyi ve bağlantı hattı boyunca düzgün dağılmış saf bir gerilme durumu sağlamalı, gerilme yığılmasına izin vermemeli ve yüzey hazırlığı, yapıştırıcı

katmanında kohesif hasarın oluşmasını sağlayacak şekilde gerçekleştirilmiş olmalıdır.

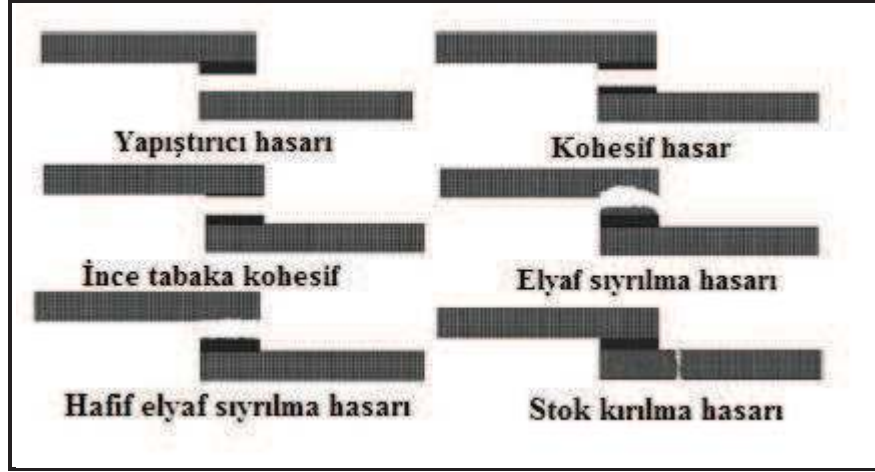
Günümüzde, yapıştırıcı niteliklerini analiz etmek ve deneysel olarak gerçeklemek için bir çok ASTM ve ISO standardı mevcuttur. Bu standartlar testler için bir temel oluşturmaktadır. Yaygın olan test metotları yapıştırıcıların şu özelliklerini elde edebilmek için geliştirilmiş ve kullanılmaktadır: çekme testleri, kesme testleri, basma, sıyırma ve durabilite testleri ve dinamik testler. Mukavemet karakterizasyonu için tipik testler kesme testi, kırılma tokluğu için ise çift konsol kiriş (double cantilever beam, DCB) testi ve çözücülere olan direnci değerlendirebilmek için ise sürtme (wedge) testi olarak sıralanabilir.

Yapıştırıcıların kesme niteliklerini ölçmek için bir çok yöntem vardır: çentikli kiriş kesme yöntemi (Iosipescu), çentikli plak kesme yöntemi (Arcan), dökme (bulk) malzemenin burulması ve kalın yapıştırılacak malzeme test yöntemi (Thick-adherent shear test method, TAST). TAST kalın, rijit yapıştırılacak malzemeler sıyırma gerilmelerini ortadan kaldırmaları da düşürdükleri için çoğunlukla tasarım parametrelerinin belirlenmesinde kullanılırlar. Gerilme durumu baskın bir şekilde kesmedir fakat karşılık alanlarının ucunda sıyırma da doğacaktır. Bununla birlikte, en yaygın kullanılan yapıştırıcı bağlantısı, test numunesi tek karşılıklı bağlantının hasar modu yapıştırıcının kesme mukavemetiyle kontrol edilebildiği gibi bağlantı çökmeleri ve dönmeleri ile harekete geçirilmiş sıyırma gerilmelerinin birer sonucudur. Karşılıklı binme alanlarındaki dönme nedeniyle tek karşılıklı çekme testi numunesinden elde edilen veri, yapıştırıcı kesme tasarım verisini elde etmek için kullanılmaz fakat yapıştırıcı seçim aşamasında çeşitli yapıştırıcı sistemlerini karşılaştırmak ve yapıştırıcı niteliklerindeki çevresel etkileri anlamak için yapılan izlemelerde yararlı olacaktır.

1.5.4 Hasar Biçimleri

Hasar biçimleri, her ara yüzey, numune geometrisi ve yüklemedeki bağlantının kalitesi tarafından belirlenir. İncelenen yapıştırıcı ve bağlantının niteliklerinin tam

anlamıyla anlaşılması için karakterize edilmelidirler. ASTM D5573 (ASTM, 2002) standardı uyarınca, ETP kompozit yapıştırma bağlantılarının yedi tipik karakterde hasar biçimi vardır. Bunlar; yapıştırıcı hasarı, kohesif hasar, ince tabaka kohesif hasar, elyaf sıyrılma hasarı, hafif elyaf sıyrılma hasarı, stok kırılma hasarı ya da karma hasar. Bu biçimler Şekil 1.4’de gösterilmektedir.



Şekil 1.4 ETP kompozit parçaların birleştirilmesinde olası hasar biçimleri

Birçok araştırmacı kompozit yapıştırıcı bağlantıların hasar davranışlarının üzerinde çeşitli parametrelerin etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmalarda tipik bağlantı parametreleri yüzey koşulları (yüzey kirliliği, pürüzlülük ve yüzey iyileşmesi gibi), dolgu, bağlantı noktasının kalınlığı, yüzey katmanlama açısı, katmanlama sıralaması, çevresel koşullar olarak belirlemiştir. Ayrıca kompozit yapıştırıcı bağlantıların hasar tahmini için de birçok çalışma yürütülmüştür. Bununla birlikte, anılan tip bağlantıların hasar tahmini, yapıştırma yöntemleri ve parametrelere göre hasar dayanımı ve biçimi değişiklik gösterdiği için oldukça zordur.

Kompozit sandviç yapılar için önde gelen hasar biçimleri burkulma, yerel katman ayrışması ve yorulma/kırılma. Burkulma düşük elastisite modülüne sahip kompozit yapılar için hasar biçimlerinin en önemlilerinden biridir. Yüzeylere uygulanan her türlü yük ve kompozit malzemeler arasındaki bağlantılar için yerel

katmanlar arası ayrışma, yapı sisteminin bütününde çok vahim hasarlara yol açabileceği için hasar biçimlerinden en ciddiisi olarak nitelenmektedir. Katmanlararası kesme mukavemeti ve kalınlık doğrultusunda etkiyen normal mukavemet, kompozit yapıyı yerel katmanlararası ayrışmadan koruma amacıyla dikkatle tasarlanmalıdır. Hasar biçimlerinin başlangıcı, ilgili unsurun (yüzeyler, yapıştırıcı, nüve malzeme) malzeme niteliklerine, geometrik boyutlarına ve yükleme tipine bağlıdır.

Sandviç yapıların yapıştırırmalı bağlantı noktalarının hasar biçimine ilişkin bir çok çalışma söz konusudur. Shenoi vd. (1998) kompozit T-bağlantılardaki hasar mekanizmasını sonlu elemanlar yöntemi ve deneyle karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Bu çalışmanın önemli bir sonucu, T-bağlantıların hasar mekanizmaları ve davranışlarının geometri ve malzemeye bağlı olduğunun bulunmasıdır. Toftegaard ve Lystrup (2005), sandviç paneller için yaptıkları benzer çalışmada iki farklı tipte hasar tanımlamışlardır. Bunlardan biri temel panelin kesme hasarı ise diğeri de T-bağlantının kendisinin uğradığı hasardır.

Yukarıda da belirtildiği gibi, bir ileri polimer kompoziti metalik yüzeylere bağlayabilecek çok sayıda yapıştırıcı söz konusudur. Polimer kompozit plakları anılan yüzeylere bağlayabilmek için genel olarak kullanılan malzeme epoksidir (Halloway ve Cadei, 2002).

1.5.5 Epoksi Yapıştırıcılar

Epoksiler, moleküler yapılarında epoksi grupların bulunmasıyla karakterize edilen polimer malzemelerin geniş bir ailesidir. Yüksek molekül ağırlıklı lineer epoksiler çoğunlukla termoplastikler olarak kullanılırlar da, bundan daha sıklıkla üç boyutta çapraz bağlı formda erimeyen matrisler olarak termoset biçiminde de kullanım alanı bulurlar. Termoset epoksiler daha eski, en yaygın ve en çok çeşitlilik gösteren yapıştırıcı türü olup metal, cam, kompozit ve seramik gibi mühendislik malzemelerinin bağlantılarında kullanılmaktadır (Baldan, 2004).

Epoksiler, ileri kompozitler için çok yaygın olarak kullanılan matris malzemeler olduğu gibi, epoksi yapıştırıcılar da son derece yaygın uygulama alanı bulmaktadır. Epoksi yapıştırıcılar, bir aşamalı, kürlendirme ajanı halihazırda içine karıştırılmış olarak ya da kullanıcının kullanımdan hemen önce karıştıracağı şekilde kürlendirme ajanı ayrıca bulunan iki aşamalıdır. Bir aşamalı malzemenin formu, güçlendiricisiz, ön-hazırlanmış (pre-preg) örtü veya macun şeklindedir. Oda sıcaklığı veya yüksek sıcaklık kürlenme sistemlerinin her ikisi de kullanılmakla birlikte, daha iyi mekanik özelliklere ulaşabilmek için oda sıcaklığında kürlenmiş yapıştırıcıların yüksek sıcaklıklarda kürlenme sonrası işleme tabi tutulmaları gerekir. Kürlenme zamanları ise çok kritik olmayan basit parçalar için birkaç dakikadan, kritik performans beklenen parçalar için 12 saate dek değişebilir (Society of Manufacturing Engineers, 1989).

Bütün yapıştırıcılar bağlanacak oldukları malzemenin yüzey koşullarına duyarlıdırlar. Bununla birlikte, metal sözkonusu olduğunda epoksiler diğer yapıştırıcılara nazaran daha çok duyarlık göstermektedir.

Epoksi yapıştırıcıların avantajları şöyle sıralanabilir:

- Yüksek yapıştırma sağlayacak şekilde güçlü ve çok amaçlı yapıştırıcıların tasarlanmasına imkan sağlarlar.
- Çekme ve kesme mukavemetleri iyidir.
- Yüksek rijidliktedirler.
- İyi kimyasal dirençleri vardır.
- Çok iyi bağlanırlar.
- Çok az çekme (shrinkage) ile kürlenirler.
- Yüksek sıcaklıklara karşı toleransları iyidir. Birçok epoksi -51°C 'den 260°C ' ye dek genişleyen sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. Oda sıcaklığında kürlendikten sonra kesme mukavemetleri 35 – 70 MPa arasında olmaktadır (Degarmo vd., 2003).

İlgili pazarda birçok epoksi olmasına karşın, seçilen ürünün kürlenme koşullarıyla uyumlu olması gerekir.

Isı bir bileşenli epoksiler için kürlenme ajanı olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte epoksilerin çoğu, (a) reçine, (b) kürlenme ajanı ve (c) hızlandırıcı, plastik hale getirici ve dolgu olmak üzere bazı katkıları da içermektedir. Anılan bu katkılar kürlenme hızını iyileştirmek, esneklik, soyulma direnci, çarpma direnci ve diğer özellikleri geliştirmek üzere kullanılmaktadır. Isı ayrıca kürlenmeyi yönlendirmek ve hızlandırmak amacıyla da kullanılmaktadır.

Epoksi yapıştırıcılar çoklu-işlevli (Schwartz, 1992) reçineler temelindedir ve 225°C'ye dek iyi mukavemet korunumu göstermektedirler. Uzun erimli yaşlanma olduğu takdirde, epoksilerin uygulamaları 175°C'den yüksek olmayan sıcaklıklarda gündeme gelebilmektedir.

Bununla birlikte, bu yapıştırıcıların şu olumsuzlukları vardır:

- Görece olarak düşük soyulma direnci ve esneklik,
- Neme ve uygulanacağı yüzeydeki kontaminantlara çok duyarlı birleşme mukavemeti,
- Düşük sıcaklıklarda çoğunlukla gevrekleşme,
- Görece olarak yavaş kürlenme hızı,
- Görece olarak yüksek reçine maliyeti.

Yapısal uygulamalarda, yeterli mukavemete 8 ila 10 saat arasında ulaşmakla birlikte, tam mukavemete 2 ila 7 gün içinde varmaktadırlar (Degarmo vd., 2003).

Günümüzde havacılık endüstrisi için geliştirilmiş yeni epoksi yapıştırıcıların 215°C'ye kadar mükemmel bir mukavemet korunumları söz konusudur. Bu sıcaklık değerinden sonra mukavemet hızlı bir şekilde düşmektedir (Örneğin 260°C'de 6.9 MPa'e). 215°C'de 3000 saat yaşlandırmanın ardından, yapıştırıcı özgün kesme mukavemetinin %80'nini yitirmektedir (Shwartz, 1992).

1.5.6 Yapıştırma İçin Yüzey Hazırlığı

Çoğu yapısal yapıştırıcılar, yapışacakları yüzeyin ile yapıştırıcıyı oluşturan bileşenlerin atomları arasındaki kimyasal bağların formuna göre biçimlenirler. Bunlar genel olarak kovalent bağlardır, zaman zaman hidrojen bağlara da başvurulduğu olur (Kinlock, 1987).

Bu kimyasal bağlantılar yapıştırılacak parçalar arasındaki yük transfer mekanizmasıdır. Kimyasal bağların oluşumunu engelleyen bulaşık malzemelerin giderilmesini sağlayan çözeltiyle temizleme yapıştırma işleminin en önemli aşamasıdır. Her ne kadar bu işlem temiz bir yüzey sağlamakta ise de uzun erimde bağlantı ömrü için kabul edilebilir yüzey koşullarını sağlamamaktadır.

Yapıştırılacak yüzeylerin hazırlığı için temel ilkeler aşağıdaki gibi sıralanmaktadır (David ve Bond, 1999):

- Kontaminasyondan arındırılmalıdır.
- Yapıştırıcı ve yapıştırılacaklar arasında yeterli düzeyde etkin bir kimyasal yapı oluşmalıdır.
- Çevresel aşınma etkilerine (özellikle de nemli ortam etkilerine) hizmet süresi boyunca dayanımlı olmalıdır.

Bunlara ek olarak, yüzey hazırlığı için üç temel adımdan bahsedilmektedir:

- Yüzey kirliliğinin kimyasallar yardımıyla giderilmesi (degreasing)
- Kimyasal olarak aktif bir yüzeye uygulama (bu aktivite yüzey pürüzlülüğüyle sağlanmış olmalıdır)
- Ara yüzün neme karşı olan direncini arttırmak için yüzeylerin kimyasal modifikasyonu

Yani etkin bir yapıştırıcı bağlantısı için temiz ve kimyasal olarak aktif bir yüzey temeldir. Buna asitle temizleme veya pürüzlülük kazandırma yoluyla ulaşılabilir. Anılan birinci yöntem fabrika koşullarında gerçekleştirilmekle birlikte, ikinci yöntem imalatın yapılacağı alan için uygundur. Pürüzlülük yaratma genellikle zımpara kullanılmak suretiyle elle veya raspalamayla gerçekleştirilir. Bu yöntemlerden raspalama aktif yüzeyler yaratmak için daha etkindir.

Kompozit parçalar genellikle tek veya her iki yüzeyde ince bir tabaka içerirler. Bu kabuk tabakalardan biri epoksi yapıştırıcının uygulanmasını takiben ayrılabilir. Bu kabuk tabaka cam elyafın ve polimer malzemenin kurban edilen tabakasıdır. Eğer böyle bir tabaka yok ise, kompozit plakanın yapıştırılacak yüzeyini yumuşak bir zımpara ile veya kum raspasıyla pürüzlendirmek ve ardından da kuru bir bez ile kalıntıları alıp, asetonla temizlemek gerekecektir. Bu işlemlerin ardından yapıştırıcının uygulanması safhasına geçilebilir.

Oldukça çok sayıda çelik yapı (köprüler, açıkdeniz platformları, büyük maden donanımları ve binalar) yenilenmeye gereksinim duyarlar. Çelik yapıların onarımı ya da güçlendirilmesi için alışlagelmiş yöntem, levhaların kesimi ve yerine yenisinin monte edilmesi ya da dıştan yeni bir çelik levhanın yerleştirilmesidir. Bu levhalar, genellikle havaleli, ağır, monte edilmesi güç ve korozyon ile yorulmaya dayanımları sorun yaratmaya eğilimlidir. Bu bakımdan özellikle çelik malzemelerin güçlendirilmesinde yeni seçenek arayışları gündemdedir.

Bu bağlamda, ETP kullanımı bir seçenek olarak öngörülmektedir.

Bilindiği gibi ETP yüksek mukavemet / ağırlık oranına sahip ve çevresel aşınma ile korozyona dayanımı iyi bir malzemedir ve aynı zamanda oldukça esnek, her şekli alabilen ve inşa sırasında da kolaylıkla elleçlenebilen bir yapıdadır (Alsayed vd., 2000; Moy, 2003). ETP, beton yapıların güçlendirilmesinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu kullanıma ilişkin araştırmalar geniş ölçekte gerçekleştirilmiştir (Teng vd., 2002). Amerika Birleşik Devletleri'ndeki (Tavakkolizadeh ve Saadatmanesh, 2002), İngiltere'deki, Japonya'daki ve

İsviçre’deki deneyimler, çelik yapıların yenilenmesinde, ETP’nin kullanımı konusunda güçlü bir potansiyel olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, bu ileri malzemelerin mevcut yapıların güvenli bir şekilde desteklenmesini, yenilenmesini sağlamak amacıyla tam olarak kullanılmasından önce çözülmesi gereken bazı konuların olduğu da bir gerçektir.

Hollaway ve Cadei (2002) “Progress in the Technique of Upgrading Metallic Structures with Advanced Polymer Composites” başlıklı, mevcut durumu anlatan bir derleme yazmışlardır. Bu derleme aşağıdaki konulara derinlemesine girmektedir:

- Yapıştırıcı ile birleştirilmiş ileri polimer kompozitler ile metalik yapılar arasında, çalışma sırasında ortaya çıkan sorunlar,
- Yüzey hazırlığı ve ömür bakımından yapıştırıcıyla birleştirme,
- İnşaat ortamında ETP kompozitlerin rolü,
- ETP levhaların, metal malzemeden imal edilmiş kirişlere birleştirilmeden önce öngerilmelendirilmesi,
- Saha uygulamaları.

Shaaf vd. (2004) bir başka güncel durum belirleyici makaleyi “Retrofit of Steel Structures Using FRP” başlığıyla sunmuşlardır. Bu makalenin içeriğinde aşağıdaki konularda ayrıntılara girilmiştir:

- Çelik kirişlerin onarımı,
- Yorulma ömrü iyileştirmesi,
- Ayırışmadan kaçınma için yüzey hazırlama ve diğer konular,
- ETP ile yeniden yapılandırılmış çelik elemanların ömrü,
- Saha uygulamaları.

Cadei vd. (2004) tarafından oluşturulan “CIRIA Tasarım Rehberi” ise metalik yapıların dıştan birleştirilen ETP ile güçlendirilmesi konusunda ayrıntılı bir tasarım rehberliği sağlamaktadır. Bu rehber özel olarak,

- Malzemeler (dökme demir ve kaba demiri de içeren metalik malzemeler ve ETP güçlendirme malzemeleri),
- Kavramsal tasarım,
- Yapısal davranışlar ve analiz (özellikle ETP ile güçlendirilmiş I-kesitler),
- Bir levhanın uçlarındaki gerilme yığılmasını azaltmak amaçlı tasarım ayrıntılandırması,
- Montaj ve kalite kontrol,
- Operasyonlar (denetim ve bakım, mal sahibinin sorumlulukları).

konularında yol gösterici olmaktadır.

Bu doktora çalışması ise, denizel çevrenin oldukça aşındırıcı etkisine maruz olan gemi saclarının, kimyasal direncinin yüksek olduğu ve esnekliği sayesinde sac malzeme ile uyumlu çalışacağı bilinen polimer esaslı kompozitlerle kaplanmak suretiyle başta gemi bakım-onarım maliyetlerini sacın ömrünü uzatarak, bakım periyodlarını azaltarak ve tekne ömrü boyunca da raspa / boya işçiliği ve zamandan tasarruf ederek yararlar sağlayacak bir uygulama önerisinin etkinliğini deneysel yöntemlerle incelemektir. Bu amaçla,

- Gemi sacı yüzeyinin pürüzlülüğü,
- Epoksi malzeme farklılığı,
- Kırılmaya neden olan yükleme koşulları,

parametreleri temel alınmak suretiyle karşılaştırmalı sonuçlara varılmaktadır. SA0, SA1 ve SA2.5 olmak üzere üç farklı yüzey pürüzlülüğü, iki farklı üretici tarafından üretilmiş epoksi katmanlama reçinesi ve Mode I, Mode II ve tek karşılıklı bağlantıya uygulanan çekme yüklemesi olmak üzere üç farklı yükleme koşulu temelinde herbir

deney seti için beşer deney olmak üzere toplam 90 deney gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte Mode II yükleme koşullarıyla elde edilen sonuçlar deneylerin yenilenmesini gerektiren veri eksiklikleri nedeniyle değerlendirme dışı bırakılmıştır.

Deneyler sonucunda ilgili kırılma yükleme koşullarına özgü gerinme enerjisi salınım oranları ve gerinme enerjileri saptanmış ve bu değerler birbirleriyle karşılaştırılmak yoluyla gemi inşaatı ve bakım-onarımı etkinlikleri için yararlı olacağı düşünülen değerlendirmelere varılmıştır.

BÖLÜM İKİ

YAPIŞTIRMALI BAĞLANTILARDA HASARIN İNCELENMESİ

2.1 Katmanlararası Kırılma Hasarı

Hasarın katmanlararası başgöstermesi hali olan katmanlararası kırılma / ayrışma, 1970'lerin başından buyana üzerinde çalışılmakta olan bir konudur (Pipes ve Pagano, 1970). İşletme yüküne maruz yapılarda katmanlı kompozitlerin kullanılmasıyla katmanlararası ayrışma hasarının yapının ömrünü azaltan başlıca hasar nedenlerinden olduğu açıkça görülmeye başlanmıştır. Konu edilen ayrışmalar, tipik olarak hizmet halindeki kompozit katmanlamalarda baş göstermektedir. Bununla birlikte, ayrışmalar özellikle üretimde el yatırması yönteminin uygulanması aşamalarında, örneğin önceden hazırlanmış (prepreg) katmanların yabancı maddelerle bulaşıklığının neden olduğu zayıf katman yapışmalarında ya da hava kabarcıklarının çokça bulunduğu bölgelerde yerel olarak ortaya çıkar. Ayrışma hasarının üretimden sonra, yapının elleçlenmesi sırasında ortaya çıktığı da görülmektedir.

Özellikler katmanlarının eğilme rijitlikleri farklılıklar gösterdiği hallerde ve yükün yeterli derecede küçük ani artışına bağlı olarak katmanlar arasında çatlaklar oluşur ve ilerler. Katmanlararası ayrışma (delaminasyon) olarak adlandırılan bu hasar tipinin en önemli sebebi; tabakalar arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığı ve eğilme kaynaklı gerilmelerdir. İşte bu noktada kompozitlerin performansını düşüren ve önemli bir hasar tipi olan katmanlararası ayrışmayı engellemek için yapılacak hasar toleransı analizlerinde katmanlararası kırılma tokluğuna ihtiyaç duyulur. **Katmanlararası kırılma tokluğu**; kompozitteki ayrışmanın yük altında ilerlemesini engellemek için gösterdiği direnç ile ölçülür ve kritik gerinim / şekil değiştirme (strain) enerjisi salınım hızı (G_c -Critical Strain Energy Release Rate) ile tanımlanır (Kaman, 2010).

Ayrışma, katmanlararası bir çatlak benzeri süreksizlik şeklinde görülmektedir ve mekanik ve/veya ısı yüklerinin altında ilerlemektedir. Bu bağlamda, yapısal

bütünlük ve malzeme seçim değerlendirmesi konularına oldukça yararlı ve etkin bir yaklaşım olan **kırılma mekaniği yaklaşımının** ayrışma problemlerine de uygulanmasının uygun olduğu görülmektedir. Ayrışmaların kırılma mekaniği, gerinme enerjisi salınım hızı ve kırılmanın yaptığı iş olarak da açıklanabilecek **kırılma tokluğu** temelinde kurulmuştur.

Malzemelerin önemli bir niteliği olarak kabulü yaygınlaşan ‘kırılma tokluğu’nun saptanması için temelde iki yaklaşım söz konusudur: **(1)** Griffith (1921) tarafından geliştirilen “Gerilme yoğunluğu etmeni (stres intensity factor)” ki bu “Griffith analizi” olarak da bilinen bu yaklaşım, homojen ve izotropik malzemeler için geliştirilmiştir ve kırık sonundaki gerilme analizine odaklanmaktadır. **(2)** “Gerinim Enerjisi Salınım Hızı” yaklaşımı ise bir önceki yaklaşımla ilintili olup, izotropik malzemeler kadar izotropik olmayan malzemeleri de içermekle oldukça yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır (Gibson, 1994).

2.1.1 Griffith Analizi

I. Dünya Savaşı sırasında İngiliz bir uçak mühendisi olarak görev yapan A.A. Griffith gevrek malzemelerin kırılması konusunda geliştirdiği ‘kırılma mekaniği’ alanına birbirleriyle çelişkili iki olayı açıklama motivasyonu ile giriş yapmıştır: Camın kırılması için 100 MPa’lık bir gerilme yeterken, cam atomlarının arasındaki bağı koparmak için niçin 10000 MPa’lık bir kuramsal gerilmenin söz konusu olduğu. Birbiriyle uyumsuz görünen bu iki gözlemi uzlaştıracak bir kurama gereksinim duyulmaktaydı. Griffith, bizzat yaptığı cam elyafları üzerine deneylerle elyaf çapı azaldıkça kırılma gerilmesinin arttığını göstermektedir ki bunun anlamı, Griffith’in malzemenin hasarlanması konusunda öngöründe bulunmak için, o güne dek yaygın olarak kullanılan eş eksenli çekme mukavemetinin numuneden bağımsız bir malzeme özelliği olduğu kabulünü terk etmesi gerekliydi. Griffith’e göre, deneylerde gözlenen düşük kırılma mukavemeti de boyuta bağlı olduğu kadar, malzeme içindeki mikroskobik hataların varlığına da işaret etmektedir.

Bu hasar hipotezini kanıtlamak amacındaki Griffith, deney numuneleri içinde yapay hatalar oluşturmuştur. Yapay hata, bir numunedeki diğer kusurlardan daha büyük olan bir yüzey çatlakları şeklindedir. Deneyler, kusurun/çatlakların boyunun karekökü ile kırılma gerilmesinin çarpımının neredeyse sabit olduğunu ve aşağıdaki gibi bir denklemle ifade edilebileceğini göstermiştir:

$$\sigma_f \cdot \sqrt{a} \approx C$$

Denklem 2.1

Burada,

σ_f : Kırılma gerilmesi
 a : Çatlak boyu

Bu denklemin doğrusal elastisite kuramıyla açıklanmasında sorunlar söz konusuydu. Doğrusal elastik bir malzeme için doğrusal elastisite kuramı, keskin bir çatlakların ucundaki gerilmenin ve dolayısıyla gerinmenin (strain) sonsuz olduğunu ifade etmektedir. Bu problemten kaçınmak isteyen Griffith, gözlemlediği ilişkiyi açıklayabilmek için termodinamik bir yaklaşım geliştirmiştir.

Bir çatlakların büyümesi, iki yeni yüzeyin oluşmasını gereksinecektir ve dolayısıyla yüzey enerjisinde bir artışa yol açacaktır. Griffith, çatlakların yüzey enerjisinin sabit 'C' terimi için, bir elastik plaktaki bir sonlu çatlakların elastisite problemini çözmek suretiyle bir ifade bulmuştur. Yaklaşımı kısaca şöyle idi:

- Eş eksenli çekme yükü altındaki mükemmel bir numunenin depoladığı potansiyel enerji hesaplanır.
- Uygulanan yükün 'iş' yapmadığı ve böylelikle numunede bir çatlak oluşumu başladığı yönünde sınır koşulları belirlenir. Çatlak gerilmeyi azaltacak ve böylelikle çatlak yüzeyleri yakınındaki elastik enerjiyi düşürecektir. Diğer taraftan çatlak, numunenin toplam yüzey enerjisini arttıracaktır.
- Serbest enerjideki (yüzey enerjisi-elastik enerji) değişim çatlak boyunun bir fonksiyonu olarak hesaplanır. Hasar, serbest enerjinin bir kritik çatlak

boyunda belli bir uç değere ulaştığı zaman baş gösterecektir. Bu kritik değer aşıldığında serbest enerji çatlak boyunun artışıyla birlikte düşmeye başlayacak ve hasar ortaya çıkacaktır.

Bu prosedürü takip eden Griffith aşağıdaki ifadeye ulaşmıştır:

$$C = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi}} \quad \text{Denklem 2.2}$$

Burada,

E : Malzemenin elastisite modülü
 γ : Malzemenin yüzey enerjisi yoğunluğudur.

2.1.1.1 Irwin Modifikasyonu

Griffith'in kuramı cam gibi gevrek malzemeler için deneysel verilerle uyumlu, son derece iyi sonuçlar vermektedir. Fakat çelik gibi sünek malzemeler için ilişki geçerliliğini yitirmemekle birlikte Griffith'in kuramıyla öngörülen yüzey enerjisi, γ , gerçekçi olamayacak kadar yüksek sonuçlar vermektedir.

II. Dünya Savaşı sırasında, ABD Donanması Araştırma Laboratuvarı'nda, bu konu üzerine çalışan G.R. Irwin (1957) önderliğindeki grup sünek malzemelerin kırılmasında plastisitenin belirgin bir rol oynadığını ortaya koymuşlardır.

Sünek malzemelerde çatlağın ucunda plastik bir bölge oluşmaktadır. Uygulanan yük arttıkça, çatlak büyüyene ve çatlak ucunun arkasındaki malzeme yüksüz kalana dek plastik bölge boyut olarak büyümektedir. Çatlak ucunun yakınındaki plastik yükleme ve yüklemeyi kaldırma döngüsü, enerjinin ısı olarak ayrışıp azalmasında da yol açacaktır. Böyle olunca, Griffith tarafından gevrek malzemeler için geliştirilen enerji dengesi ilişkisine bu ısıya dönüşen enerji terimini de eklemek gerekecektir.

Fizik deyimleriyle, çatlak ilerlemesi için sünek malzemelerde, gevrek malzemelere göre daha fazla enerjiye gereksinim duyulmaktadır.

Irwin'in yaklaşımı enerjiyi iki bölüme ayırmaktadır:

- **Depolanan elastik gerinme enerjisi**, çatlak ilerlemesi olarak serbest kalmaktadır. Bu kırılmayı yönlendiren termodinamik kuvvettir.
- Toplamı plastik dönüşüm enerjisi ve yüzey enerjisi olan **dönüşen enerji**

Dönüşen enerji, kırılmaya karşı bir termodinamik direnç oluşturmaktadır. Dönüşen toplam enerji,

$$G = 2\gamma + G_p \quad \text{Denklem 2.3}$$

Burada birim çatlak ilerleme alanına karşılık gelmek üzere,

γ : Yüzey enerjisi,
 G_p : Plastik dönüşüm enerjisi (diğer kaynaklardan gelen dönüşümleri de içermektedir.)

Böylelikle Griffith'in enerji kriterinin modifiye edilmiş versiyonu aşağıdaki şekli alacaktır:

$$\sigma_f \cdot \sqrt{a} = \sqrt{\frac{EG}{\pi}} \quad \text{Denklem 2.4}$$

Gerilme Yoğuşması Etmeni. Irwin ve arkadaşlarının bir diğer önemli eldesi, bir lineer elastik katı cisimdeki çatlak önü çevresindeki asimptotik gerilme ve deplasman alanları bağlamında kırılma için geçerli olabilecek enerjiyi hesaplayabilmek için bir yöntem bulmuş olmalarıdır (Irwin, 1957). Çatlak ucu çevresindeki gerilme alanı için bu ifade:

$$\sigma_{ij} \approx \left(\frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \right) \cdot f_{ij}(\theta) \quad \text{Denklem 2.5}$$

Burada,

- σ_{ij} : Cauchy gerilmeleri,
- r : Çatlak ucundan uzaklık,
- θ : Çatlak düzlemine olan açı,
- f_{ij} : Çatlak geometrisi ve yükleme koşullarından bağımsız fonksiyonlar.

Irwin, K değerini ‘Gerilme Yoğuşması Etmeni (Stress Intensity Factor)’ olarak adlandırmıştır. f_{ij} 'nin değeri boyutsuz olduğu için, gerilme yoğuşması etmeni ‘MPa.m^{1/2}’ birimiyle ifade edilebilir.

Gerilme Enerjisinin Açığa Çıkması. Irwin’in ilk gözlemi, ‘eğer bir çatlak çevresindeki plastik bölge çatlak boyutuyla kıyaslandığında küçükse, çatlak ilerlemesi için gereken enerji, çatlak ucundaki gerilme durumuna çok da bağlı olmayacaktır’ diye özetlenebilir. Diğer bir deyişle, tamamen elastik bir çözüm kırılma için gerekli enerji miktarını bulmak için yeterli olacaktır.

Çatlak ilerlemesi için gerekli enerji salınım oranı ya da gerilme enerjisinin salınım hızı (strain energy release rate), böylelikle, çatlak ilerlemesinin birim alan başına düşen elastik gerilme enerjisindeki değişim hesaplanabilecektir:

$$G = - \left[\frac{\partial U}{\partial a} \right]_P = - \left[\frac{\partial U}{\partial a} \right]_\delta \quad \text{Denklem 2.6}$$

Burada,

- U : Sistemin elastik enerjisi,
- a : Çatlak boyu,

P : Yük,
 δ : Deplasman / yer değiştirme

Buradaki P ve δ da yukarıdaki ifadeleri değerlendirirken sabit olarak alınabilecektir.

Irwin ayrıca, gerinme enerjisi salınım hızı ve gerilme yoğunluğu etmeninin birbirleriyle ilişkili olduğunu da göstermiştir:

$$G = G_I = \begin{cases} \frac{K_I^2}{E} & \text{düzlem gerilme} \\ \frac{(1-\nu^2)K_I^2}{E} & \text{düzlem şekil değiştirme} \end{cases} \quad \text{Denklem 2.7}$$

Burada,

E : Elastisite modülü,
 ν : Poisson oranı,
 K_I : Mode I yükleme durumundaki gerilme yoğunluğu etmeni,

$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$ 'daki K_I , gerilme yoğunluğu iken Denklem 2.7'den yola çıkarak,

$$K_C = \sqrt{E \cdot G_C} \text{ (düzlem gerilme) ve } K_C = \sqrt{\frac{E \cdot G_C}{1-\nu^2}} \text{ (düzlem gerinme) ifadelerindeki}$$

K_C ise **kırılma tokluğu** olarak anılmaktadır.

Sonuç olarak Irwin, Griffith'in çalışmalarında geçen gerinme enerjisi salınım hızı yerine gerilme yoğunluğu terimini, yüzey zayıflığı enerjisi yerine de kırılma tokluğu terimini kullanmıştır.

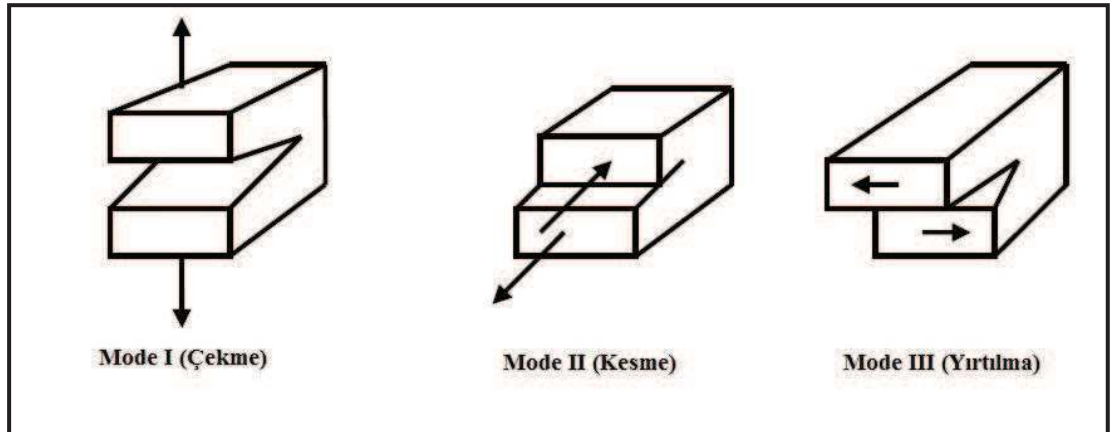
Bu çalışmada da, Gerinme Enerjisi Salınım Hızı, katmanlararası kırılma tokluğu ile eşdeğer olarak değerlendirilerek adlandırılmıştır. Gerinme Enerjisi Salınım Hızı, farklı ürün ve işlemlerin karşılaştırılmalı değerlendirmesinin yapılabilmesi için yeterli bir parametre olarak görülmüştür.

2.1.1.2 Kırılma Yükleme Koşulları

Kırılma olayı, $K_I \geq K_C$ koşulu sağlandığında gerçekleşecektir. Düzlem gerinmesi özel durumundaki (Mode I yükleme koşulu) K_C , K_{IC} olacak ve malzemenin bir özelliği olarak dikkate alınması yaygınlaşacaktır.

Alt indis I, malzemedeki çatlaklı ilerletebilecek yükleme koşullarından Mode I koşuluna karşılık gelmektedir. Bununla birlikte, çatlaklı ilerletebilecek üç farklı yükleme koşulu söz konusudur (Şekil 2.1).

Mode I çatlak, açılma modu olarak adlandırılarak kırılma düzlemi normaline uygulanan çekme gerilmesiyle oluşurken Mode II kayma modu olarak anılır ve çatlak düzlemine paralel ve çatlak önüne dik olarak uygulanan kesme gerilmesiyle oluşur. Yırtılma modu olarak bilinen Mode III tipi çatlak ise, çatlak düzlemine ve çatlak önüne paralel olarak uygulanan kesme gerilmesiyle oluşur.



Şekil 2.1. Kırılma oluşma modları

Bu yaklaşım sonucunda döngüsel yükler altında kırılma tokluğunu ve kırılma ilerleme oranını ölçmek üzere birçok yeni kırılma testi önerilmiştir.

Bu gibi testler ve standart test yöntemlerinden çoğu, ayrışma ilerlemesinin katmanlararası ve lifler doğrultusunda gerçekleştiği eş doğrultulu (unidirectional) katmanlarla sınırlandırılmıştır. Çoklu-doğrultulu katmanlardan oluşan bir katmanlamada çatlağın komşu katmanlara doğru ilerleme eğilimi olabilecektir ki bu da kırılma analizlerindeki düzlemdeş (coplanar) yaklaşımla örtüşmemektedir (Nicholls ve Gallagher, 1983; Robinson ve Song, 1992; Shi vd., 1993). Katmanlarının arasında sert reçine filmler olan kompozitler çatlağın ilerleyeceği yolun seçimine bağlı olarak (çatlağın sert arayüzeyden ayrılıp ayrılmayacağı veya sert yüzeyden ayrılıp kompozit arayüzeyine bağlı olarak ilerleyip ilerlemeyeceği seçimi gibi) farklı bir ayrışmaya karşı direnç davranışı gösterecektir (Özdil ve Carllson, 1993).

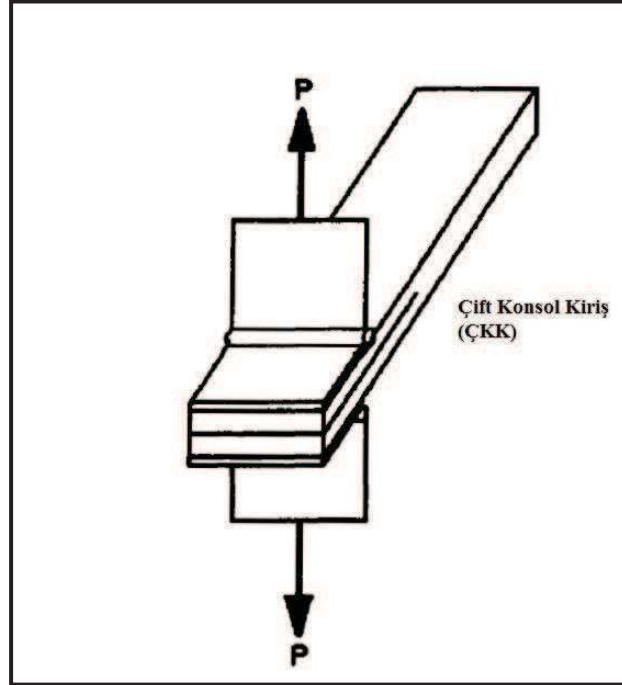
Örgü kumaşlı kompozitlerde, ayrışma çatlağı ilerlemesi matris bölgeleri ile bunların içine geçmiş örgülerle karşıacaktır ve bunun sonucunda ise ilerleme dirençlerinde çeşitlilik oluşacaktır (Alif vd., 1997). Kalınlığı doğrultusunda kuvvetlendirilmiş kompozitlerde ise, kuvvetlendirmelerin çatlağın ilerlemesiyle parçacıklara ayrıştığı (bridging) bir çok bölge ile karşılaşacaktır (Cox vd., 1997). Elyafın parçacıklara ayrılması eş doğrultulu (bütün katmanları 0° doğrultusunda) kompozitler için alışıldık bir durum olsa da, bu tür kompozitlerin katmanlararası ayrışmasının karakterizasyonu bir ölçüde karmaşık hale gelecektir.

Kırılma mekaniği analizi, test numunelerinin hazırlanışı, test ve verilerin işlenmesi çift konsol kiriş (double cantilever beam, DCB) (Mode I), ucu çentikli eğilme (end-notched flexure, ENF) (Mode II) örneklerinde bazı katmanlararası kırılma testi numuneleri bağlamında bu bölümde anlatılacaktır.

2.1.2 Mode I Çift Konsol Kiriş (ÇKK) Testi

Mode I katman ayrışması testi, geleneksel olarak katman ayrışmasının karakterizasyonunu en önemli biçimi olarak değerlendirilegelmiştir. Bu testin amacı, G_{IC} , polimer matrisi olan sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemenin açılma modu

(Mode I) katmanlararası kırılma tokluğunu tanımlamaktadır. Mode I kırılma testi için ÇKK numunesi ve testin ilkesi Şekil 2.2’de anlatılmaktadır.



Şekil 2.2. Mode I ayırıştırma test yöntemi

ÇKK kavramı, kırılma mekaniğinde yararlanılan ayırma testini temel almaktadır. 1930’larda, Obreimoff (1930) mikanın kırılma yüzey enerjisini değerlendirmek üzere ayırma tekniğini kullanmıştır. 1960’ların başında ise Berry (1963), PMMA (Polimetil metakrilat)’ın kırılma yüzey enerjisini saptamak üzere ayırma tekniğini kullanmıştır. Ayırma testi tekniğine dayanan ÇKK testi, aslında yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların kırılma tokluğunu tespit edebilmek amacıyla geliştirilmiştir. Ripling vd. (1964) ise, metal kolları arasında yapıştırıcı bağlantısı bulunan ÇKK test numunelerinin bu tür araştırmalar yapmak için uygun olduklarını belirtmiştir.

ÇKK testinin sadeliği, ileri kompozit malzemelerin Mode I katmanlararası ayrışmasının tanımlanması için son derece kullanışlı bir olanak sunmaktadır. 1980’lerin başında ÇKK numunesi gittikçe incelen formda Bascom vd. (1980) tarafından geliştirilmiş ve Wilkins vd. (1982) tarafından ise numunenin yan taraflarının düz olması önerilerek, standarta dönüşen forma ulaşılmıştır. Devitt vd.

(1980), cam/epoksi kompozitlerin ayrışmasını ÇKK numuneleri yardımıyla incelemiştir. Whitney vd. (1982) ise ÇKK testinin kompozit katmanlamalarda Mode I katman ayrışmasının belirlenmesi konusundaki geçerliliğini değerlendirerek ÇKK testinin farklı katmanlararası tokluğa sahip malzemelerin ayrıştırılması için yeterli olduğunu ve bu testin malzemeyi izleme aracı olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Örneğin, katmanlararası kırılma tokluğuna malzemeyi oluşturan bileşenlerin etkisini inceleyen Chai (1984) gibi birçok araştırmacı, ÇKK testinin birçok unsurunu irdeleyen çalışmalar yapmışlardır. ÇKK numuneleri üzerinde elyaf ayrışması / kopuşması (bridging) konusunda ayrıntılı bir çalışma, Johnson ve Mangalgiri (1987) tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, birbirlerine göre 1.5°, 3° gibi küçük açılarda yerleştirilen iki malzeme tarafının katmanlarının ayrışmasında daha az kopuşma olduğunu gözlemlemişlerdir.

Birçok araştırmacı ÇKK testlerindeki yükleme uygulama yöntemlerini incelemiştir. Smiley (1985), termoplastik matrisli kompozitler için, menteşelerin yapıştırılmasıyla yapılan deneyler iyi sonuç vermediği için, karbon/PEEK (Polieter eter keton) numunelerde yapıştırıcı yerine küçük vidalar kullanmıştır. Glessner (1989) ise menteşeler kullanmak yerine, ÇKK'nın iki kolunun arasına kamanın yerleştirilip yönlendirilebileceğini belirtmiştir.

Elde edilen verileri değerlendirebilmek için ise birçok araştırmacı farklı yöntemleri kullanmıştır.

Wilkins vd. (1982) tarafından kullanılan klasik kiriş kuramı yaklaşımının veri işlemede geçerli olmamasına karşın, bu kuramın yalınlığı ÇKK numunesinin bazı özelliklerinin değerlendirilmesini kolaylaştırmaktadır. Klasik kiriş kuramının geçerli olduğu varsayıldığında yükleme noktası uygunluğu olarak adlandırılan ÇKK numunesinin $C=\delta/P$ oranı şu şekli almaktadır:

$$C = \frac{2a^3}{3E_2I} \quad \text{Denklem 2.8}$$

Burada,

- P : Uygulanan yük,
 δ : Çatlak ağzı açıklığı,
a : Çatlak boyu,
 E_1 : Kompozitin lifler doğrultusundaki Young modülü,
I : Kiriş kesitinin atalet momenti,
 E_1I : Kiriş numunenin eğilme rijidliği iken

Gerinme enerjisi salınım hızı, $G=G_I$, ise aşağıdaki gibi verilebilecektir:

$$G = \frac{P^2}{2w} \cdot \frac{dC}{da} \quad \text{Denklem 2.9}$$

Burada,

- w : numunenin genişliğidir. Denklem 2.8 ve 2.9 birleştirilirse,

$$G = \frac{P^2 a^2}{wE_1I} \quad \text{Denklem 2.10}$$

Eğer G_{IC} malzemenin gerçek sabiti ise, stabil bir kırılma büyümesi olacaktır:

$$dG/da \leq 0 \quad \text{Denklem 2.11}$$

Sabit yük altındaki ÇKK numunesi için, dG/da Denklem 2.10 yardımıyla elde edilecektir:

$$\frac{dG}{da} = \frac{2P^2a}{wE_1I} \quad \text{Denklem 2.12}$$

Bu değ er daima pozitif olup, böylelikle yükü kontrol edilen test koşullarında stabil olmayan çatlak ilerlemesi gözlenecektir. Bu bağlamda $P=\delta/C$ ifadesinden yararlanarak sonuç diferansiyel aşağıdaki hali alacaktır:

$$\frac{dG}{da} = \frac{-4\delta^2a}{C^2wE_1I} \quad \text{Denklem 2.13}$$

2.1.2.1  KK Numunesinin Hazırlanması ve Test Prosedürü

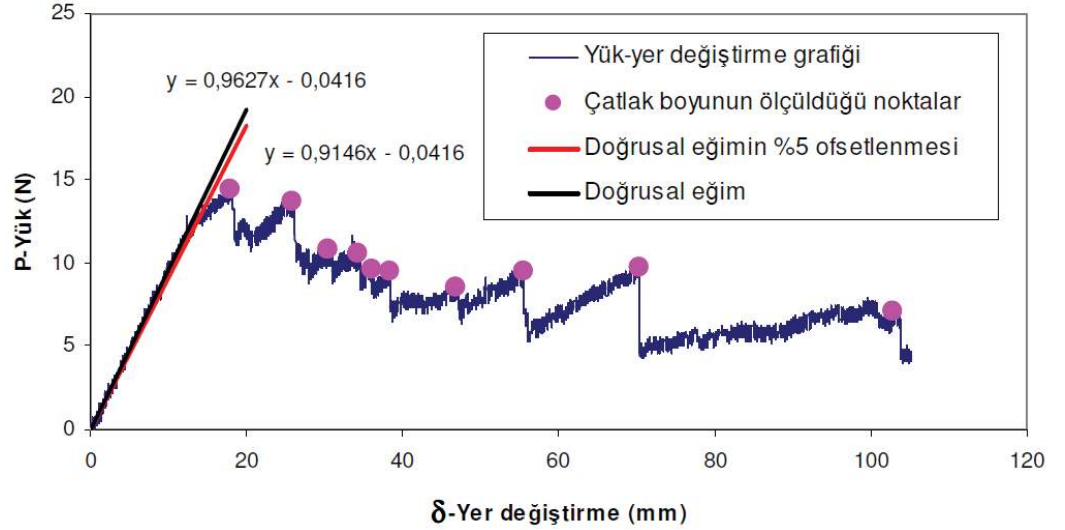
 KK numunesi en az 125 mm boyunda ve 20-25 mm genişliğinde olmalıdır. 3-5 mm kalınlığa ulaşmak amacıyla tek sayıda katman kullanmak suretiyle katmanlama yapılmalıdır. Kalınlıktaki farklılıklar 0.1 mm'den küçük olmalıdır. Sert kompozitler büyük deplasmanlar ve non-lineer tepkilerden kaçınmak maksadıyla daha kalın numuneleri gereksinebilirler. Şekil 2.3, bu çalışmada kullanılan düzeneği göstermektedir.  n  atlak, panelin ortasına ince bir film tabakası (<13  m) yerleştirmek suretiyle oluşturulmalıdır. Bu  atlağın boyu, yükün uygulanacağı kesitten çatlak ucuna olan uzaklıkla tanımlanacaktır. Yerle tirilecek filmin uzunluğu, a_0 , yaklaşık 50 mm olacak şekilde ayarlanmalıdır. Kalınlık ve numunenin genişliğinin ölçümü her iki uç ve numune merkezinde gerçekleştirmek ve bu değerlerin ortalamasını almak suretiyle belirlenmelidir.

Numunenin kenarları ince, beyaz ve parlak bir boya ile boyanmalıdır. Çatlak ilerlemesinin kaydına yardımcı olmak amacıyla film yerle iminden itibaren ilk 5 mm boyunca her 1 mm'de işaretleme yapılmalıdır. Kalan 20 mm'de ise her 5 mm'de yapılacak işaretleme yeterli olacaktır.

Numuneler yeterli duyarlılıkta y k hücreleri bulunan ve uygun bir şekilde kalibre edilmiş bir test cihazına yerleştirilmelidir. Bir video kayıt cihazı da çatlak

ilerlemesini izlemek üzere monte edilebilir. Yüke göre gerçekleşen test cihazının tutucu başlarının deplasmanı kaydedilmelidir.

Test sırasında numunenin ön tarafındaki katmanlararası ayrışma gözlemlenecek ve kaydedilecektir.



Şekil 2.3 ÇKK testindeki çatlak ilerlemesi sırasında kaydedilen kuvvet – deplasman ilişkisi

2.1.2.2 ÇKK Testi Veri İşleme

ÇKK numunelerinden elde edilen deneysel verilerin değerlendirmesi, birçok araştırmacının ilgi odağı olmuştur. Gerinme enerjisi salınım hızı, G_I , temelde uygulanan yükün, yer değiştirmenin, çatlak boyunun ve ayrıştırma testinde kullanılan ve yapıyla ilgili diğer parametrelerin bir fonksiyonu olduğu belirtilmiştir.

Deneysel verilerden yararlanarak G_I 'yı hesaplamak için uygun ifadeler bulmak çok önemlidir. Bu bağlamda en yaygın kullanılan yöntemler Berry (1963) tarafından önerilen uygunluk yöntemi (the compliance method), Hashemi vd. (1989) tarafından önerilen modifiye edilmiş kiriş kuramı yöntemi (modified beam theory method), Kageyama ve Hojo (1990) tarafından önerilen modifiye edilmiş uygunluk yöntemi

(modified compliance method) ile Whitney vd. (1981) tarafından geliştirilmiş olan alan yöntemidir (area method).

Bu çalışmada Mode I numunelerinden elde edilen deneysel veriler çelik – kompozit sistemlerinin izotropik olmayan, tanımlanmasında zorluklar içeren niteliği nedeniyle araştırmacılar tarafında önerilen modifiye edilmiş kiriş kuramı yöntemi ve alan yöntemi olmak üzere iki farklı yöntemle değerlendirilecektir.

Modifiye Edilmiş Kiriş Kuramı Yöntemi. Mode I kırılma tokluğunu (G_{IC}) değerlendirebilmek için birçok veri işleme yöntemi önerilmektedir (O'Brien ve Martin, 1993). Yalın ve bu zamana dek doğru sonuç veren bir yöntem olan ve Berry (1963) tarafından önerilen deneysel uygunluk yönteminde kiriş uygunluğu, $C=\delta/P$, çatlak boyunun bir güç fonksiyonu olarak ifade edilmektedir:

$$C = \frac{a^n}{H} \quad \text{Denklem 2.14}$$

Burada,

a : Çatlak boyu ve
n ve H : Deneysel olarak belirlenen parametrelerdir.

Klasik kiriş kuramı ve sabit uçlar kabulü geçerli ise $n=3$ ve $H= 3E_1I/2$ olacaktır. Gerçekte ÇKK numunesinin kolları rijit olarak bağlanmaktan ziyade numunenin kırılmamış kısmına elastik bir şekilde bağlanmıştır. Bu iş klasik kiriş kuramından farklılaşmaya yol açacaktır.

Denklem 2.14'deki ampirik parametrelerin gerçek değerlerini elde edebilmek için her bir kırık ilerlemesinde ölçülmüş yük ve deplasman verileri Şekil 2.2'deki gibi uygunluğun tersine ($1/C=P_c/\delta_c$) karşılık kırık uzunluklarının grafiği çift logaritmik grafik olarak gösterilmelidir. Verilere bir doğru yerleştirmek suretiyle Denklem

2.7'deki n üsteli elde edilebilecektir. Denklem 2.14'yi Denklem 2.9'da yerine koymak suretiyle G_{IC} için aşağıdaki anlatım bulunacaktır:

$$G_{IC} = \frac{nP_c \delta_c}{2wa} \quad \text{Denklem 2.15}$$

Buradaki P_c ve δ_c , her bir a çatlak ilerlemesindeki kritik yük ve deplasmana karşılık gelmektedir.

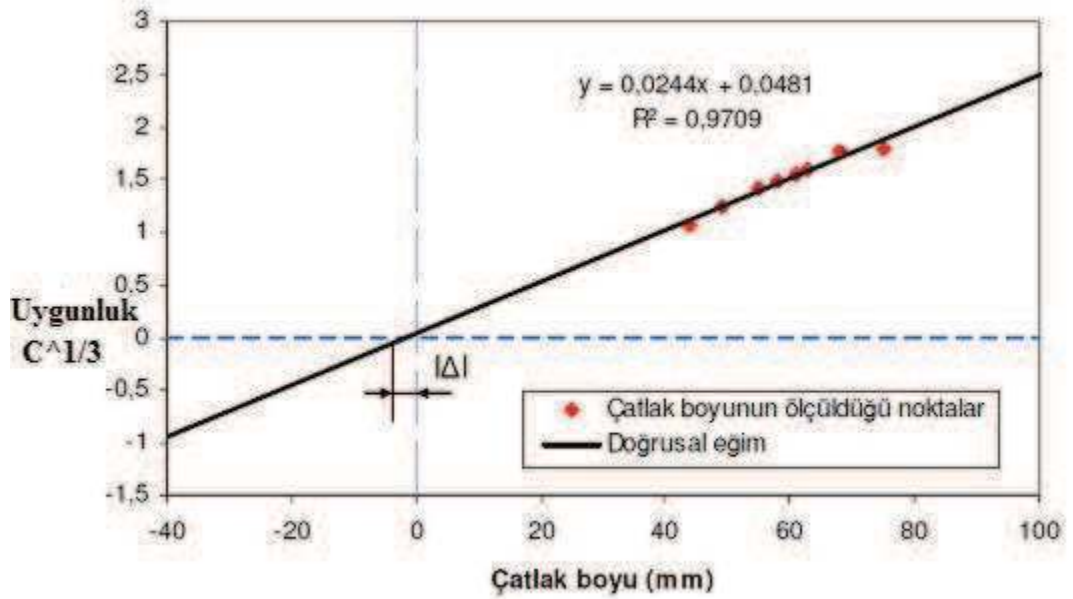
Modifiye edilmiş kiriş kuramı Blackman vd. (1999) ve Whitney vd. (1982) tarafından ortaya atılmış ve daha sonra ASTM D5528 standarda dönüştürülmüştür. Bilindiği gibi, temel kiriş kuramından, Denklem 2.9, numunenin gerinme enerjisi salınım hızı tanımlamaktadır. Uçlarından ankastre iki lineer elastik konsol kirişten oluşmuş olan ÇKK numunesi için bu denklem aşağıdaki şekli alacaktır:

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2wa} \quad \text{Denklem 2.16}$$

Ankastre hal kabulü gerçekçi olmadığı için bu denklemden elde edilen sonuç hata içermekte olup, gerinim enerjisi salınım değerlerini yüksek vermektedir. Konsol kirişlerin sınırlandırılması gerçekte dönmeye imkan tanıdığı için, uygunluk değerinin kırık boyuna karşılık gelen grafiği, sıfır çatlak boyuna karşılık sıfır uygunluk noktası olan orijinden geçmeyecektir. Çatlak boyu, a , söz konusu hatayı düzeltmek üzere bir Δ değeri kadar ötelenmelidir. Bu durumda Denklem 2.16, aşağıdaki hali alacaktır:

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2w(a + |\Delta|)} \quad \text{Denklem 2.17}$$

Burada Δ ötelemesi, deneysel olarak her numune için $C^{1/3}$ 'e karşılık gelen a değeri bulunarak ve bu değerlerin en küçük kareler yöntemiyle ilişkisi çizilip x eksenini olan a eksenini ile kesiştirilmek suretiyle bulunacaktır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4.Modifiye edilmiş kiriş kuramı yöntemine göre düzeltme faktörünün hesaplanması

Alan Yöntemi. Alan Yöntemi, ÇKK numunesinin uygunluğunun bir çatlak ilerlemesine yol açacak şekilde değişimi temeline dayanmaktadır. Böylelikle bir lineer elastik cisim için çatlak ilerlemesi nedeniyle ortaya çıkan gerinme enerjisi kaybı, yük-yer değiştirme eğrisindeki yükleme ve yüklemeyi kaldırma arasındaki alanla ifade edilecektir. Yük-yer değiştirme eğrisinin çatlak ilerlemesi bölümüne denk gelen kısmının bir doğru olduğu varsayımıyla, aşağıdaki denklem numunenin kırılma tokluğunu verecektir (Whitney vd., 1982):

$$G_I = \frac{1}{w} \frac{dU}{da} \quad \text{Denklem 2.18}$$

$$G_{IC} = \frac{1}{2w\Delta a} \cdot P_1\delta_2 \cdot P_2\delta_1 \quad \text{Denklem 2.19}$$

Bu denklemlerde;

- | | |
|------------------------|--|
| 1 ve 2 alt indisleri : | 1. ve 2. konumları ifade eder, |
| Δa | : 1. konumdan 2. konuma dek değişen çatlak boyudur |
| U | : Numunede depolanan toplam gerinme enerjisidir |

Eğer Denklem 2.19 testteki her bir çatlak ilerlemesi oranı için kullanılırsa, numunenin G_{IC} değeri için bu değerlerin ortalaması geçerli olacaktır (Office of Aviation Research, 2001).

Başlangıç çatlağından itibaren olan çatlak ilerlemelerine karşılık gelecek üç tokluk değeri tanımlanabilir (Şekil 2.3). $G_{IC}(NL)$, doğrusal tepkiden ayrılış noktasındaki kritik yük ve deplasmana ilişkindir. İkinci tanım olan $G_{IC}(vis.)$, gezici ölçüm cihazıyla izlenen gözlemsel çatlak ilerlemesine ilişkindir ve üçüncüsü $G_{IC}(\%5)$ ise, uygunlukta %5 artımın olduğu yük ve deplasmana karşılık gelmektedir. $G_{IC}(NL)$, tipik bir şekilde kırılma tokluğunun en alışılagelmiş kestirimidir ve Mode I kırılma tokluğunun bir ölçüsü olarak tanımlanması öngörülmektedir. Bunu izleyen çatlak ilerlemeleri için, G_{IC} , Denklem 2.18 yardımıyla ve kaydedilen yükler ile çatlak ilerleme miktarları kullanılmak suretiyle bulunacaktır.

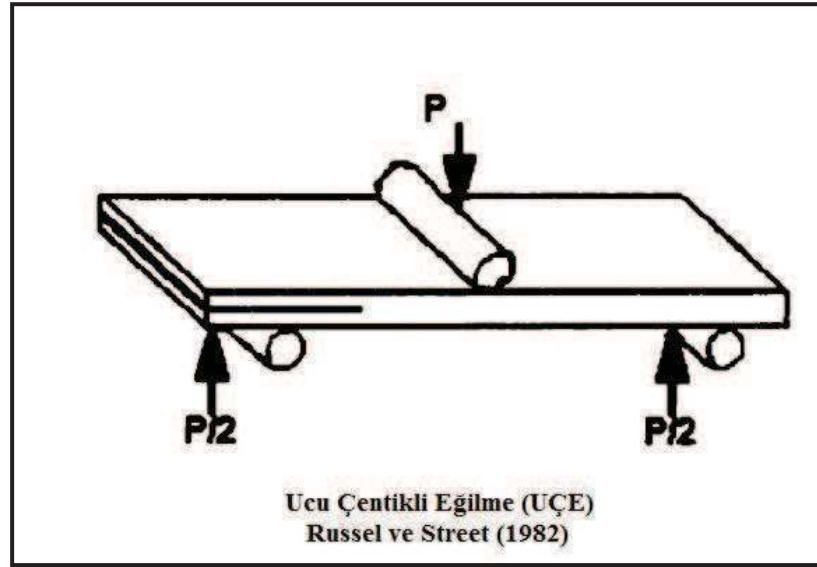
Daha önce de belirtildiği gibi, filmin bittiği yerden başlayan ilk kırık ilerlemesi, elyaf parçalanmasının kırılma tokluğunu arttırıcı etkisinden uzak olmak suretiyle kırılma tokluğunun en iyi ifade edilebildiği değeri verir (Suo vd., 1992; O'Brien ve Martin, 1993).

2.1.3 Mode II Ucu Çentikli Eğilme (UÇE) Testi

Mode II katmanlararası ayrışma testi, çatlağın ilerleyebilmesi için birbiri üzerinde kayan iki çatlak yüzeyini içermektedir. Önerilen birçok katmanlararası ayrışma testi olmakla birlikte, hangisinin en iyi sonucu verdiği konusunda bir uzlaşmaya rastlanmamaktadır. Buna rağmen Şekil 2.5'de şematik olarak gösterilen ucu çentikli eğilme (UÇE) testi yapımının kolay olması ve saf bir Mode II hasarı oluşturması gerekçeleriyle anılan karakterizasyon için en yaygın başvurulanan kullanılan test düzeni olarak belirmiştir.

UÇE numunesi kompozitlerin test edilmesi amacıyla, Mode II katmanlama numunesi olarak ilk kez Russell ve Street (1982) tarafından önerilmiştir. UÇE

numunesinin amacı, sadece Mode II yüklemesi altındaki eşdoğrultulu kompozitlerin kritik gerinme enerji salınım oranını belirlemektir (Russell ve Street, 1982 ve 1985). Bu test numunesi, ÇKK numunesiyle aynı tasarımdadır ve böylelikle verilerin işlenmesi için kiriş kuramının kullanımına uygundur. Ayrıca geniş bir uygunluğu söz konusu olup deneysel uygunluk kalibrasyonu yöntemlerinin uygulanmasına da imkan verir.



Şekil 2.5 Mode II ayrışması test yöntemi

Mode II gerinme enerjisi salınım hızı ve UÇE testlerinin gerilme analizi birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. 1970'lerin sonundan başlayarak UÇE numunesinin analizi konusundaki araştırmalar artan bir ivme ile başlamıştır. Bu bağlamda çalışmada kullanılacak analizi de içeren, Carllson vd. (1986a), Carllson vd. (1986b), Whitney vd. (1987), Whitney (1988), Chatterjee (1991), Wang ve Williams (1992) ve Corleto ve Hogan (1995) gibi birçok araştırmacının analitik yaklaşımı söz konusudur. Timoshenko kiriş kuramı, plak kuramı, yüksek dereceli kiriş kuramı anılan araştırmacıların çalışmalarında kullanılmıştır (Ding, 1999).

UÇE numunesi, çatlak yüzeyleri arasında aşırı bir sürtünme yaratmadan çatlak ucunda bir kesme yüklemesi yaratmaktadır (Carllson vd., 1986; Gillespie vd., 1986). UÇE numunesi Avrupa'da (1995) ve Japonya'da (1993) standart haline getirilmiştir

ve ABD’de bir ASTM standardı olarak kabul edilebilmesi amacıyla ASTM D-30 Komitesi tarafından üzerinde çalışılmaktadır.

Klasik kiriş kuramının geçerliliği varsayımıyla gerinme enerjisi salınım oranı, G, için şu ifade elde edilir (Russell ve Street, 1982 ve 1985).

$$G = \frac{9P^2Ca^2}{2w(2L^3 + 3a^3)} \quad \text{Denklem 2.20}$$

Burada,

- P : Uygulanan yük,
- C : Uygunluk,
- a : Çatlak boyu,
- w : Numunenin genişliği,
- L : Yükleme noktası ile mesnetler arası açıklıktır.

Numune uygunluğu ise aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$C = \frac{2L^3 + 3a^3}{8E_1wh^3} \quad \text{Denklem 2.21}$$

Burada,

- E₁ : Eğilme modülü,
- L : Kirişin yarı kalınlığı ya da katmanlararası ayrışma bölgesinde her bir alt kirişin kalınlığıdır.

Çatlak ilerlemesinin stabilitesi dG/da’nın işaretiyle değerlendirilebilir. Sabit yükleme koşullarında, Denklem 2.20 ve 2.21’den şu elde edilir:

$$\frac{dG}{da} = \frac{9aP^2}{8E_1w^2h^3} \quad \text{Denklem 2.22}$$

Bu değer pozitif ise çatlak ilerlemesi stabil değildir.

Dengeli bir çatlak ilerlemesi, dG/da 'nın sıfıra eşit veya sıfırdan küçük olmasını gerektirecektir. Bu durumda,

$$\frac{dG}{da} = \frac{9\delta^2a}{8E_1w^2h^3C^2} \left[1 - \frac{9a^3}{2L^3 + 3a^3} \right] \quad \text{Denklem 2.23}$$

Sonuç olarak, yaygın kullanımda $a=L/2$ olduğundan çatlak büyümesi her zaman stabil olmayacaktır. Bu bakımdan, her bir numuneden sadece bir kırılma tokluğu ölçümü yapılabileceği görülür.

2.1.3.1 UÇE Numunesinin Hazırlanması ve Test Prosedürü

Bir UÇE numunesi tipik olarak 120 mm uzunluğunda ve 20-25 mm genişliğindedir. Cam ve karbon takviyeli, eş doğrultulu kompozitler için kalınlıklar sırasıyla 3 ve 5 mm arasındadır.

İmal edilen numune üç nokta eğilme düzeneğine bağlanır. Mesnetler arasındaki mesafe, $2L$, 100 mm'dir. Çatlak uzunluğu/yarı açıklık oranı, a/L , çatlağın ilerlemesine imkan verecek şekilde 0.5 olmalıdır. Numuneler, başlangıç çatlağını orta planda oluşturmak amacıyla yapışkan olmayan, kalınlığı 13 μm 'den az Teflon veya Kapton film ile kaplanmalıdır. Numune boyunca kalınlık değişimleri 0.1 mm'yi geçmemelidir. Numune kenarlarına, gerekçesi daha önce de açıklanmış olan parlak beyaz bir kaplama uygulanmalıdır.

UÇE numunesi, başlangıç çatlak boyu, a , 25 mm olacak şekilde standart üç nokta eğilme düzeneğine yerleştirilmelidir (ASTM, 2002). Çatlak ilerlemesini izlemek

üzere uygun bir markalama yapılmalıdır. Kiriş merkezinin yer değiştirmesi (yük noktası deplasmanı) yükle birlikte ölçülecektir.

2.1.3.2 UÇE Testi Veri İşleme

Mode II kırılma tokluğunun, G_{IIC} , belirlenmesi Şekil 2.3’dekine benzer yük-deplasman değişimi grafiklerinin değerlendirilmesini gerektirir. $G_{IIC}(NL)$, $G_{IIC}(vis.)$ ve $G_{IIC}(max)$ tokluk değerleri sırasıyla doğrulsallığın ortadan kalktığı yerin hemen öncesinde, stabil kırılma ilerlemesinin gözleendiği yerde ve en büyük yükün taşındığı yerde olarak tanımlanabilir. G_{IIC} ’nin tanımlanabilmesi için ilk çatlak boyu gerekmektedir. İlk çatlak boyu, hasarlanmış numuneyi ikiye ayırmak ve mesnetlerden itibaren ölçmek suretiyle tanımlanabilir. Genellikle mesnetler numunenin üzerinde izlerini bırakacaklardır ki bu izlerden kırılma testinin ardından kırık boyunun tespiti için yararlanılabilir.

Eğer numunenin eğilme modülü, E_1 , bilinmiyorsa kırılma tokluğu, G_{IIC} , kiriş kuramı ifadesi ve uyum değeri, C , ölçölmek suretiyle aşağıdaki gibi bulunacaktır.

$$G_{IIC} = \frac{9a^2 P^2 (C - C_{SH})}{4wL^3 [1 + 1.5(a/L)^3]} \quad \text{Denklem 2.24}$$

Burada,

C_{SH} : aşağıdaki ifadeyle hesaplanan katmanlararası kesme deformasyonundan kaynaklanan uyum düzeltme faktörüdür:

$$C_{SH} = \frac{6L + 3a - L^3 / a^2}{20whG_{13}} \quad \text{Denklem 2.25}$$

C_{SH} ’in hesabı için katmanlararası kesme modülü, G_{13} , gereklidir. Eğer G_{13} bilinmiyorsa, düzlem kesme modülü, G_{12} , eş doğrultulu kompozitler için yaklaşık

G_{13} olarak kullanılabilir. UÇE numunesinin eğilme modülü, E_1 , biliniyorsa, G_{IIC} bir kiriş kuramı ifadesi yardımıyla çok daha dolaysız yoldan belirlenebilir:

$$G_{IIC} = \frac{9a^2 P^2}{16w^2 h^3 E_1} \left[1 - 0.2 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \frac{E_1}{G_{13}} \right] \quad \text{Denklem 2.26}$$

JIS, ASTM ve ESIS'in katılımıyla gerçekleştirilen toplantılarda Mode II UÇE testlerinin değerlendirilmesi konusunda bir konsensus sağlanamamıştır (Bruner vd., 2008). Bunun birkaç nedeni olmakla beraber başta UÇE testinin stabilitesinin sağlanmasının güçlüğü ve bundan dolayı sadece başlangıç değerinin tespitinde yararlı olduğu direnç eğrilerine varılamadığı gerçeği ön plana çıkar. İkincil olarak da sürtünmenin katkısı sorunu göz önüne alınmaktadır. Bu da Mode II verilerinin, Whitney (1989) tarafından ortaya konan aşağıda verilen bağıntıda olduğu gibi malzeme özelliklerinden bağımsız olup olmadığı sorununu ortaya çıkarmıştır (O'Brien, 1998).

$$G_{IIC} = \frac{9a^2 P \delta}{2w(2L^3 + 3a^3)} \quad \text{Denklem 2.27}$$

Çalışmada malzeme verilerinden bağımsız olan Denklem 2.27, katmanlararası kırılma tokluğu olarak başlangıç çatlak boyunu ve buna karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerlerini dikkate almak suretiyle kullanılmıştır (Gibson, 1994).

ÇKK ve UÇE testlerinin karşılaştırmasını amaçlayan çalışmalar da araştırma dünyasının gündeminde olmuştur. Örneğin Carlsson vd. (1986a)'nın çalışmasında UÇE numunesinin boyutu, geometrik lineer olmayan tepkiyi minimize etmek ve lineer olmayan malzeme davranışlarından kaçınmak amacıyla analiz edilmiştir. Üst ve alt kirişler arasındaki iki çatlak yüzeyi arasındaki sürtünmenin etkisi de aynı çalışmada incelenmiştir. Murri ve Guyun (1988) ise UÇE testinin yükleme durumunu

incelemiştir. Üç-nokta eğilme, dört nokta eğilme ve mengelenenmiş merkezden yüklemeli test yöntemleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

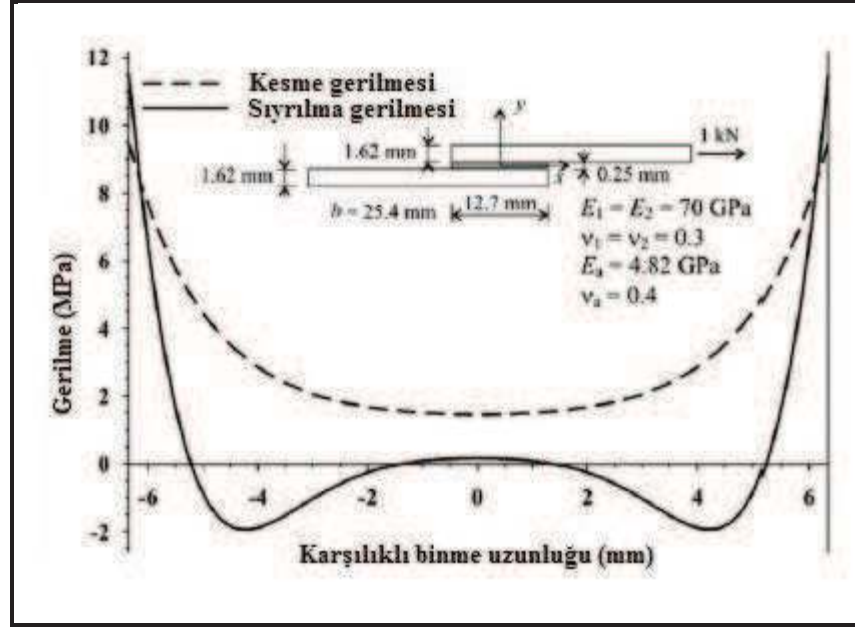
UÇE testlerinde, özellikle gevrek epoksi temelli kompozitlerin çatlak büyümesinin yükleme anında hızlı bir düşüşle birlikte ani ve dengesiz olduğunu belirtmekte yarar vardır. Bu da maksimum yük ile çatlak durma yükü arasında büyük bir fark oluşmasına yol açar. Böyle olunca kırılma tokluğunun hesabında kullanılacak yük konusu tartışmalı olarak kalacaktır. Vu-Khanh (1987) tarafından yapılan bir çalışmada, numunelere istikrarlı olmayan çatlak ilerlemesi ve bunu izleyen çatlak durmasını üretecek şekilde yapılmıştır. Çatlağın durma halindeki kırılma tokluğunun başlangıçtaki kırılma tokluğuna eşit olduğu gösterilmiştir. Bu durum Mode I'deki halin tam tersidir ki anılan halde, kırılma enerjisinin istikrarsız olduğu çatlak ilerlemesinde hızlı çatlak ilerlemesi başlangıçtaki ve istikrarlı ilerleme halinden çok daha düşüktür. Diğer taraftan, Kageyama vd. (1991) istikrarlı UÇE testleri önermişlerdir. Özel bir yer değiştirme ölçümü kullanarak gerçekleştirdikleri testler sabit bir çatlak kesme deplasmanı hızı altında yapılmıştır. Bu yaklaşım istikrarlı bir çatlak ilerlemesine yol açmıştır. Çatlak ilerlemesi sırasında G_{IIC} neredeyse sabittir ve çatlak başlangıcındakinden %15 – 20 daha yüksektir.

Sonuç olarak UÇE testleri G_{IIC} 'yi belirleyebilmek için yalın bir yöntem sunmaktadır. Bu yöntem, ASTM tarafından da standartlaştırılmaya çalışılmaktadır.

2.2 Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantıların Analizi: Analitik Yöntemler

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş birbiri üstüne binen bağlantılar için basit kesme sürüklenmesi modeli ilk kez Volkersen tarafından 1938'de sunulmuştur (Volkersen, 1938). Bu modeldeki kabullere göre yapıştırılan parçalar çekmeye maruzdur ve her gerilme kalınlık boyunca sabittir. Bununla birlikte Volkersen çözümü yapıştırılan parçalardaki eğilme ve kesme deformasyonlarını içermemektedir ki bunlar düşük kesme ve enine modülüsle mukavemetli kompozit yapıştırma parçaları için potansiyel olarak vardır. Goland ve Reissner (1944) bu çalışmayı yapıştırılacak parçaların eğilme etkilerini de dikkate alarak geliştirmişlerdir. Goland ve Reissner'in

birbirine yapıştırıcı ile bağlanmış alüminyum parçaların yapıştırıcısının kesme ve sıyrılma gerilme dağılımları Şekil 2.6’da görülmektedir.



Şekil 2.6 Goland ve Reissner'in (1944) alüminyum alaşımlı parçalar ve bir epoksi yapıştırıcısının yapıştırıcı kesmesi ve sıyrılma gerilmesi yaklaşımı

Hart-Smith ise mükemmel elastoplastik davranış gösteren yapıştırıcı tabakasını göz önüne alan basit bir analitik model geliştirmişlerdir (Hart-Smith, 1973). Bu çalışmada yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların aktarabileceği en büyük yükün gerilme-gerinme eğrisinden bağımsız olarak kesme deformasyonu enerjisine bağlı olduğu gösterilmiştir. Bu yaklaşım gevrek yapıştırıcı katmanlarının davranışlarının kestirimine yardımcı olur.

Hart-Smith ayrıntılı olarak tek karşılıklı, çift karşılıklı, uçlarda birleşen ve kademeli birleşen bağlantıları, yapıştırılan parçaların izotropik ve anizotropik elastik hallerini, yapıştırıcı içinse elastik ve elastik-plastik durumlarını incelemişlerdir. Isıl etkiler de analize dahil edilmiştir ve yapıştırılan parçaların kalınlığı ve/veya katılığı arttıkça ısıl uyumsuzluk nedeniyle bağlantı mukavemetindeki azalmanın arttığı gösterilmiştir.

Bununla birlikte, katmanlanmış kompozit parçaların yapıştırılması söz konusu olduğunda bu parçaların görece olarak düşük enine kesme modülüsü nedeniyle önem arzeden enine kesme deformasyonlarının etkileri erken dönem klasik analitik kuramlarda dikkate alınmamıştır.

Yüksek veya ultra yüksek modüllü elyafı çok daha düşük modüllü polimer reçinenin oluşturduğu kombinezonlarda sıklıkla ortaya çıkan ‘düşük enine katılık’ olgusu kompozit parçaların yapıştırıldığı bağlantıların önemli karakteristiği olarak ortaya çıkmaktadır. Srinivas gibi Renton ve Vinson da analizlerine birinci derece kesme deformasyonunu da dahil ederek düşük enine katılık etkilerini de hesaba katmışlardır. Renton ve Vinson (1975) kompozit parçaların yapıştırılması konusunda kesme deformasyonunu da içeren tek karşılıklı bağlantının analitik çözümünü geliştirmişler ve parçalar ile yapıştırıcının lineer elastik tepkisini tanımlamışlardır. Srinivas, analitik çözümün bir parçası olarak lineer olmayan geometrik etkilere bir yaklaşım geliştirirken, benzer bir yöntemi tek ve çift karşılıklı bağlantı geometrileri için de geliştirmiştir. Dattaguru vd. (1984), Pickett ve Hollaway (1985) gibi kompozit yapıştırılmalı bağlantıların lineer olmayan analiz yöntemlerini kullanarak çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Elastik-mükemmelen plastik yapıştırıcı modellemesi formunda lineer olmayan malzeme davranışlarını göz önüne alarak, tek karşılıklı, çift karşılıklı, tübüler bağlantıların performanslarını analitik ve sonlu elemanlar yöntemiyle değerlendirmişlerdir. Analitik olarak bağlantıları değerlendirirken Hart-Smith’in elastik-plastik analiz yöntemini kullanmışlardır. Buna ilaveten analizlerden elde edilen sonuçlar, bağlantı mukavemetinde bir artışı da ön görmektedir ki bu anlamda baskın etmen yapıştırıcının malzeme nitelikleridir.

Renton ve Vinson (1977), parçaların enine kesme ve normal doğrultudaki gerilmelerini içeren yüksek mertebeli bir analitik model geliştirmişler ve gerçekleşen yapıştırıcı kesme gerilmesinin en üst değeri bağlantının ucundan içine doğru yükselmiştir ve geleneksel analiz yöntemleriyle bulunandan daha düşük bir değer olarak bulunmuştur. Bağlantının gerilme dağılımı üzerinde belirgin bir etkisi olan kesme ve eğilme tepkilerinin etkileşimini dikkate almamışlardır.

Delale vd. (1981), eğilme ve uzama arasındaki bileşik etkiyi dikkate alarak bir bağlantının klasik analizini genişletmişlerdir. Bunun sonucunda, yapıştırılan parçalardaki ortalama uzama gerinmelerinden türetilen yapıştırıcıdaki boyuna gerilmeleri içeren yapıştırıcı için modifiye edilmiş yapısal denklemlere ulaşmışlardır. Elde ettikleri sonuçların bir yapıştırıcılı bağlantının uçlarındaki yapıştırıcı gerilmeleri için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizinin sonuçlarıyla karşılaştırıldığında gerçekçi oldukları görülmüştür. En yüksek gerilmelerin bağlantının en uc noktasındaki parçalar ve yapıştırıcının ara yüzeyinin singülaritesinde olduğu gayet iyi bilindiği için, yapıştırıcının ucunda gerilmenin olmadığı bir sınır koşulu dayatmanın önemli olmadığı sonucuna varmışlardır.

Alternatif bir yaklaşım kullanan Allman (1977) bağlantıdaki gerilmeleri bir set gerilme fonksiyonuyla ifade etmiş ve bağlantıdaki gerilme enerjisini minimize ederek yapıştırıcı gerilmesi olmayan sınır koşullarını sağlayan ve yapıştırılan parçalar için tam denge denklemlerinin sağlanmasına imkan veren çözümler geliştirmişlerdir.

Adams ve Mallick (1992) Allman'ın yaklaşımını lineer olmayan yapıştırıcı davranışlarını içeren bir tek boyutlu sonlu eleman çözümü geliştirmek için kullanmışlardır.

Yapıştırılacak parçalar, farklı malzeme özellikleri ve/veya farklı kalınlıklarıyla birbirlerine benzemeyebilirler. Bu model, kalınlık boyunca yapıştırıcı gerilmelerinin değişimine imkan vermektedir. Sonuçlar sonlu eleman modeliyle yakın uyum içinde olmakla birlikte, genellikle en yüksek gerilmeleri olduğundan düşük kestirmektedir. Yang ve Pang (1993,1996), çekme ve eğilme yüklemesine maruz simetrik ve asimetrik tek karşılıklı bağlantıları analiz etmek için klasik katmanlı plaka kuramını kullanarak bir analitik model geliştirmişlerdir. Yaklaşımları, yapıştırılan katmanlamaların asimetrisini olduğu kadar enine kesme deformasyonlarının etkilerini de düzeltmektedir. Sonuçlar burada da sonlu elemanlar modeliyle yakın uyum göstermektedir.

Wu vd. (1997) farklı kalınlıkta ve uzunlukta birbirine benzemeyen parçaların bağlantı ucu yüklerinin analizi için birçok diferansiyel denklemden oluşan bir set önermişlerdir. ETP parçaların yapıştırıcı bağlantılarının gerilme analizi için bu modeli geliştirmişlerdir.

Tong (1997) çift karşılıklı kompozit bağlantıların mukavemetini tahmin edebilmek için sonlu eleman modeli olduğu kadar basitleştirilmiş bir tek boyutlu model geliştirmiştir. Lineer olmayan model ile tahmin ettiği hasar yüklerinin ölçülen hasar yükleriyle iyi bir uyum içinde olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte lineer model yardımıyla bulunanlar ise ölçülen yüklerin sadece yarısı kadardır.

Mortensen ve Thomsen (2002) yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bağlantılar için bütünlük bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Parçaları silindirik eğilme altındaki kirişler ya da geniş plaklar olarak, kompozit parçaları klasik katmanlama kuramını kullanarak genel olarak ortotropik katmanlamalar ve yapıştırıcıyı da lineer elastik malzeme olarak modellemişlerdir. Analiz asimetrik ve dengelenmemiş katmanlamalar olarak yapılmış parçaların ortaya çıkardığı bileşik etkileri de dikkate almakta ve sınır koşullarının ve dış yüklerin herhangi bir kombinezonuna da izin vermektedir. Bu yaklaşımı kullanarak elde edilen sonuçlar sonlu eleman sonuçlarıyla ve yüksek mertebeli kuram yaklaşımı kullanarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve bunlarla çok iyi uyumlar gözlenmiştir.

Yang vd. (2004) yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek karşılıklı kompozit bağlardaki yapıştırma gerilme dağılımını belirlemek için katmanlanmış izotropik olmayan plak kuramını kullanarak bir analitik model geliştirmişlerdir. Yapıştırılacak kompozit parçalar lineer elastik kabuledilirken, yapıştırıcı von Mises alan kriteri uyarınca elastik-mükemmelen plastik olarak varsayılmıştır. Yapıştırıcı çok ince ve yapıştırıcı gerilmeleri yapışma hattı kalınlığı boyunca sabit varsayılmıştır. Sistemin denklemleri yapıştırıcı ve yapıştırılacak parçaların kuvvet dengesi ve kinematik ilişkileri yardımıyla belirlenmiştir. Anılan denklemler uygun sınır koşulları gözetilerek analitik olarak çözülmüştür. Geliştirilen gerilme modeli yapıştırıcı gerilme dağılımıyla karşılaştırılarak sonlu elemanlar analiziyle gerçekleştirilmiştir.

Zou vd. (2004), çekme ve/veya eğilme momentlerine olduğu kadar enine kesme yüklemesine de maruz tek karşılıklı ve tek-kayışlı metal ve karbon elyaf takviyeli plastik dengelenmiş ve simetrik bağlantıların modellenmesi için klasik katmanlama plak kuramını kullanmıştır. Bu model de sonlu elemanlar modelleriyle gerçekleştirilmiştir.

Zhang vd. (2006) ise, Montensen ve Thomsen'in (2002) birleşik yaklaşımı temelinde kompozit bağlantıların çok eksenli gerilme analizi için bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde enine düzlem gerilme ve higrotermal yükler de dikkate alınarak yapıştırılan parçalardaki düzlemde ve katmanlararası gerilmeler hesaplanabilmektedir. Yapıştırılmalı bağlantılar için yapılan diğer analitik yöntemlerle karşılaştırıldığında bu yöntemin çeşitli bağlantı geometrileri, lineer ve lineer olmayan yapıştırıcılar, asimetrik ve dengelenmemiş katmanlamalar ve çeşitli yükleme ve sınır koşulları içerecek kadar çok genel bir yaklaşıma sahip olduğu görülür.

Genellikle tüm analiz yöntemlerinde yapıştırılacak parçaların lineer elastik davranışa sahip olduğu, bazılarında sadece yapıştırıcı tabakasının plastik davranış gösterdiğinin kabulü, diğer bazılarında ise yapıştırıcı gerilmelerinin yapıştırıcı kalınlığı doğrultusunda dağıldığı kabulüne rastlanmaktadır. Bununla birlikte, plastik davranış gösteren malzemenin lineer olmayan özelliklerini göz önüne alabilmek matematiksel anlamda karmaşıklık yaratacağı için oldukça zordur. Lineer olmayan malzeme davranışları sadece sonlu elemanlar modellerinde ele alınabilmektedir.

Sonuç olarak, farklı endüstrilerde çok çeşitli uygulamalar için elyafyla güçlendirilmiş kompozit yapılara ilgi bir artış içindedir. Yapıştırıcıyla birleştirme, her ne kadar bağlantı etkinliğini düşük katmanlararası kesme ve çekme mukavemeti sınırlandırıyorsa da kompozit yapıları bağlamak için oldukça geçerli bir yöntemdir.

Verilen bir uygulama için uygun yüzey işleme ve yapıştırıcı seçimi gereklidir. En iyi yapıştırıcıyı seçebilmek çoğunlukla bağlanacak kompozitlerin tipi, uygulama, hizmet ortamı ve maliyet unsurları tarafından belirlenir. Ayrıca çeşitli ortamlara

maruz özel birleştirme sistemlerinin davranışı uzun ömürlü bir tasarım için dikkate alınmalıdır. Hasar kriterinin seçimi ise göz önüne alınan bağlantıların tipi ile ilgilidir ve bağlantı tasarımının felsefesine bağlıdır.

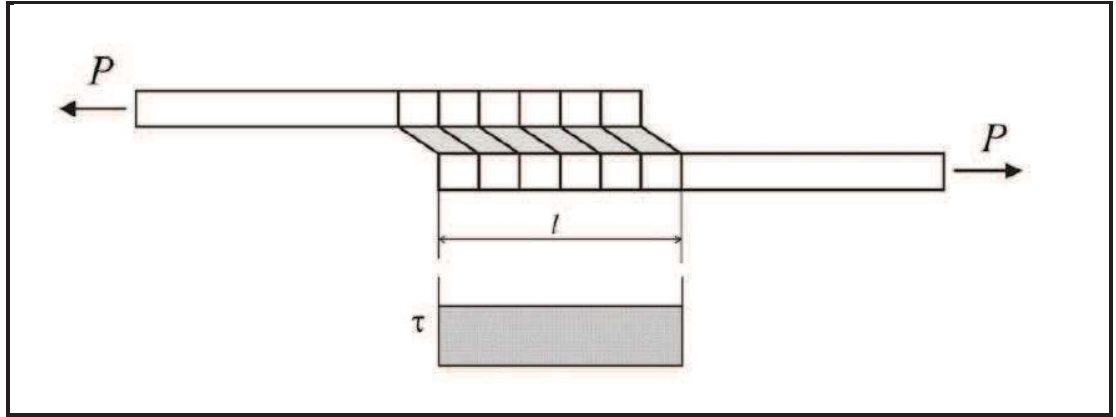
Doğru bir kompozit yapıştırıcılı bağlantısı analizi yöntemi yapıştırıcıda, yapıştırıcı / yapıştırılan parça ara yüzeyinde ve bizzat katmanlamanın yüzey katmanlarının yüzeyindeki hasarı tahmin edebilmeli ve ayrıca lineer olmayan malzeme davranışlarını da hesaba katabilmelidir.

Hasar mukavemeti ve biçimi çeşitli bağlama yöntemleri ve parametrelere göre farklılık içerdiği için hasarı önceden kestirmek için üzerinde genel bir uzlaşıya varılmış yöntem söz konusu değildir. Fakat ilerleyen (progresif) hasar modeller, bağlantı davranışının modellenemediği bir gelecek vaat etmektedir.

Bu deneysel çalışmada, basitleştirmeler içeren, bununla birlikte ASTM ve ISO standartları gibi birçok test koşulunun yararlandığı yapıştırırmalı bağlantıların kesme mukavemetini irdeleyen Volkersen yaklaşımından yararlanılacaktır.

2.2.1 Volkersen analizi

Yapıştırırmalı bağlantıların analizinin en yalın halinde, uygulamada en sık rastlanan tek karşılıklı yapıştırırmalı bağlantılar ele alınmaktadır. Böyle bir analizde, yapıştırıcının yalnızca kesme etkisinde deforme olduğu ve yapıştırılan parçaların ise rijit olduğu göz önüne alınmaktadır. Yapıştırıcı kesme gerilmesi (τ) , parçaların karşılıklı binme uzunluğu boyunca sabit olup aşağıdaki gibi verilmektedir (Şekil 2.7):



Şekil 2.7 Rijit yapıştırma parçalarını haiz tek karşılıklı yapıştırmalı bağlantılardaki deformasyon

$$\tau = \frac{P}{b.l}$$

Denklem 2.28

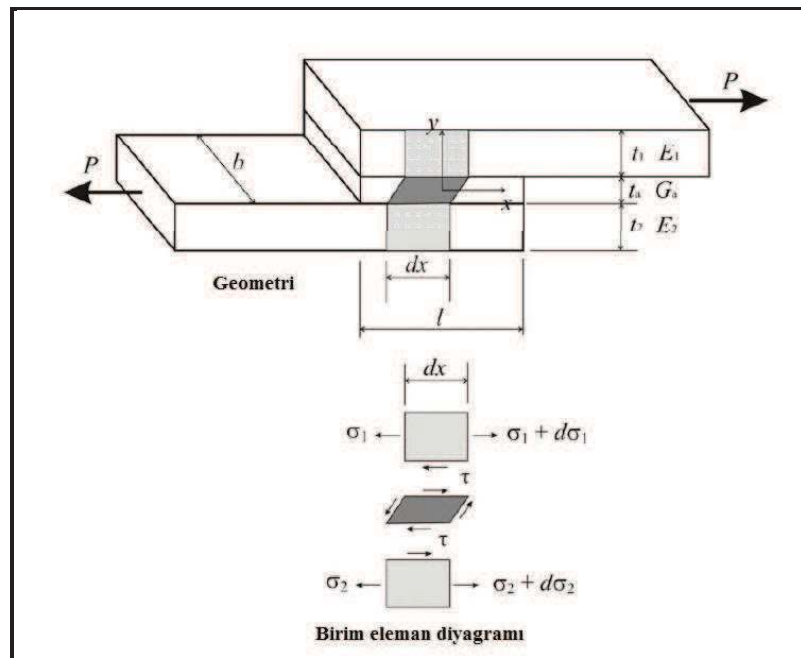
Burada,

P : Uygulanan yük,

b : Bağlantı genişliği

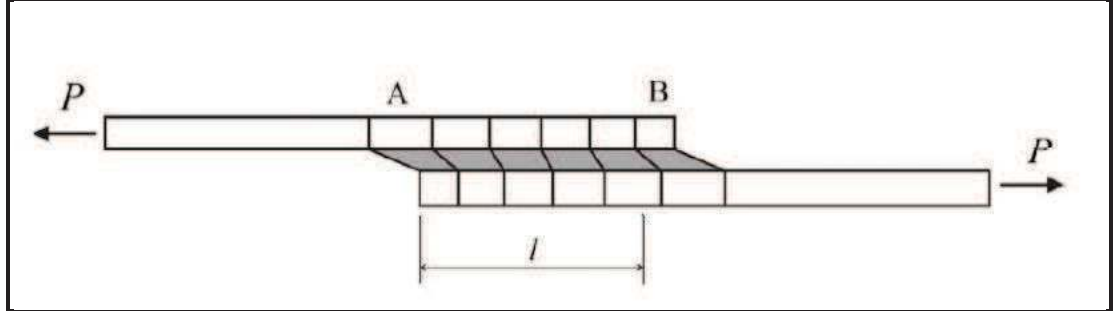
l : Parçaların birbirini üstüne binen kısımlarının uzunluğu

Kesme gerilmesi değeri, yapıştırıcı katmanı üzerinde etkiyen kesme gerilmesinin ortalaması olarak ele alınmaktadır.



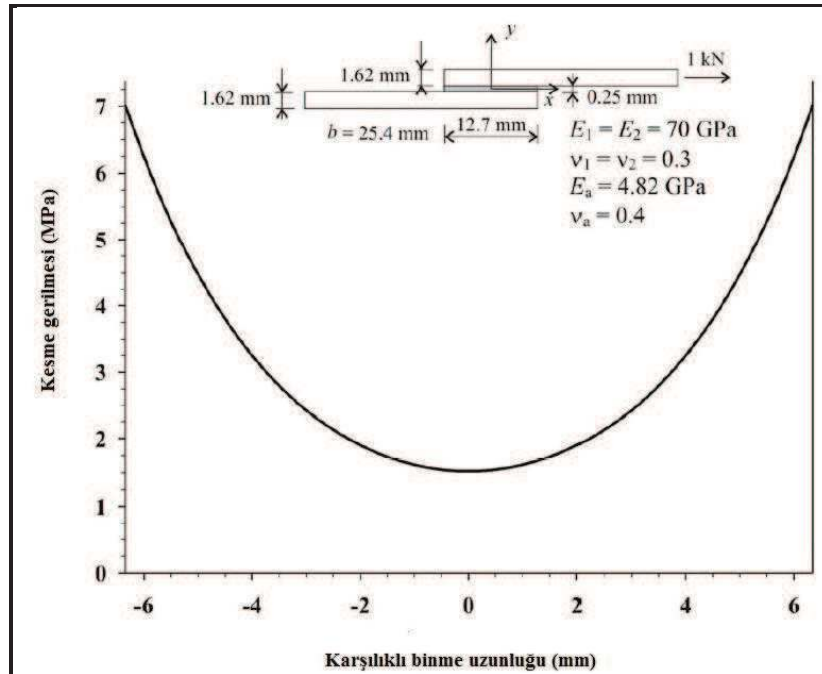
Şekil 2.8 Tek karşılıklı bağlantının Volkersen tarafından analizi (1938)

Volkersen'in analizi diferansiyel kesme kavramını ortaya çıkarmıştır (Şekil 2.8)



Şekil 2.9 Birbirine bağlanan elastik parçaları haiz tek karşılıklı bağlantının deformasyonları

Yapıştırıcının sadece kesme altında deforme olmasını öngörmektedir fakat yapıştırılan parçalar, rijit olmayan ve elastik kabul edilmiş olduğundan, Şekil 2.9'da görüldüğü gibi çekme yükü altında deforme olmaktadır. Üst parçadaki çekme gerilmesi A noktasında maksimuma ulaşırken B noktasında '0' değerindedir ki gerilme de A'dan B'ye doğru giderek azalacaktır.



Şekil 2.10 Volkersen'in yapıştırıcı kesme gerilmesi dağılımı

Karşılıklı binme noktaları boyunca yapıştırılan parçalardaki gerinme düşmesi ve yapıştırıcı tabakasında üniform olmayan kesme gerinmesi dağılımına neden olur. Kesme gerinmesi üst üste binme noktalarının uçlarında en yüksek olup ortada en aza düşmektedir (Şekil 2.10). Bu analiz tek karşılıklı bağlantıların eksantrik yükleme doğrultusu nedeniyle oluşan eğilme etkisini hesaba katmamaktadır.

BÖLÜM ÜÇ

MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Gemi İnşaa Çeliği

Çalışmada 4 mm kalınlığında, gemi inşa çeliği olarak anılan St37, A Sınıf çelik kullanılmıştır. Ereğli Demir ve Çelik Fabrikası T.A.Ş. (Erdemir) tarafından üretilen çelik, 3701 Erdemir Kalite Numarasıyla tanımlanmaktadır. Çeliğin niteliklerine ilişkin bilgi Tablo 3.1’de sunulmaktadır. Burada sözü edilen çelikten numuneler, ulusal sınıflandırma kuruluşu olan Türk Loydu kurallarının (Türk Loydu, 2010) önerdiği gibi, çelik levha kenarından en az 25 mm uzaklıktaki bölgelerden 25 mm x 125 mm boyutlarında 120 adet olmak üzere Nümerik Kontrollü Tezgah’ta kesilmiş ve kenarlarına gerekli taşlama işlemi uygulanmıştır.

Tablo 3.1 Çalışma Kullanılan A Sınıf (Erdemir 3701) Çeliğin Nitelikleri (Erdemir, 2011)

Kimyasal Bileşim (%)									
C (maks.)	Mn (min.)	P (maks.)	S (maks.)	Si (maks.)	Al (min.)	Ni (maks.)	Cr (maks.)	Mo (maks.)	Cu (maks.)
0.18	0.60	0.025	0.020	0.40	0.020	0.15	0.10	0.05	0.15
Akma Mukavemeti N/mm ² (kg/mm ²)			Çekme Mukavemeti ⁽¹⁾ N/mm ² (kg/mm ²)			Minimum Uzama ⁽²⁾ (L ₀ =200mm)			
235 (24)			400-520 (41-53)			21			

⁽¹⁾Çekme testleri “enine” test numunelerine uygulanır.

⁽²⁾Belirtilen “% uzama” değerleri, kalınlığı “30<d≤40” olan malzemeler içindir. Kalınlığı 30 mm ve altında olan malzemeler için uzama değerleri kalınlığa göre azalmaktadır.

Yüzey hazırlığının kompozit – çelik birleşiminin performansına etkisinin araştırılması çalışmanın amaçlarından biri olduğundan elde edilen çelik numunelere, SA2.5 ve SA1 olmak üzere iki farklı raspa işlemi uygulanmıştır. Bir grup numune ise raspanmamıştır, bir başka deyişle SA0 olarak bırakılmıştır.

Gemi üzerindeki bir yüzeyin boyanabilmesi veya üzerine işlem uygulanabilmesi için yüzeyin; toz, yağ ve çapak gibi yabancı maddelerden temizlenmiş olması gerekmektedir. Keza bu maddeler boyanın altında kalarak boyanın yapışmasını

önleyeceğinden ilerleyen zamanlarda genel anlamda boyanın dökülmesine, kaplama zafiyetine neden olur. Bu bozulmayı önlemek ve boyama işlemini sağlıklı yapabilmek için yapılan yüzey temizleme işlemine '*raspa*' adı verilir. Raspa için çeşitli aletler ve yöntemler kullanılmaktadır.

Raspa işleminde kullanılacak raspa aleti yüzeyin büyüklüğü, cinsi ve şekline göre değişiklik gösterir. Kullanılan çeşitli raspa alet / yöntemleriaşağıda açıklanmaktadır.

3.1.1 Sıyırma Raspalar

Genellikle kabarmış boya kısımlarını ya da havuza girmiş geminin karinasına yapışan böcek ve yosunları kurumadan sıyırıp dökmeye yarayan raspa tipidir. Bu raspalar uzun ağaç sap üzerine takılmış ıspatula tipinde çelik düzlemlerden oluşur. Zamanla ağızlarının bilenmesi gerekir.

Ağaç yüzeyler üzerindeki boyalarda bu raspalarla temizlenir. Gemide bu raspalar her an el altında bulundurulurlar. Küçük bir paslanma görüldüğünde bu kısım el raspası ile raspa edilip sülyen boya ile boyanmalıdır. Böylece paslanmanın geniş bir alana yayılması önlenmiş olur. Küçük yüzeylerde kullanmak üzere , eski eğelerden yapılan bir tarafı kıvrık , ağızları bilenmiş el raspaları da bulunmaktadır.

3.1.2Çekiç Raspası

Darbe vurarak bir yüzeydeki eski boyaların dökülmesinde kullanılan raspa tipidir. Bu yöntemle kalın pas tabakaları etkili bir şekilde raspa edilebilir. Bu raspa aleti iki ucu keskin çekiç şeklinde çelik malzemelerden imal edilir. Çekiç raspası galvanizli saclar üzerinde kullanılmamaktadır. Çünkü, darbelerin etkisi ile sac üzerindeki galvaniz tabakası etkilenir ve sac daha çabuk paslanır.

3.1.3 Kum Raspalar

Geniş ve düzgün yüzeylerin kısa zamanda temizlenip pastan arındırılmasında kullanılan raspa yöntemidir. Gemi zincirlerinde de bu yöntem uygulanır. İki farklı uygulama biçimi vardır: **Basınçlı su** ile birlikte pirinç büyüklüğündeki raspa kumu hortumdan geçerek nozuldan süratle püskürtülür. Bu basınçlı kum taneleri 60° C ile raspalanacak yüzeye tutulur. Bu metotta toz çıkmadığı gibi, ek olarak tatlı su kullanılırsa boyanacak yüzey daha da iyi temizlenmiş olur. Ancak korozyon olayı gerçekleşmeden hızlı bir şekilde boyaya başlanmalıdır. **Basınçlı hava** ile yapılan raspada ise; çalışma sistemi su ile yapılan raspa ile aynı türdendir. Yalnız bu raspa tipinde çok toz kalkmaktadır. Bu tozdan işçinin etkilenmemesi için gözlük ve maske gibi koruma tedbirleri alınmalı geminin lumbuzları kapatılmalıdır. Bu raspa boyalı yüzeyleride bozabilir.

3.1.4 Tel Fırçalar

Bir yüzeydeki kabarmış boyaların temizlenmesi ya da bir yüzeyde kalan ince raspa artıklarını temizlemekte kullanılır. İki tipi bulunmaktadır.

3.1.4.1 El tel fırçası

Küçük alanların ve girintili çıkıntılı yerlerin pastan temizlenmesinde kullanılırlar. Diğer metotlarla raspa yapılan yer mutlaka el tel fırçası ile temizlenmeli ve öyle boyaya geçilmelidir.

3.1.4.2 Motorlu tel fırçalar

Geniş yüzeylerin temizlenmesinde kullanılırlar. Elektrik motorundan hareket alan bir spiral ucuna takılmış yüksek devirde dönen tel fırça; temizlenecek yüzey üzerinde gezdirilmek sureti ile, bu yerin pas, toz ve raspa artıklarından temizlenmesini sağlar. Bu raspa aletini kullanan personelin maske ve gözlük takması gerekir.

3.1.5 Kimyevi Boya Çıkarıcılar

Bu sistem raspa konusu dışında görülse de, bir yüzeyin kalıntılardan, eski kaplamalardan temizlenmesi işlemi olduğundan, raspa konusu içine girmektedir.

Bilhassa hassas cihazların boyanmaları gerektiğinde bu cihazlara zarar vermeden kullanılan en etkili sistem budur. Boya çıkarıcı olarak çözücüler (solvent) kullanılır. Dekapon, Hidro Solver ve benzeri boya çıkarıcı maddeler yüzeye fırça ile sürülür ya da sprey olarak püskürtülür. Belli bir süre sonra yüzey bezle temizlenir.

3.1.6 Yüzey Pürüzlüğü Ölçümü

Raspalama işlemi çeliğin yüzeyinde istenmeyen oluşumların ne ölçüde temizlendiğine ve yüzeyin hangi ölçüde aşındırıldığına göre derecelendirilir. Bu konuda dünyada bazı standart derecelendirmeler vardır. Türkiye’de İsveç standardı olan “Swedish Standards For Ground Vibrations And Airblast” SA1, SA2, SA2.5 ve SA3 gibi derecelendirme kullanılır. Bu derecelendirme ölçüleri TSE kurumunca TS EN ISO 8501-1 (1999) olarak aynen kabul edilmiştir.

SA1, son derece yüzeysel bir temizlik derecesidir. Paslanmış yüzeylerde son derece yüzeysel bir temizlik biçimi olup gemi inşaatı endüstrisinde “süpürme” olarak adlandırılır. **SA2** ise çeliğin oldukça temizlenmiş, yüzeyin bir hayli pürüzlendirildiği, bir kumlama derecesidir. Amerikan SSPC ölçülendirme skalasında “commercial” (ticari); British BS 4232 ölçülendirme skalasında “3rdQuality 80% Whole Surface” olarak sınıflandırılır.

SA2.5, çelik yüzeyin gayet iyi pürüzlendirildiği, istenmeyen oluşumların tamamına yakın bölümünün temizlendiği ve çeliğin kendine has gri renginin kolaylıkla görüldüğü, endüstride en çok tercih edilen kumlama derecesidir. Amerikan SSPC ölçülendirme skalasında “Near White”; British BS 4232 ölçülendirme skalasında “2nd Quality 95% Whole surface” olarak sınıflandırılır.

S43 ise, elik yüzeyin çok iyi pürüzlendirildiği, istenmeyen oluşumların tamamen temizlendiği, çeliğin kendine has gri renginin tamamen ortaya çıktığı bir kumlama derecesi olup endüstride tercih edilmeyen bir kumlama derecesidir. Çünkü uygulama zamanı ve maliyeti oldukça yüksektir. Amerikan SSCP llendirme skalasında “White Metal”; British BS 4232 llendirme skalasında “1 st quality 100% Whole surface” olarak sınıflandırılır.

3.2 Numunelerin Yüzey Pürüzlülüğünün Saptanması

Bu çalışmada raspalanan yüzeylerin lm Keane-Tator marka karşılaştırma düzeneği (Surface Profile Comparator) kullanılarak yapılmıştır (şekil 3.1).



şekil 3.1 Yüzey karşılaştırma düzeneği

Referans diski, 5 kat büyütmeli, aydınlatmalı ve manyetik disk tutuculu bir büyüteç ve vinyl bir disk kabından oluşan bu düzenek, raspalanmış yüzeylerin dayanak noktası olarak yüzeylerinin profil derinliğini yerinde, hızlı ve duyarlı bir şekilde belirlemek için kullanılmaktadır.

Nikelden yapılmış karşılaştırma diski her biri farklı derinlik paternini içeren dayanak noktası niteliğindeki beş bölümden oluşurmaktadır. Her bölüm, birinci kısmı nominal dayanak noktası paterni derinliğini mil (1 mil = 1000 mikro in = 25.4

mikron) cinsinden ifadesini, ikinci kısım raspa cinsini belirten bir kısaltmayı (örneğin, kumla raspalama için SH) ve son kısmı da diskin yapıldığı yılı içeren iki haneli bir ibareyi (örneğin, 1976 yılı yapımı disk için '76') içermektedir.

Kullanılan iki referans disklerinden birinde, nominal dayanak noktası paterni olarak 1.5, 2.0, 3.0, 4.5 ve diğerinde ise 5.5 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 segmentleri bulunmaktadır.

Karşılaştırma diski, ya gözle ya da dokunarak kullanılabilecek bir referans noktası teşkil eder. Görsel bir referans olarak kullanabilmek için, disk büyütecini merkezine yerleştirilir. Disk bağlanmış olan büyüteç kumlanmış / raspalanmış çeliğin yüzeyine yerleştirilir ve bu yüzeye en yakın olan pürüzlülüğe sahip olan disk bölmesi seçilir. 'V' şeklindeki bir ayrımla ayrıştırılmış bölmeler arasında karşılaştırmanın dikkatlice yapılması çok daha iyi bir duyarlılık sağlamaktadır (Kta-Tator Inc., 1976).

Dokunmak yoluyla referans kullanımı için, parmak ucu ya da bir ağaç kıymığı yardımıyla karşılaştırma yapılabilir.

Çalışmada, raspa uygulanan numuneler tozdan basınçlı hava ile arındırılmış ve her bir numunenin yüzey pürüzlülüğü Keane-Tator düzeneğiyle ölçülmüştür (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin ölçümü

3.3 Numunelerin Üretimi

Derhal ardından tüm numunelere aşağıda bilgileri sunulan epoksi astar uygulanmıştır. Ayrıca, çelik numunelerin raspa kumunun basıncının etkisiyle savrulmaması için özel bir düzenek hazırlanmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Raspalanmış ve kaplanmaya hazır çelik numuneler

3.4 Numune Üretiminde Kullanılan Epoksi

Çalışmada, Türkiye’de üretilen ve çelik tekne gövdelerinin boya uygulamalarında da yaygın olarak kullanılan iki tür epoksi ürün grubundan yararlanılmıştır. Epoksi uygulamaları gerçekleştirilirken üretici teknik bilgi fişlerinden / talimatlarından yararlanılmıştır. Bu talimatlar bağlamında,

- Uygulama zemin hazırlığı gerçekleştirilmiş, kaplama yapılacak zemin yağ, toz gibi yabancı maddelerden arındırılmış, yüzey tamamen ortaya çıkmış ve kuru vaziyette uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu yüzeyin sağlanması amacıyla raspalama işlemi gerçekleştirilmiştir.
- Temizlik yapıldıktan sonra uygulama başlarken, katlar arası yüzey üzerinde yoğunlaşmış rutubet oluşumuna izin verilmemiştir. Bunun için özellikle sabah erken ve akşam geç saatlerde uygulamadan kaçınılmıştır.
- Tüm uygulamalarda güneş ışığına maruziyet önlenmiştir.

3.4.1 Epoksi Astarlar

3.4.1.1 Raspalanmamış Yüzeylere Uygulanan Yüzey Toleranslı Epoksi Astar (Üretici -1)

AC 080 kodlu bu malzeme, üretici teknik bilgi fişinde [Barva(a), 2010], epoksi reçine esaslı, iki bileşenli, yüksek katkılı ve yüzey toleranslı, aynı zamanda katodik koruma da sağlayan bir astar olarak tanımlanmaktadır. Kullanım alanları olarak ise, düşük solvent içeriği ve yüksek katı maddesi sayesinde, uygulama yüzeyindeki sorunlara yüksek tolerans, her koşulda iyi yapışma gerektiren, katlar arasındaki yapışma performansını iyileştirilmesi istenen, yüksek darbe dayanımının beklendiği haller tanımlanmaktadır. Metal yüzeylerde uygulama astar ve ara kat görevi görmektedir. Ürün özellikleri Tablo 3.2’de sunulmaktadır.



Şekil 3.4 Epoksi ile astarlanmış numuneler

Tablo 3.2 Üretici-1 Yüzey Toleranslı Epoksi Astarın Ürün Özellikleri

Renk	Gri, kırmızı
Parlaklık	Yarı mat
Katı madde oranı (%)	79 (± 1)
Özgül ağırlık (g/cm³)	1.47 (± 0.05)
Teorik kaplama alanı (m²)	10 (70 μ kuru film)
Pratik kaplama alanı (m²)	6-7 (70 μ kuru film)
Kuruma süresi	20°C'de 8 saat, 80°C'de 45 dakika, 120°C'de 20 dakika
Ambalajı	20 kg A + 5 kg B = 25 kg

Yine aynı üretici tarafından verilen bilgiler doğrultusunda hazırlanan Tablo 3.3, uygulama aşamasındaki önerileri içermektedir.

Tablo 3.3 Üretici - 1 Yüzey Toleranslı Epoksi Astarın Uygulama Önerileri

Karışım oranı	4:1
Uygulama yöntemleri	Fırça, rulo, havalı ve havasız tabanca
Tiner (hacimce azami %)	10-20 (Epoksi tiner)
Karışım ömrü	3-4 saat / 25°C
Önerilen yaş film kalınlığı (μ)	150
Önerilen kuru film kalınlığı (μ)	100
Katmanlar arası bekleme süresi	10 – 12 saat / 25°C
Ekipmanları temizliği	Epoksi tiner kullanılarak

Karışım hazırlanırken, A bileşeni ve B bileşeni ayrı ayrı düşük devirli karıştırıcı ile karıştırılmış, bu işlemi takiben B bileşeni A bileşeninin içine ilave edilerek homojen bir karışım elde edilene kadar (yaklaşık 5 dakika) karıştırılmaya devam edilmiştir.

Bu ürün, SA0 (raspalanmamış) yüzeylerde kullanılmıştır.

3.4.1.2 Raspalanmış Yüzeylere Uygulanan Çinkoca Zengin Epoksi Astar (Üretici-1)

AC 070 kodlu bu malzeme ise, üretici teknik bilgi fişinde [Barva(b), 2010], iki bileşenli, epoksi poliamin reçine esaslı, yüksek oranda saf mikronize çinko tozu içeren, reaksiyon kurumalı astar olarak tanımlanmakta ve ürünün avantajları olarak,

- Antikorozyon niteliği,

- Katodik koruma yapması,
- Aderansının yüksekliği,
- Deniz suyuna karşı dayanımı sayılmaktadır.

Ürünün kullanım alanları, özellikle su altında bulunan veya suyla sürekli temasta olan demir-çelik yüzeylerin paslanmaya karşı uzun süreli direnç istenilen durumlarda uygulanan epoksi boya sistemlerine astar katı olmak olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca kurşun bileşikleri içermediğinden yiyecek ve içecek maddeleriyle temas eden yüzeylerin boyanmasında da kullanılmakta olduğu belirtilmektedir.

Ürün özellikleri Tablo 3.4’de sunulmaktadır.

Tablo 3.4 Üretici-1 Çinkoca Zengin Epoksi Astarın Ürün Özellikleri

Renk	Gri
Parlaklık	Mat
Katı madde oranı (%)	75 (±1)
Özgül ağırlık (g/cm³)	2.00 (±0.05)
Teorik kaplama alanı (m²/l)	10 (50µ kuru film)
Pratik kaplama alanı (m²/l)	5 (50µ kuru film)
Kuruma süresi(20°C’de)	2 saat (dokunma kuruması), 24 saat (sert kuruma), 7 gün (kimyasal direnç)
Ambalajı	18 kg A + 2 kg B = 20 kg

Yine üretici tarafından verilen bilgiler doğrultusunda hazırlanan Tablo 3.5, uygulama aşamasındaki önerileri içermektedir.

Tablo 3.5 Üretici-1 Çinkoca Zengin Epoksi Astarın Uygulama Önerileri

Karışım oranı	9:1
Uygulama yöntemleri	Fırça, rulo, havalı ve havasız tabanca
Tiner	Epoksi tiner
Karışım ömrü	8 saat / 20°C
Önerilen yaş film kalınlığı (µ)	70
Önerilen kuru film kalınlığı (µ)	50-70
Katmanlar arası bekleme süresi	24 saat / 25°C
Ekipmanları temizliği	Epoksi tiner kullanılarak

Karışımın hazırlanması AC 080 ürününün hazırlanması aşamalarının aynısını içermektedir. Bu ürün ise SA1 ve SA2.5 düzeyinde raspalanmış yüzeylere uygulanmıştır.

2.4.1.3 GR 4480 Solventli Yüzey Toleranslı Epoksi Astar (Üretici -2)

GR 4480, iki bileşenli, metal yüzeylere uygulanan, yüzey toleranslı, epoksi reçine esaslı bir astardır (Duratek, 2010(a)) (Tablo 3.6).

Tablo 3.6 Üretici-2 Solventli Yüzey Toleranslı Epoksi Astar (Duratek) Ürün Özellikleri (Duratek, 2010(a))

Çalışma koşulları	Çalışılan alan sıcaklığı 10°C – 30°C olmalıdır.
Karışım Yoğunluğu (20°C’de TS EN ISO 2811-1)	1.40 – 1.60 g/cm ³
Ambalajı	A ve B bileşenleri 2 ayrı ambalajda set olarak, çeşitli boyutlarda sunulur.
Sarfiyat	Teorik olarak tek katta yaklaşık 200 g/m ² ’lik bir sarfiyatla 75 - 85 mikron kuru film kalınlığı elde edilir.
Karıştırma	A ve B bileşenleri bir matkap motoruyla önce kendi ambalajında karıştırılır. B kabı içeriği, A kabına ilave edilerek iki bileşen homojen bir karışım oluşturuncaya kadar, karıştırmaya devam edilir. Bu süre 2 – 5 dakika arası olmalıdır. Sürekli karıştırıcılar, karışımın içinde hava kabarcığı oluşmasına neden olacağından, karıştırıcının devri 400 – 500 devir /dakika’yı geçmemelidir. Büyük ambalajlı alımlarda, iki bileşenin aynı kaptaki karıştırılması karışım ömründen dolayı mümkün olmayacaktır. Bu iki bileşeni, bir ölçü kabı veya cetveli yardımıyla hacimsel olarak veya bir terazi yardımıyla ağırlıkça
Depolama şekli	15 – 25 °C da ve direkt güneş ışığı almayan rutubetsiz, kapalı depolarda ve açılmamış, orjinal ambalajında; 12 ay.
Uygulama yöntemleri	Kaplama uygulamasından önce yüzeyde kips, yağ, gres, tuz ve benzer kirlilikler arındırılmalıdır. Uygulama yapılacak yüzeyde nem olmamalıdır. Kaplama yapılacak yüzey ISO 8501 standardına uygun olarak en az SA 2 ½ mertebesinde kumlanmış veya St 2 mertebesinde mekanik olarak temizlenmiş olmalıdır. GR 4480 Yüzey Toleranslı Epoksi Astar yüzeye fırça, rulo veya havasız tabanca ile uygulanır. Ara kat olarak ASL, ABT, KT serisi ve son kat olarak SL, BT, KT veya SA serisi boyalardan biri tatbik edilir. Normal şartlar altında astar, ara kat ve son kat tatbiki yapılırken katlar arasında (23°C’de) 10 – 24 saat beklenir. Bu süre aşılsa, bir sonraki kat tatbik edilmeden önce yüzeyi ımparalanmalıdır. Katlar arası uygulama süresi, düşük sıcaklıklarda uzar, yüksek sıcaklıklarda kısalır. Uygulama için ideal sıcaklık aralığı, 15 – 25°C’dir.
Karışım oranı (ağırlıkça)	50/50
Karışım oranı (hacimce)	50/50
Karışım Viskozitesi (mPas, 25°C, DIN 53229)	1500–2000
Katmanlar arası bekleme süresi	6-7 saat / 23°C
Ekipmanları temizliği	Epoksi tiner kullanılarak

3.4.2Epoksi Katmanlama Reçineleri

3.4.2.1 Ürün No.1

Üreticinin kataloğunda ‘*üniversal tip epoksi yapıştırıcı*’ başlığıyla tanımlanan ürün, yine aynı katalogda, soğuk havalarda kristallenme yapmayan, yüksek performanslı pompa ile kullanılabilme özelliği yanında düşük viskozitesi ile vakum yapılma imkanı sağlayan nitelikleriyle ön plana çıkmaktadır. 300 gr/m² sarfiyat ile 250-300 µ kuru film kalınlığının elde edildiği bu polimerin hava koşullarına bağlı olarak 6-12 saat arasında kürlendiği ifade edilmektedir. Dolgu içermeyen solventsiz bir yapıştırıcı olan ürün, 5/3 oranında karışıma tabi tutulmaktadır.

Ürünle ilgili özellikler üretici firma tarafından Tablo 3.7’deki gibi verilmektedir.

Tablo 3.7Üretici-1Reçinenin Özellikleri

	Saf Epoksi Reçine	Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Reçine
Çekme mukavemeti (ISO 527)	600 kgf/cm ²	1875 kgf/cm ²
Çekme mukavemeti modülü (ISO 527)	28250 kgf/cm ²	63240 kgf/cm ²
Kopmada uzama (ISO 527)	% 3.6	% 5.9
Eğilme mukavemeti (ISO 14125)	971 kgf/cm ²	1050 kgf/cm ²
Eğilme mukavemeti modülü (ISO 14125)	33748 kgf/cm ²	68100 kgf/cm ²
Kırılmada deformasyon (ISO 14125)	7.8 mm	2.7 mm
Yüzey sertliği (Barcol 934-1)	28.2	
Yüzey sertliği (Barcol 936)	69.2	
Su absorpsiyonu (ISO 62) 7 gün	%0.46	
Cam oranı		% 28.4
Renk	Bulanık	
Görünüm	Mat	
Yoğunluk	1.1 g/cm ³	
Ambalajı	15 kg A komponenti + 15 kg B komponenti = 30 kg	
Alevlenme noktası	>25°C	
Uygulama yöntemleri	Fırça, rulo, mala	
Karışım oranı	1:1	
Katmanlar arası bekleme süresi	8 saat / 25°C	
Ekipmanları temizliği	Epoksi tiner kullanılarak	

3.4.2.2 Ürün No.2

Çalışmada kullanılan ikinci tip epoksi ise Duratek firmasının, '*solventsiz epoksi laminasyon reçinesi*' olarak tanımladığı KL 674 kodlu ürünüdür (Duratek, 2010(b)). Bu ürüne ilişkin nitelikler Tablo 3.8'de sunulmaktadır.

Tablo 3.8 Üretici-2 Epoksi Laminasyon Sistemi Özellikleri (Duratek, 2010(b))

	Saf Epoksi Reçine
Çekme mukavemeti (DIN 53504, TS 1967)	50 N/mm ²
Eğilme mukavemeti (DIN 52371, TS 985)	73 N/mm ²
Çalışma koşulları	Çalışılan alan sıcaklığı 10°C – 30°C olmalıdır.
Karışım Yoğunluğu (20°C'de TS EN ISO 2811-1)	0.9–1,1 g/cm ³
Ambalajı	A ve B bileşenleri 2 ayrı ambalajda sunulmuş olup, A kabı, her iki bileşenin karışımının tamamını alacak büyüklüktedir. 1, 3, 30 ve 360 kg'lık ambalajlardadır.
Karıştırma	A ve B bileşenleri bir elektrikli karıştırıcı ile önce kendi ambalajında karıştırılır. B kabı içeriği, A kabına ilave edilerek iki bileşen homojen bir karışım oluşturuncaya kadar, karıştırmaya devam edilir. Karışım süresi 2– 5 dakika arası olmalıdır. Süratli karıştırıcılar, karışımın içinde havakabarcığı oluşmasına neden olacağından, karıştırıcının devri 400 – 500 devir /dakika'yı geçmemelidir.
Depolama şekli	15 – 25 °C da ve direkt güneş ışığı almayan rutubetsiz, kapalı depolarda ve açılmamış, orjinal ambalajında; 12 ay.
Uygulama yöntemleri	Fırça, rulo, mala
Karışım oranı (ağırlıkça)	60/40
Karışım oranı (hacimce)	57/43
Karışım Viskozitesi (mPas, 25°C, DIN 53229)	600–1200
Katmanlar arası bekleme süresi	5-7 saat / 23°C
Ekipmanları temizliği	Epoksi tiner kullanılarak

3.5 Cam Elyafı

Çalışmada yararlanılan E-Cam ya da elektrik sınıfı cam, özünde elektrik kablolarının yalıtımı amacıyla geliştirilmiştir. Sonradan, son derece iyi elyafa dönüşme niteliği fark edilerek malzemelerin kuvvetlendirme fazı olarak '*cam elyafı*' tanımıyla kullanılmaya başlanmıştır. Düşük alkali bir cam olan bu ürünün tipik bileşimi, ağırlıkça %54 SiO₂, %14 Al₂O₃, %22 CaO+MgO, %10 B₂O₃ ve %2'den az Na₂O+K₂O'den oluşmaktadır.

E-Cam elyafı ürünler, denizcilik uygulamaları da dahil olmak üzere aşağıdaki nedenlerle oldukça sık başvurulmaktadır:

- Düşük maliyet
- Yüksek üretim oranı
- Yüksek mukavemet (Tablo 3.9)
- Görece olarak düşük yoğunluk
- Alevlenmeme
- Isıya karşı direnç
- Kimyasallara karşı direnç
- Neme karşı görece olarak duyarsızlık
- Son derece geniş ölçekte koşullar altında mukavemetini sürdürme yeteneği
- İyi elektrik yalıtımı

Bununla birlikte E-Cam'ın dikkate alınması gereken olumsuzlukları da söz konusudur:

- Düşük modül
- Uygun bir şekilde işlem görmediği zaman mukavemet düşümüne neden olan kendi kendini aşındırıcılık
- Görece olarak düşük yorulma mukavemeti
- Karbon elyafa ve organik elyafa göre daha yüksek yoğunluk

E-Cam'ın polimer matrisli kompozitlerde kuvvetlendirici kullanımı oldukça yaygındır. Malzemenin en iyi performansı ise, sürekli liflerin tek bir doğrultuda, birbirlerine paralel olarak yerleştirilmesiyle ortaya çıkar. Diğer doğrultularda mukavemeti iyileştirmek için farklı doğrultularda düzenlenmiş liflerden oluşan katmanlama yapıları oluşturulur. (Azom.com, 2011).

Tablo 3.9Bileşimi %54SiO₂-%15Al₂O₃-%12CaO o lan E-Cam'ın nitelikleri (Azom.com, 2011)

Özellik	Minimum	Maksimum
Atomik Hacim (ortalama), m ³ /kmol	0.0088	0.009
Yoğunluk, Mg/m ³	2.55	2.6
Enerji İçeriği, MJ/kg	100	120
Hacim Modülü, GPa	43	50
Basma Mukavemeti, MPa	4000	5000
Süneklik	0.026	0.028
Elastik Limit, MPa	2750	2875
Gerinme Dayanım Limiti, MPa	2970	3110
Kırılma Tokluğu, MPa.m ^{1/2}	0.5	1
Sertlik, MPa	3000	6000
Kayıp Katsayısı	1e-005	0.0001
Kopma Modülü, Mpa	3300	3450
Poisson Oranı	0.21	0.23
Kesme Modülü, GPa	30	36
Çekme Mukavemeti, Mpa	1950	2050
Young Modülü, GPa	72	85
Cam Sıcaklığı, K	820	850
Maksimum Servis Sıcaklığı, K	620	630
Minimum Servis Sıcaklığı, K	0	0
Özgül Isı, J/kg.K	800	805
Isıl İletkenlik, W/m.K	1.2	1.35
Isıl Genleşme, 10 ⁻⁶ /K	4.9	5.1
Breakdown Potential, MV/m	15	20
Dielektrik Sabit	6.13	6.33
Direnç, 10 ⁻⁸ ohm.m	1e+022	1e+023

Bu çalışmada da olduğu gibi, kompozit panellerin yapımında gelişigüzel doğrultularda lifleri bulunan 'mat' tip ile örgü E-Cam kumaşlardan yararlanılmaktadır.

Numunelerin hazırlanmasında kullanılan cam elyafı güçlendiriciler Metyx ticari markasına sahiptir.

3.6 Birleştirme ve Katmanlama

Üzerlerine farklı epoksi astar uygulanan çelik numuneler, üretici önerileri doğrultusunda 16° – 28° C arasında, düşük nem koşullarında 18 saat bekletilmiştir. Numunelerin bir ucunda ön çatlağı temsil etmek üzere kompozit – çelik bağlantısının bulunmadığı bir alan oluşturabilmek, yapışmayı önlemek amacıyla 60 mm uzunluğunda teflon kaplama gerçekleştirilmiştir.

Numune hazırlıkları sırasında, gerek numunelerin üreticilerin talimatları doğrultusunda sağlıklı hazırlanabilmeleri gerekse deneyler sonucunda yeterli duyarlılıkta verilere ulaşabilmek için mümkün olduğunca tozsuz ortamda, temizliğe azami özen göstermek suretiyle ve emniyet koşulları da dikkate alınarak çalışılmıştır. Üretim kaynaklanan insan hatalarını en aza indirmek amacıyla numuneler aynı kişi tarafından imal edilmiştir.

Daha sonra, numunenin bir yüzüne ilk katmanı 0.450 kg/m^2 'lik keçe, ikinci katmanı 0.400 kg/m^2 örgü malzeme ve yine son katmanı 0.450 kg/m^2 'lik keçe güçlendirici cam elyaf ve anılan epoksi reçineler uygulanmak suretiyle takribi 4 mm kalınlığında ve ön çatlak dışında 65 mm uzunluğunda bir kompozit tabaka oluşturulmuştur. Taşan reçineler kürlenmelerini takiben taşlanmıştır.

Elde edilen numunelerin test düzeneğine yerleştirilebilmesi için, M1 standartında menteşeler için yaklaşık 1 mm kalınlıkla MA 420 Plexus marka epoksi bazlı yapıştırıcıyla numunelerin ön çatlağın bulunduğu ucunun alt ve üst tarafına yapıştırılmıştır.

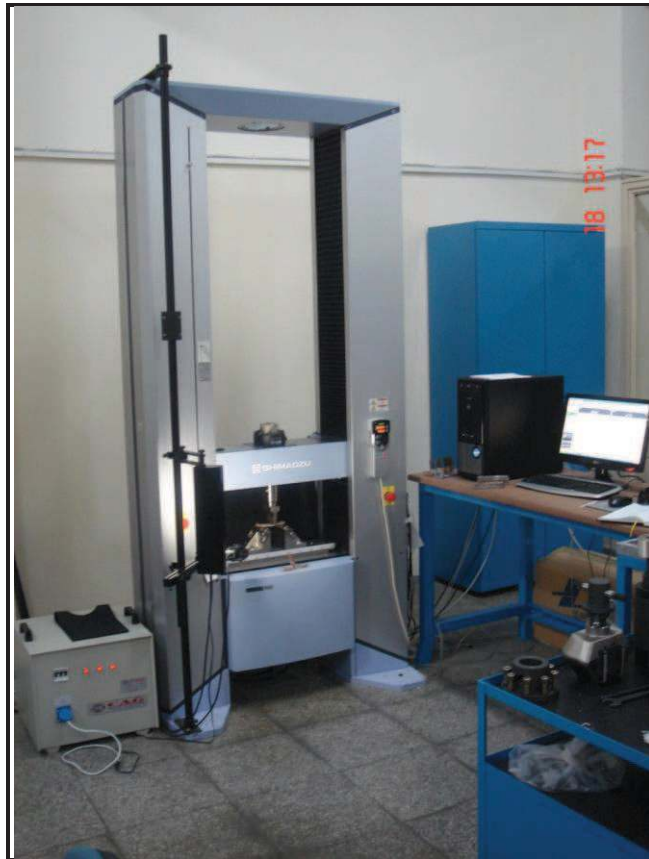


Şekil 3.5 Numunelerin teflonla kaplanması ve kodlanması

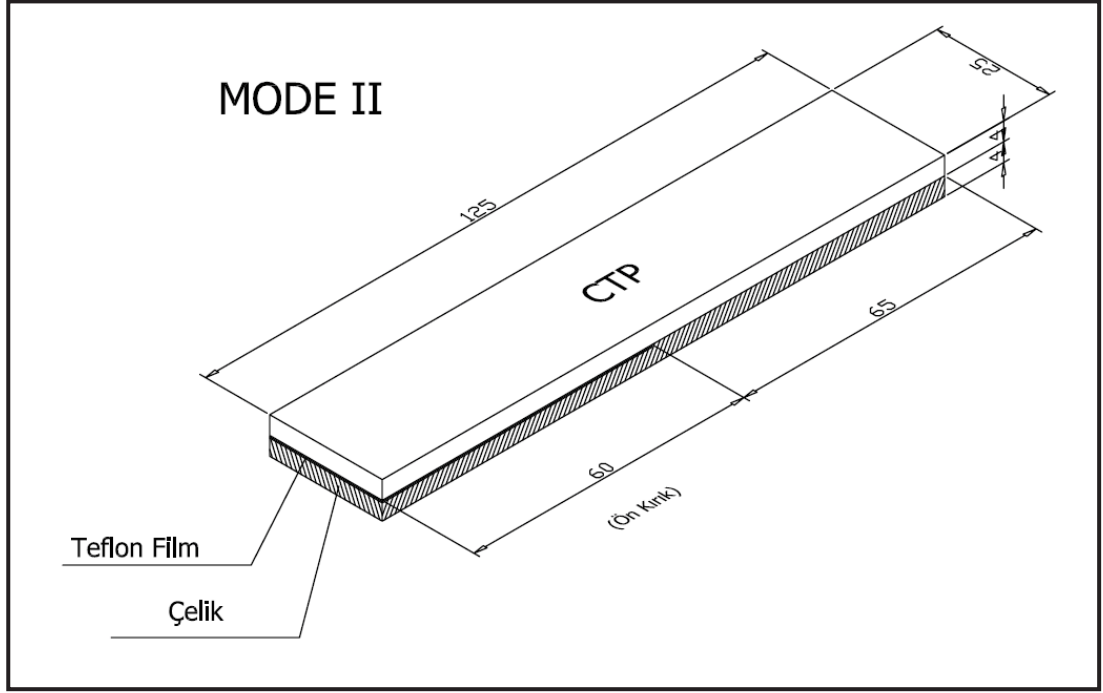
3.7 Deney D zeneg 

Çalışmada, Mode I ve Mode II yükleme koşuları altında Gerinme Enerjisi Salınım Hızı (G_C) değerleri ASTM kodlu deneylerden elde edilen veriler yardımıyla hesaplanmıştır. (ASTM, 2007).

Mode I katmanlararası kırılma tokluğu (G_{IC}) değerleri bulmak üzere düzenek ASTM D5528 standartıyla uyumludur. ift Konsol Kiriş ( KK) testinde maksimum 5 kN yük hücresine sahip Shimadzu AUTOGRAPH AG-IS serisi  niversal çekme test cihazı kullanılmıştır (şekil 3.6). Veri aktarımı ve cihazın kontrolünde Trapezium bilgisayar programından yararlanılmıştır.



şekil 3.6Deney d zeneg 

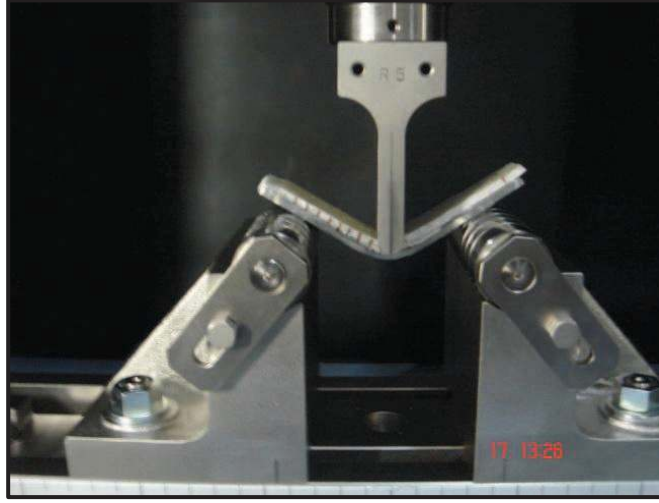


Şekil 3.8 Mode II çatlağı deney düzeneği

Mode II çatlağı deney düzeneğindeki (Şekil 3.8) mesnetler arası boy değeri ise 90 mm olarak alınmıştır.



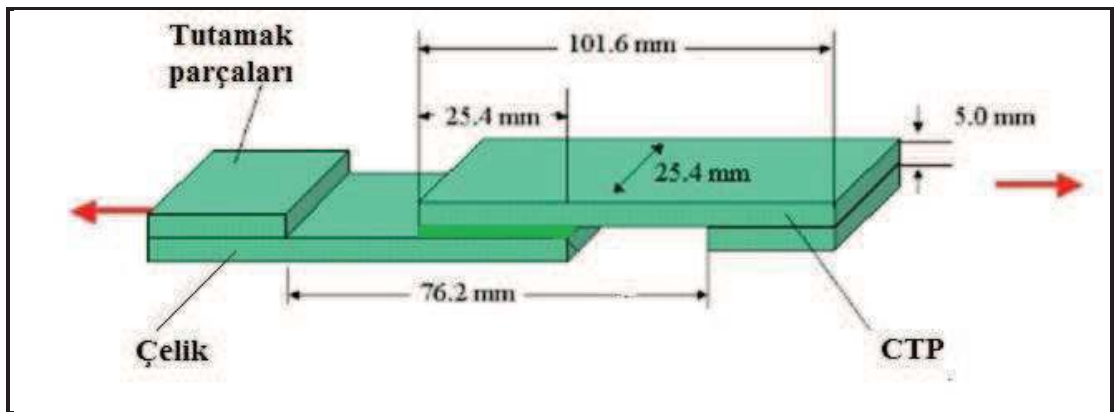
Şekil 3.9 Mode I deney düzeneği ve verilerin kaydedilmesi



Şekil 3.10 Mode II deney düzeneği

Mode I deneyinde, numuneler üzerlerine yapıştırılan menteşelerin ucundan üniversal test cihazının çenelerine bağlanarak 1.2 mm/dk'lık bir hızla çekilmiştir (Şekil 3.9). Çekme işlemi devam ederken CCD kamera ile belirli aralıklarla çatlak açılması miktarı, kuvvet ve çatlak ucu açılması miktarı kaydedilmiştir.

Ayrıca, tek karşılıklı yapıştırmalı bağlantının kesme gerilme dayanımlarını saptamak amacıyla, Şekil 3.11'de sunulan numuneler ASTM D5868-01 (2008) standardı uyarınca imal edilmişlerdir.



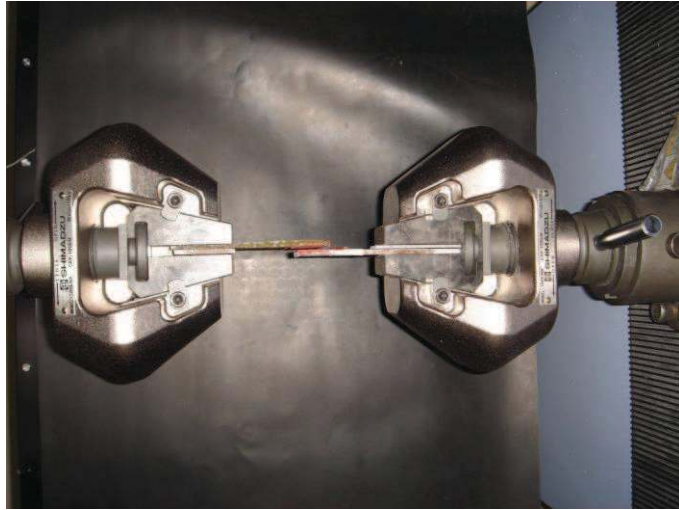
Şekil 3.11 Tek karşılıklı yapıştırmalı bağlantı numunesi (ASTM, 2008).

İmalat sırasında farklı yüzey koşulları oluşturulan çelik parçalara öncelikle farklı epoksi astar grupları 16 – 18 °C arasındaki bir ortam sıcaklığında ve düşük nem koşullarında uygulanmış ve yaklaşık 18 saat kurlenme beklenmiştir.

Daha sonra her bir çelik numunenin astarlı yüzeyine sırasıyla öncelikle 450 g/m²'lik keçe, daha sonra 400 g/m² örgü ve son olarak da yine 450 g/m²'lik keçe cam elyafları tatbik edilmiştir. Bu sırada her numune için ilgili gruptan epoksi reçineler uygulanmış ve sonuç olarak yaklaşık 4 mm kalınlığında bir ETP tabaka oluşturulmuştur.

Elde edilen numunelerin test düzeneğine sağlıklı bağlanabilmesi için çelik ve ETP parçalara tutamaklar eklenmiştir.

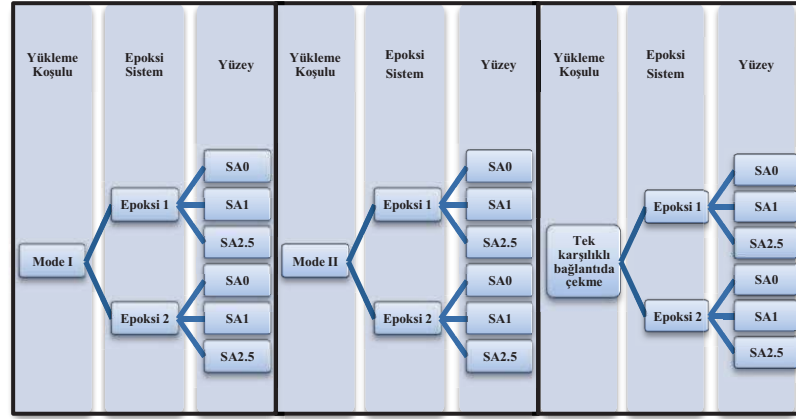
Çekme yüklemesi 1.2 mm/dk hızla numunlere uygulanmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Tek karşılıklı yapıştırılmalı bağlantı
deney düzeneği

3.8 Gerçekleştirilen Deneyler

12 farklı koşulda tasarlanan deneyler aşağıdaki şekilde özetlenmiştir (Şekil 3.12). Her koşulda ise hata oranını azaltmak maksadıyla deneyler beşer kez yinelenmiştir. Sonuç olarak toplamda 90 numune deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 3.13 Deneylerin sistematığı

Şekil 3.14 ve 15.'de ise Mode I ve Mode II yüklem koşullarında deneye tabi tutulmuş numunelerin deney sonrası görünüşleri sunulmaktadır.

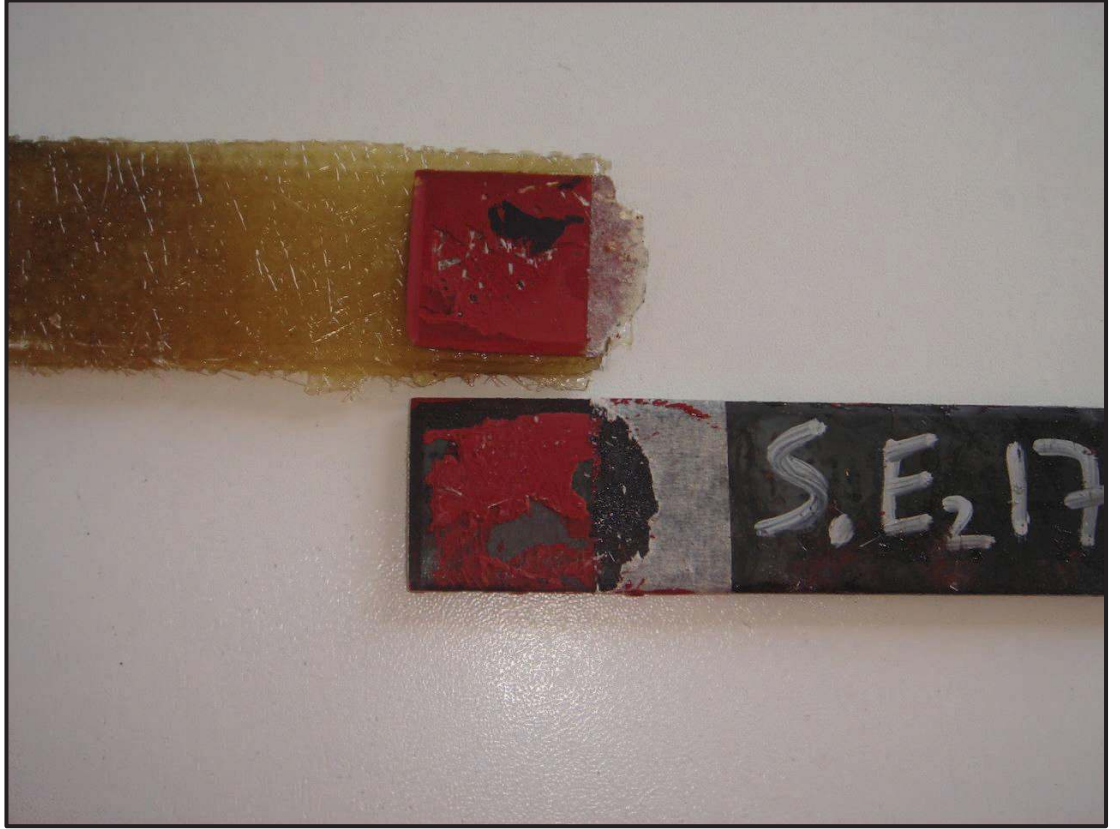


Şekil 3.14 ÇKK Numunesi



Şekil 3.15 Deney tabi tutulan UÇE numuneleri

Tek karşılıklı çekme numunesine uygulanan yükün ardından oluşan kesme kuvvetleri sonucunda hasarlanan numune bir numune örneği Şekil 3.16’da sunulmaktadır.



Şekil 3.16 Tek karşılıklı çekme deneyi sonucunda numune hasarı

BÖLÜM DÖRT

SONUÇLAR

İki farklı epoksinin E-cam elyafıyla güçlendirilmek suretiyle, üç farklı pürüzlülük koşulundaki gemi inşaatı çeliğinin yüzeyine kaplama olarak uygulanmasının performansını Mode I, Mode II ve tek karşılıklı yapıştırırmalı bağlantı için çekme deneyi olmak üzere üç farklı yükleme koşulu altında ölçmek amacıyla gerçekleştirilen testlerin sonuçları bu bölümde anlatılmaktadır. Testlerden elde edilen bu sonuçların gemi inşaatı endüstrisi bağlamında uygulamaya dönük optimizasyon çabalarına yararı olacağı düşünülmüştür.

Test düzeneği tarafından üretilen yük – yer değiştirme grafikleri cam takviyeli epoksi – çelik sistemlerinin taşıyacağı en fazla yük ve buna karşılık gelen yer değiştirme değerlerini görsel olarak belirlemeye yardımcı olmaktadır. Ayrıca çatlak ilerlemesinin oluşumunun doğası konusunda da bir fikir vermektedir. Çatlak ilerlemesi yumuşak bir eğriyi takip ediyorsa sürekli bir çatlak ilerlemesi söz konusuyken, eğride sivriliklerin varlığı yapışma – kayma düzeninde bir ilerlemeyi, yani duraksamalı ilerlemeyi anlatmaktadır.

Ayrıca hasarın gerçekleşmesinin ardından incelenen kırılma yüzeyleri yapışmanın, bir başka deyişle kompozit – çelik birleşiminin uygun koşullarda gerçekleşip gerçekleşmediği konusunda da aydınlatıcı olmaktadır.

Sonuç olarak hesaplanan G_{IC} , G_{IIC} ve Gerinme Enerjisi değerleri birleşmenin ömrü, performansı konusunda numunenin kırılma yüzeyleri oluşturabilmek için ne büyüklükte enerjiye gereksindiğini sayısal olarak ortaya koyan önemli bir belirleyicidir.

Deney sonuçları sunulurken, numunelerin $SaEbMc$ şeklindeki kodları kullanılacaktır. Bu kodlama sisteminde a , 0, 1.5 ve 2 olarak yüzey pürüzlülüğü durumlarını; b ise 1 ve 2 no.'lu üreticilere ait epoksi çeşidini ve c ise 1, 2 ve 3

şeklindeki yükleme koşulunu anlatmaktadır. Örneğin S0E1MII kodu, SA0 raspa pürüzlülüğüne sahip, 1 no.'lu üreticinin ürünü olan epoksiyle üretilmiş, Mode II yükleme koşuluna uygun tasarlanmış UÇE numunesini anlatmaktadır.

4.1. Mode I Yükleme Koşulları Deney Sonuçları

Mode I yükleme koşullarında gerçekleştirilen deneylerde maksimum yük ve buna karşılık gelen yer değiştirme değerleri için Tablo 4.1'deki sonuçlar kayıt edilmiştir.

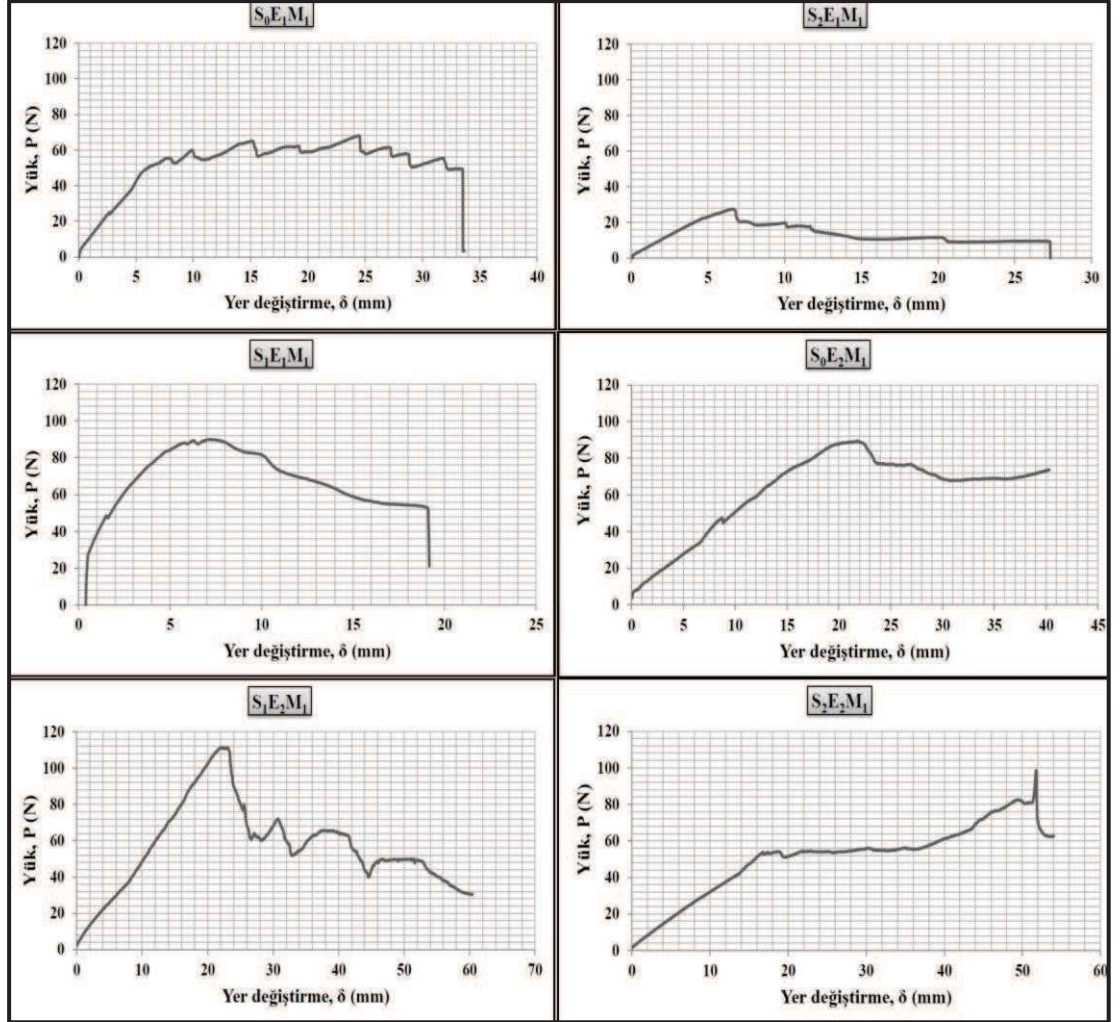
Tablo 4.1. Mode I yükleme koşullarında maksimum yük – yer değiştirme değerleri

	S0E1M1	S0E2M1	S1E1M1	S1E2M1	S2E1M1	S2E2M1
Maksimum yük, $P_{maks.}$ (N)	68,1	84,8	59,3	91,9	29,1	80,5
Yer Değiştirme δ_{maks} (mm)	20,91127	22,54567	5,932433	35,215	6,10675	33,63255
Uygunluk $C = \delta/P$ (mm/N)	0,307	0,265	0,100	0,383	0,210	0,418

Tablo 4.1.'in irdelenmesiyle,

- 2 no.'lu epoksi ürünün daha fazla yük taşıdığı ve bu yüke karşılık daha çok yer değiştirmeye izin verdiği gözlenerek, anılan ürünün performansının daha üstün olduğu düşünülebilir.
- 2 no'lu üründe çelik yüzey pürüzlülüğüyle doğru orantılı olarak taşınabilecek yük miktarı artmaktadır.
- 1 no.'lu üründe de benzer ilişki olabilecekken, bu ürüne özgü olarak raspasız yüzeylerde kullanılan astarın bağlantının performansı üzerinde olumlu etkileri olduğu iddia edilebilir.
- Numunelerin uygunluk değerlerinin S1E1M1 numuneleri dışında birbirlerine yakın değerler vermek suretiyle çelik – kompozit bağlantısının niteliğini belirlemektedir.

Mode I yükleme koşulları altında deneye tabi tutulan sistemlerden birer tane olmak üzere altı adet yük – yer değiştirme eğrisi incelendiğinde (Şekil 4.1) bazı eğilimler kolaylıkla görülebilecektir.



Şekil 4.1. Mode I yükleme koşulunda numune davranışları

Bu eğilimler sıralanacak olursa,

- 1 no.'lu üreticinin ürünü olan epoksi ile imal edilmiş olan numunelerin daha az yer değiştirme uzunluğunda çatlak ilerlemesine başladığı görülmüştür. 1 no.'lu epoksinin katman ayrışması hasarına karşı daha duyarlı olduğu, yani çok daha zayıf bir bağ oluşturduğu bu eğilimlerden anlaşılmaktadır.

- 2 no.'lu epoksi ile üretilmiş olan numunelerin çatlak ilerlemesinin sürekli olduğu, buna karşın 1 no.'lu ürünün çıkıntılı, yani çatlaklarının küçük engellerle karşılaşarak ilerlediği gözlenmektedir.

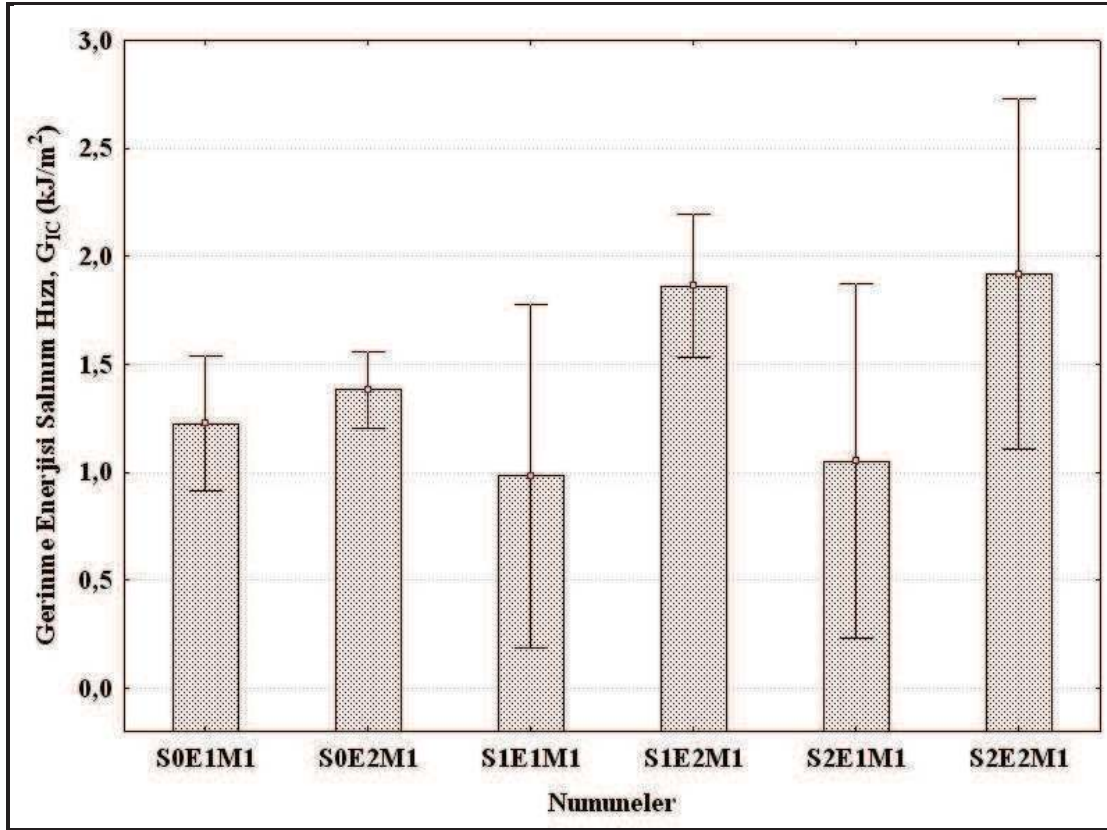
Tablo 4.2. Mode I yükleme koşullarında Gerinme Enerjisi Salınım Hızı, G_{IC}

	S0E1M1	S0E2M1	S1E1M1	S1E2M1	S2E1M1	S2E2M1
ALAN YÖNTEMİYLE $G_{IC} (kJ/m^2)$ $G_I = \frac{1}{w} \cdot \frac{dU}{da}$	1,22398	1,38108	0,98292	1,8610	1,06418	1,917566
KİRİŞ YÖNTEMİYLE $G_{IC} (kJ/m^2)$ $G_I = \frac{3P\delta}{2wa}$	1,37762	2,28602	1,10651	2,3202	1,82387	2,69389

Tablo 4.2.'de Mode I yükleme koşulları için, Alan Yöntemi ve Modifiye Edilmiş Kiriş Yöntemi olmak üzere iki farklı yöntemle hesaplanmış Gerinme Enerjisi Salınım Hızı (G_{IC}) değerleri sunulmaktadır. Bu değerler incelendiğinde,

- 2 no.'lu ürünün daha yüksek enerji salınım hızı değeri olmakla, çelik-kompozit bağlantılarda diğer ürüne kıyasla daha iyi sonuç vereceği görülecektir.
- Yine 2 no.'lu ürünün G_{IC} değerleri yüzey pürüzlülüğü arttıkça yükselmektedir. Bu durum, yüzey pürüzlülüğünün çelik – kompozit birleşmesine olumlu etkileri olduğunun kanıtı olarak görülebilir.
- Bununla birlikte, 1 no.'lu ürünün G_{IC} değerlerinin çelik malzemenin yüzey pürüzlülüğü ile ilişkilendirilmesinin güçlük arz ettiği görülmektedir. G_{IC} değerlerinin pürüzlülükle birlikte, bu ürünün kullanıldığı testlerde de artması beklenirken yüzeyi işlem görmemiş (SA0) çelik malzemeyle üretilmiş numuneler için elde edilen sonuç beklenenden yüksek olmaktadır. Bu durum, numune üretiminde kullanılan ve aynı üreticinin ürünü olan 'yüzey toleranslı' astarın yapışma performansına olumlu etkisi olarak görülebilir.
- Alan Yöntemi ile Modifiye Edilmiş Kiriş Yöntemi'nin birbiriyle uyumlu sonuçlara vardığı söylenememektedir. Alan Yöntemi'nden elde edilen

sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün birleşme performansına etkisi konusunda beklenene uygun sonuçlar vermesi nedeniyle anılan yöntem tercih edilebilir. Bu bakımdan, şekil 4.2.'de Alan Yöntemi'ne göre hesaplanmış G_{IC} değeri konusunda bir karşılaştırma sunulmaktadır.



şekil 4.2. Mode I koşullarında G_{IC} değeri (± 1 Standart Sapma Değeriyle)

Tablo 4.3. Alan Yöntemi'yle hesaplanmış G_{IC} değeri

	S0E1M1	S0E2M1	S1E1M1	S1E2M1	S2E1M1	S2E2M1
ALAN YÖNTEMİYLE Ortalama G_{IC} (kJ/m²)	1,22398	1,381078	0,982917	1,860990	1,064181	1,917566
Maksimum	1,686856	1,669822	2,303613	2,391662	2,276807	3,251989
Minimum	0,981370	1,205128	0,292067	1,520979	0,272236	1,287638
Varyans	0,098028	0,030962	0,633250	0,110315	0,758686	0,661160
± 1 Standart Sapma	0,313095	0,175960	0,795770	0,332137	1,871026	0,813117

şekil 4.2. ve Tablo 4.3.'den aşağıdaki sonuçlar retilenmektedir:

- 2 no.'lu ürünün G_{IC} değeriyle belirtilebilecek olan performansı, çelik malzemenin yüzey pürüzlülüğü arttıkça yükselmektedir.
- Bununla birlikte 1 no.'lu ürün ile üretilen numunelerde bu süreç tersine işler gibi görünmekle birlikte, bu numuneler için özel bir astar kullanıldığı unutulmamalıdır. Buradan da katmanlama epoksisi kadar, astar epoksisinin de performansı yükseltici etkisi olduğu çıkarsaması yapılabilecektir. Bu yolla bağlantı performansının artırılmasının maliyetler üzerinde olumlu etkileri olabileceği yargısı da dikkate alınabilir.
- 1 no.'lu epoksiyle üretilmiş ürünlerle gerçekleştirilen testlerden elde edilen sonuçlar geniş bir alana yayılmakla, standart sapma değerleri yüksek olmaktadır. Bu da ürünün yapısındaki tanımsızlıklara, belki de stabilite eksikliğine işaret etmektedir. Bu bağlamda, 2 no.'lu ürün çok daha tanımlı bir yapı sergilemektedir.

4.2. Mode II Yükleme Koşulları Deney Sonuçları

Mode II deney sonuçlarının deney ve ölçüm düzeneğinin uygunsuz olduğu tespit edildiğinden bu çalışmada sunulmayacaktır. Çalışmaya konu olan kompozit yapının oluşumunun, performansının ve hasar mekanizmasının Mode II deney düzeneğiyle irdelenmesinin sağlıklı sonuçlara ulaşmaya yardımcı olmadığı görülmüştür.

Bu düzenekte deneye tabi tutulan iki malzemedен ETP'in lif kırılmalarıyla sistemin kendisinden çok daha önce hasara uğradığı, yani baskın hasar mekanizmasının malzemenin sadece bir kısmından kaynaklandığı görülmekte, birleşme mekanizmasındaki yüzey hazırlığı unsurunun ihmal edilecek düzeyde etkin olduğu anlaşılmaktadır.

4.3 Tek Karşılıklı Yapıştırırmalı Bağlantı Kesme Deneyi Sonuçları

Bu yükleme koşullarında rastlanan en yüksek yük ve yer değiştirme kayıtları Tablo 4.4.'de sunulmaktadır.

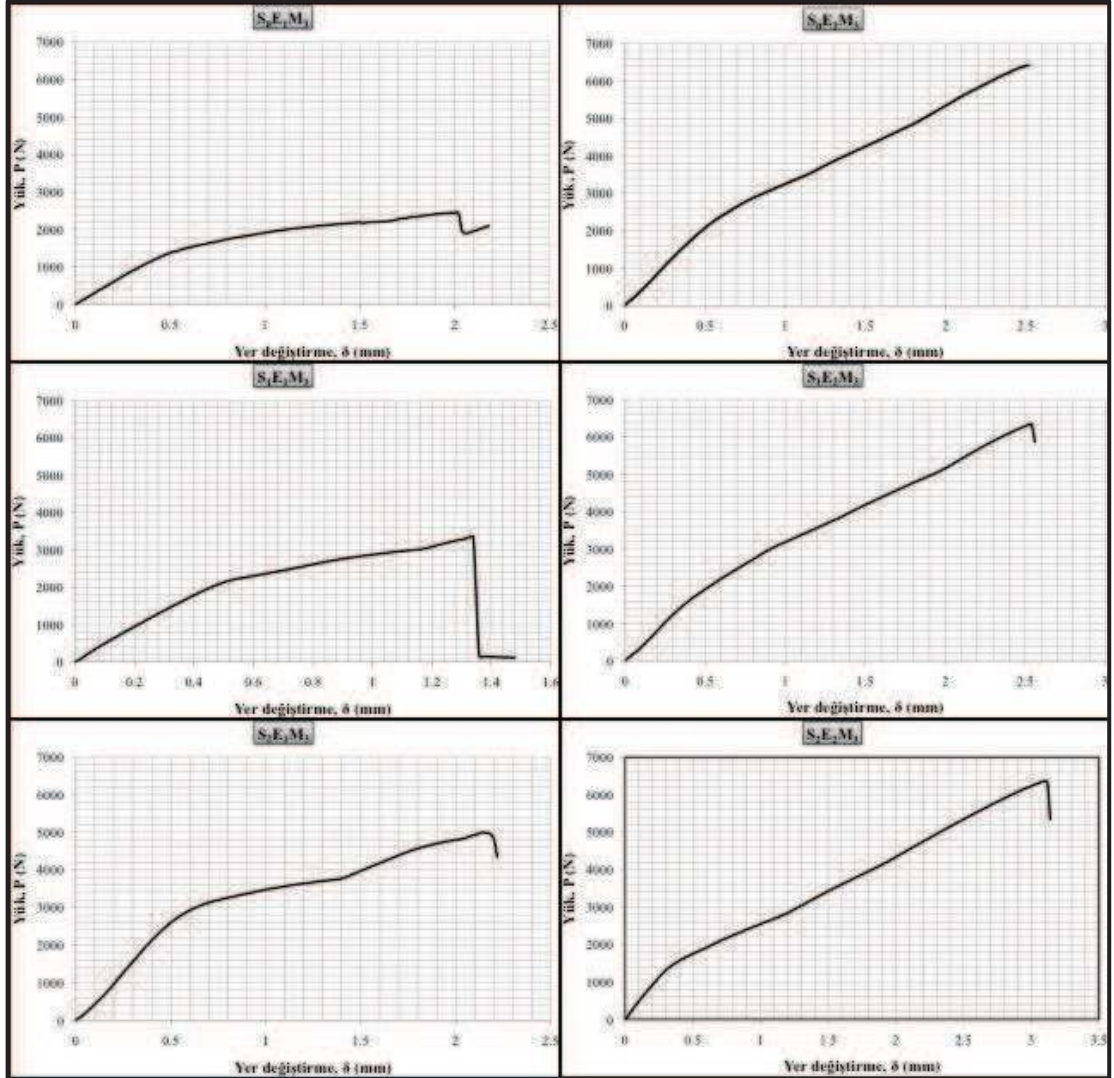
Tablo 4.4. Kesme yükleme koşullarında maksimum yük – yer değiştirme değerleri

	S0E1M3	S0E2M3	S1E1M3	S1E2M3	S2E1M3	S2E2M3
Maksimum yük, $P_{maks.}$ (N)	2438,9	6823,1	3965,4	7767,8	4984,1	7038,2
Yer Değiştirme δ_{maks} (mm)	1,999	2,899	2,119	3,499	2,139	3,079
Uygunluk $C = \delta/P$ (mm/N)	0,0008	0,0004	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004

En büyük yük – yer değiştirme değerleri yardımıyla aşağıdaki sonuçlara varılabilmektedir:

- Çelik malzemenin yüzey pürüzlülüğü arttıkça katman ayrışması hasarını başlatacak yükün büyüklüğü artmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünün artışı çelik – kompozit malzemelerin daha iyi yapışmasını, birlikte daha güvenilir çalışmasını sağlamaktadır. Bu durum her iki epoksi üreticinin ürünü için de geçerlidir.
- Bununla birlikte 1 no.'lu üreticinin ürününün aynı çelik malzeme yüzey pürüzlülüğü için çok daha az yük ile hasarlanmaya başladığı, ayrıştığı görülmektedir.
- 1 no.'lu ürün ile 2 no.'lu ürün arasındaki aynı pürüzlülük durumları için maksimum yük farkının pürüzlülük arttıkça azaldığı görülmektedir. Yani ürünler arasındaki maksimum yük farkı en pürüzsüz / pürüzlendirme işlemi görmemiş yüzeyli numunelerde en fazladır. Bunun nedeninin, 1 no.'lu üreticinin raspaş yüzeyler için özel olarak ürettiği ve '*yüzey toleranslı*' olarak takdim ettiği astar olduğu sonucuna varılabilir.
- Bir önceki maddede söz edilen yüzey toleranslı astarın uygulandığı numune dışındaki koşullarda maksimum yer değişmelerin 2 no.'lu üründe 1 no.'lu ürüne nazaran daha yüksek olduğu görülmüştür. İki farklı ürün arasındaki bu farkın, ilgili numunelerin taşıdığı maksimum yük farkına çok yakın olduğu da gözlenmiştir.
- Bununla birlikte testten elde edilen değerlerin uygunluğu (C) hemen hemen her koşulda birbirine eşittir. Bu da testin dengeli sonuçlara ulaşmaya ve sağlıklı karşılaştırmalar yapmaya uygun olduğunu ortaya koymaktadır.

Kesme yükleme koşulları altında deneye tabi tutulan sistemlerden birer tane olmak üzere altı adet yük – yer değiştirme eğrileri Şekil 4.3.’de sunulmaktadır.



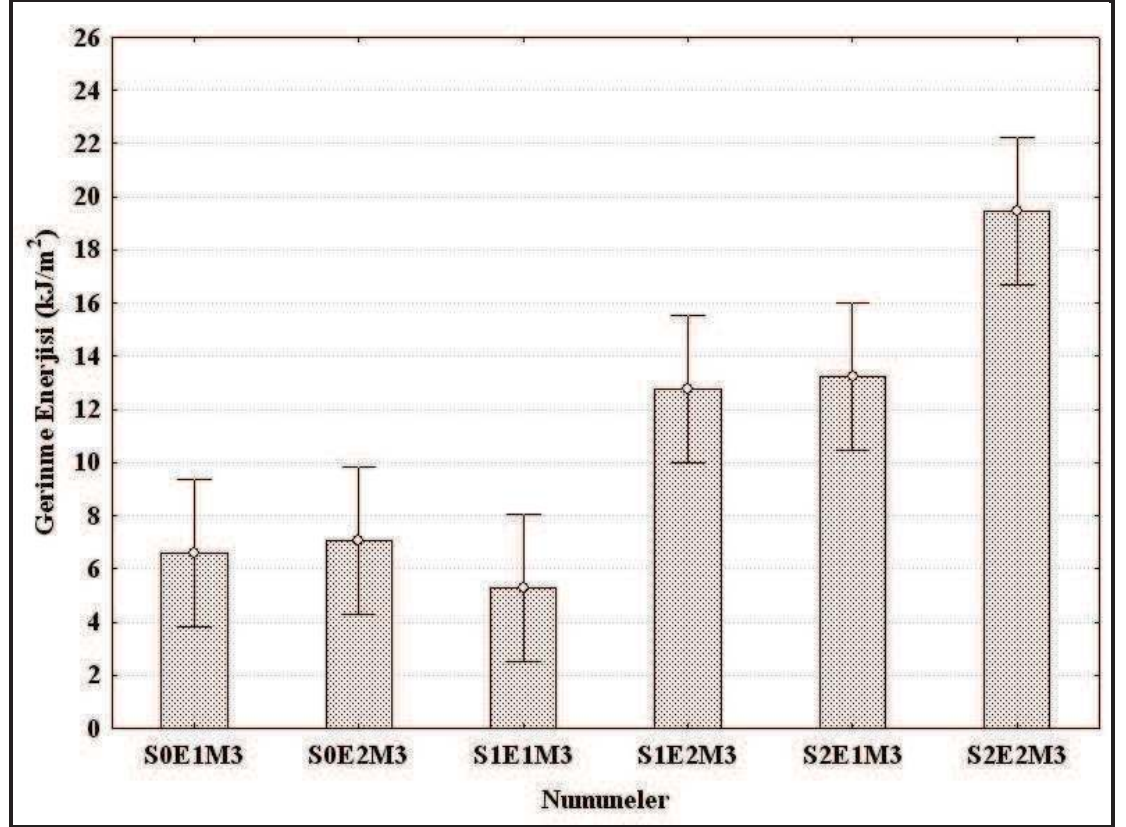
Şekil 4.3. Tek karşılıklı yapıştırma bağlantı kesme yüklemesi koşulunda numune davranışları

Yük – şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşmak mümkündür:

- Her iki ürün ve her yüzey pürüzlülüğü durumundaki hasar süreklilik arz etmektedir. 1 no.’lu ürünle üretilmiş numunelerde anılan süreklilik deney devam ettirildiği takdirde yüksek bir yer değişme değerinde kesintiye uğrayabilmektedir. Bununla birlikte, 2 no.’lu ürünün hasar başlangıç yük ve yer değiştirmesi oldukça belirgindir. Bu üründe hasar oluşumunun diğer ürüne

nazaran daha yüksek bir gerinme enerjisi birikiminin ardından oluştuğu anlaşılmaktadır.

- Kesme hasarının her ürün ve her yüzey pürüzlülüğü durumu için birbirine oldukça yakın yer değiştirme değerlerinde başladığı görülmektedir.



Şekil 4.4. Tek karşılıklı yapıştırma bağlantı kesme deneylerinden elde edilen Gerinme Enerjileri (±1 Standart Sapma Değerleriyle)

Tablo 4.5. Tek karşılıklı yapıştırma bağlantılarının Gerinme Enerjileri

	S0E1M3	S0E2M3	S1E1M3	S1E2M3	S2E1M3	S2E2M3
Ortalanma Gerinme Enerjisi (kJ/m ²)	6,5943	7,0592	5,2860	12,745	13,256	19,461
Maksimum	9,2481	8,3071	7,0894	14,389	20,897	23,272
Minimum	4,5155	5,3505	4,0381	11,447	8,987	15,807
Varyans	3,531	1,001	1,442	1,328	19,808	7,760
±1 Standart Sapma	2,170	1,119	1,386	1,298	4,976	3,115

Tek karşılıklı yapıştırırmalı bağlantılardaki kesme yükleme koşulları altında yapılan çekme deneylerinden elde edilen Gerinme Enerjisi verileri Şekil 4.4 ve Tablo 4.5 yardımıyla karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılabilmektedir:

- Bu yükleme koşulları altında, 2 no.'lu ürünün daha yüksek performans gösterdiği açıkça görülmekte olup, buradan çelik – kompozit yüzeylerin birleştirilmesinin performansının bu deneylerle belirgin olarak tanımlanabileceği görülmektedir.
- Yüzey pürüzlülüğünün bağlantı performansına etkisi konusunda ise önceki değerlendirmelere paralel sonuçlar görülmektedir. Yani pürüzlülükle birlikte performans artarken, örneğin 1 no.'lu ürün özelinde yüzey toleranslı astar uygulamasının performansa olumlu etkileri görülebilmektedir. Üretim aşamasında böyle bir seçenek, işgücü ve maliyet unsurları da karşılaştırılmak suretiyle tercih edilebilir.
- Yüzey astarlı numunelerin standart sapmaları yüksektir. Bununla birlikte sapma değerleri, yüzey pürüzlülüğü arttıkça artmaktadır.

Tek karşılıklı yapıştırırmalı bağlantı deneyleri sonucunda gözlenen hasar mekanizmaları için Şekil 4.5 ve 4.6. yardımıyla kompozit bağlantının çelik bölümü ve ETP bölümü incelendiğinde, Bölüm 1'de ayrıntılandığı biçimde hasar mekanizmasının genellikle '*yapıştırıcı hasarı*' olarak ortaya çıktığı, fakat sınırlı da olsa '*hafif elyaf sıyrılma hasarı*' na rastlanmaktadır.



Şekil 4.5. Tek karşılıklı yapıştırırmalı bağlantının çelik kısmında hasarlanma



Şekil 4.5. Tek karşılıklı yapıştırırmalı bağlantının ETP kısmında hasarlanma

BÖLÜM BEŞ

DEĞERLENDİRME

Bu çalışma, çelik malzemeden inşa edilmiş gemilerde başvurulabilecek polimer esaslı kompozit malzemelerle birleşme sorununa eğilmektedir. Polimer esaslı kompozit kullanımına olan eğilim yıllar içinde bu malzemenin,

- mukavemet/ağırlık oranının diğer seçeneklere göre çok daha yüksek olması,
- denizel çevrenin olumsuz etkilerine karşı yüksek direnç,
- kolay temin edilebilirlik ve işlenebilirlik,
- yüksek ömür (özellikle yorulma yüklerine karşı),
- bakım-onarım kolaylığı

nitelikleri nedenleriyle büyük bir ivmeyle artmaktadır.

Elyaf Takviyeli Polimer Esaslı (ETP) kompozitlerin gemi üst yapılarında kullanımının ayrıca ağırlık dağılımını geminin daha stabil olması lehine değiştirmesi gibi önemli bir avantajı da vardır.

Bununla birlikte, oldukça farklı nitelikleri olan çelik ve ETP'nin güvenilir bir şekilde birleştirilebilmesi konusundaki kaygılar günümüzde gerçekleştirilen malzeme bilimi araştırmalarının odak noktalarından biri haline gelmiştir. Her ne kadar inşaat endüstrisinin benzer sorunlarına deneysel yaklaşımlar zengin bir literatür oluşturmuşsa da probleme gemi inşaatı mühendisliği bakış açısının da katılmasından yararlar umulmuştur.

Bu bağlamda, farklı iki malzemenin birleşim arayüzeyinin yapının ömrü ve hasar toleransı temelindeki performansına ilişkin deneysel yöntemler incelenmiş ve katmanlararası ayrışma hasarının analizinde kullanılan ve açılma modu olarak tanımlanan Mode I ile düzlem kesme modu veya kayma modu olarak tanımlanan Mode II yükleme koşullarında ortaya çıkan ve anılan performansın niteliksel olarak

belirlenmesine yardımcı olan Gerinme Enerjisi Salınım Hızı, G_{IC} ve G_{IIC} hesaplamalarından yararlanmaya karar verilmiştir. Ayrıca, söz konusu kompozit bir yapıştırıcıyla bütünlendiği için yapıştırılmalı bağlantıların performanslarını ölçmeye yarayan tek karşılıklı yapıştırılmalı bağlantılar için çekme deneyleri ve bu deneylerden elde edilen gerinme enerjilerinin de önemine binaen çalışmaya dahil edilmesi planlanmıştır.

Gemi inşaatında kullanılan çeliğin boya katmanı dahil herhangi bir diğer malzemeye yapışabilmesinin sağlığını etkileyen en önemli unsur olarak anılabilecek yüzey pürüzlülüğünün de yapılacak çalışmada dikkate alınması öngörülmüştür.

Günümüz ileri kompozit sistemlerde kullanımı hızla gelişmekte olan epoksi reçinelere de odaklanması istenen bu deneysel çalışma için, ilgili ASTM standartlarında öngörülen boyut ve formlar uyarınca Mode I, Mode II ve tek karşılıklı yapıştırılmalı bağlantı kesme numuneleri test edilmek üzere üretilmiştir. Bu numuneler her bir yükleme koşulu için,

- SA0, SA1 ve SA2.5 pürüzlülükte,
- iki farklı epoksi katmanlama reçinesi kullanarak,
- her bir sistem için deneysel hataları en aza indirmek için beşer tane numune olmak üzere toplam 90 adet numune testlere tabi tutulmuştur.

Bu testlerin sonuçlarından yola çıkarak,

- Çelik malzemenin yüzey pürüzlülüğünün çelik-kompozit bileşik yapıların iki farklı malzemenin arayüzeyi ayrışma hasarını ve hasar toleransını önemli ölçüde etkileyen bir parametre olduğu,
- Yerel bir üreticiye ait 1 no.'lu ürünün gösterdiği düşük performans göz önüne alınarak uygulanan deneylerden epoksilerin kalitesini ölçmek amacıyla da yararlanılabileceği,

- Malzemelerin arayüzeyinin çekme yüklerine dayanımının (Mode I), kesme yüklerine dayanımından çok daha az olduğu, bu bilginin anılan malzemelerle çalışacak tasarımcılar için önem arz ettiği,
- Katmanlama reçinesindeki performans düşüklüğünün yüzey toleranslı astarlarla ekonomik bir şekilde iyileştirilebileceği, fakat bu konuda durabilite bilgilerine gereksinim duyulduğu,
- Mode I verilerinin işlenmesinde Alan Yöntemi'nin Modifiye Edilmiş Kiriş Kuramı Yöntemi'ne göre daha iyi sonuçlar verdiği,
- Mode I deneylerindeki çatlak ilerlemesinin diğer yüklemelerdeki çatlak ilerlemelerinde olduğu gibi süreklilik arz etmediği,
- Mode I ve tek karşılıklı yapıştırılmalı bağlantı deneylerinin ilgili kompozitlerin performansının değerlendirilmesi için çok uygun oldukları değerlendirmelerine varılmıştır.

Bunlara ek olarak,

- çelik – kompozit birleşimlerinin denizel çevrenin aşındırıcı etkisi altında kırılma davranışlarındaki değişim,
- geminin dalgalar arasında çalışmasından kaynaklanan yorulma yüklerinin bu tür birleşimlerde çatlak oluşumu ve ilerlemesine etkileri,
- kimyasal aşındırıcılar dahil çeşitli raspa türlerinin birleşim performansına etkilerinin niceliksel olarak araştırılması,
- farklı reçine ve elyafların birleşim performansına etkileri konularının araştırılması gerekliliği ilgili literatür ışığında görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Adams, R.D. ve Mallick, V. (1992). A method for the stress analysis of lap joints. *Journal of Adhesion*, 38, s. 199-217.
- Adkins, D.W. ve Byron Pipes, R. (1985). End effects in scarf joints. *Composites Science and Technology*, 22(3), s. 209-221.
- Alif, N., Carlsson, L.A. ve Gillespie, J.W. (Jr.) (1997). Mode I, Mode II, and mixed mode interlaminar fracture of woven fabric carbon/epoxy. *ASTM Special Technical Publications*, 1242, s. 82-106.
- Allman, D.J. (1977). A theory for the elastic stresses in adhesive bonded lap joints. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 30, s. 415-436.
- Alsayed, S.H., Al-Salloum, Y.A. (2000). Almusallam TH. Fiber-reinforced polymer repair materials – some facts. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Civil Engineering 2000*, 138(3), s. 131-134.
- Association Europeene de Constructeurs de Materiel Aerospatial (AECMA) (1995). Carbon fiber reinforced plastics: determination of interlaminar fracture toughness energy in Mode I – G_{IC} (pr EN 6033) and Mode II - G_{IIC} (pr EN 6034). *AECMA Aerospace Series*, Paris.
- ASTM. (2001). *ASTM Standart D 5528-94a Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2002). *ASTM Standart D 790-00 Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM. (2007). *ASTM D5528-01(2007)e3 Standart Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

Azom.com (2010). *E-Glass Fibre*. 25 Mayıs 2010, <http://www.azom.com/article.aspx?Article ID=764>.

Baldan, A. (2004). Adhesively-bonded joints and repair in metallic alloys, polymers and composite materials: Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment. *Journal of Materials Science*, 39(1), s. 1-49.

Barva (a). (2010). *Barva Organic Chemicals MRN*, Barva, İzmir.

Barva (b). (2010). *Barva Organic Chemicals Teknik Bilgi Fişi AC080*, Barva, İzmir.

Bascom, W.D., Bitner, R.J., Moulton, R.J. ve Siebert, A.R. (1980). The interlaminar fracture of organic-matrix woven reinforced composites. *Composites*, 11, s. 9-18.

Belingardi, G., Goglio, L. ve Tarditi, A. (2002). Investigating the effect of spew and chamfer size on the stresses in metal/plastics adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 22(4), s. 273-282.

Berry, J.P. (1963). Determination of fracture energies by the cleavage technique. *Journal of Applied Physics*, 34, s. 62-68.

Blackman, B., Dear, J. P., Kinloch, A. J., ve Osiyemi, S. (1999). The calculation of adhesive fracture energies from double cantilever beam test specimens,” *Journal of Materials Science Letters*, 5/10, s. 253-256.

- Boss, J.N., Ganesh, V.K. ve Lim, C.T. (2003). Modulus grading versus geometrical grading of composite adherends in single-lap bonded joints. *Composite Structures*, 62(1), s. 113-121.
- Boyd, S.W., Blake, J.I.R., Shenoi, R.A. ve Mawella, J. (2008). Optimization of steel-composite connections for structural marine applications. *Composites Part B: Engineering*, 39, s. 891-906.
- Brunner, A.J., Blackman, B.R.K. ve Davies, P. (2008). A status report on delamination resistance testing of polymer-matrix composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 75, s.2779-2794.
- Büyüköztürk, O., Güneş, O. ve Karaca, E. (2004). Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites. *Construction and Building Materials*, 18, s. 9-19.
- Cadei, J.M.C., Stratford, T.J., Hollaway, L.C. ve Duckett, W.G. (2004). *C595 — Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced composites*. CIRIA (The Construction Industry Research And Information Association), London.
- Carlsson, L.A., Gillespie, J.W. (Jr.) ve Pipes, R.B. (1986a). On the analysis and design of the end notched flexure (ENF) specimen for Mode II testing. *Journal of Composite Materials*, 20, s. 594-604.
- Carlsson, L.A., Gillespie, J.W. (Jr.) ve Trethwey, B.R. (1986b). Mode II interlaminar fracture of graphite/epoxy and graphite/PEEK. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 5, s. 170-187.
- Chai, H. (1984). The characterization of Mode I delamination failure in non-woven multidirectional laminates. *Composites*, 4/15, s.277-290.

- Chalmers, D.W. (1994). The potential for the use of composite materials in marine structures. *Marine Structures*, 7(2-5), s. 441-456
- Chamis, C.C. ve Murthy, P.L.N. (1991). Simplified procedures for designing adhesively bonded composite joints. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 10(1), s. 29-41.
- Chatterjee, S.N. (1991). Analysis of test specimens for interlaminar mode II fracture toughness, Part 1 & Part 2, *Journal of Composite Materials*, 25, s. 470-493
- Corleto, C.R. ve Hogan, H.A. (1995). Energy release rate for the ENF specimen using a beam on an elastic foundation', *Journal of Composite Materials*, 29, s.1420-1436.
- Cox, B.N., Massabo, R., Mumm, D.R., Turettini, A. ve Kedward, K.B. (1997). Delamination fracture in the presence of through-thickness reinforcement. *Proceedings of the 11th International Conference on Composite Materials (ICCM-11)*, Scott, M.L., editör, Technomic, Lancaster, s.159-177.
- da Silva, L.F.M. ve Adams, R.D. (2007a). Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(3), s. 216-226.
- da Silva, L.F.M. ve Adams, R.D. (2007b). Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(3), s. 227-235.
- da Silva, L.F.M. ve Adams, R.D. (2007c). Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(5), s. 362-379.
- Dattaguru, B., Everett, R.A., Whitcomb, J.D. ve Johnson, W.S. (1984). Geometrically nonlinear-analysis of adhesively bonded joints. *Journal of*

Engineering Materials and Technology – Transaction of the ASME, 106(1), s. 59-65.

Davis, M. ve Bond, D. (1999). Principles and practice of adhesive bonded structural joints and repair. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 19(3), s. 91-105.

Degarmo, E.P., Black, J.T. ve Kohser, R.A. (2003). *Materials and Process in Manufacturing*. Prentice Hall.

Delale, F., Erdoğan, F. ve Aydınoglu, M.N. (1981). Stresses in adhesively bonded joints – a closed-form solution. *Journal of Composite Materials*, 15, s. 249-271.

Devitt, D.F., Schapery, R.A. ve Bradley, W.L. (1980). A method for determining the Mode I delamination fracture toughness of elastic and viscoelastic composite materials. *Journal of Reinforced Plastic and Composites*, 1, s. 297-330.

Ding, W. (1999). *Delamination Analysis of Composites Laminates*. Toronto Üniversitesi Kimya Mühendisliği ve Uygulamalı Kimya Lisansüstü Bölümü, Doktora Tezi.

Dow, R.S. (1994). Experimental and theoretical response prediction of steel-stiffened glass-reinforced plastic ship deckhouse subject to blast loading. *Marine Structures*, 7(2-5), s. 235-245.

Duratek. (2010 (a)). *GR 4480 Solventli Yüzey Toleranslı Epoksi Astar*, Duratek Epoksi ve Poliüretan Sistemler, İstanbul.

Duratek. (2010 (b)). *KL 674 Epoksi Laminasyon ve Ozmosiz Tedavi Sistemi*, Duratek Epoksi ve Poliüretan Sistemler, İstanbul.

- Erdemir (2010). *İnteraktif Ürün Kataloğu*. 25 Mayıs 2010, http://www.erdemir.com.tr/images/urun_hizmetler/katalog/index.html
- Fitton, M.D. ve Broughton, J.G. (2005). Variable modulus adhesives: an approach to optimized joint performance. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 25(4), s. 329-336.
- Ganesh, V.K. ve Choo, T.S. (2002). Modulus graded composite adherends for single-lap bonded joints. *Journal of Composite Materials*, 36(14), s. 1757-1767.
- Ganesh, V.K., Ramakrishna, S. ve Leck, H.J. (1998). Fiber reinforced composite based functionally gradient materials. *Advanced Composites Letters*, 7, s. 111-115.
- Gibson, F.R. (1994). *Principles of Composite Materials Mechanics*. Singapor: Mc Graw-Hill.
- Gillespie, J.W. (Jr.), Carlsson, L.A. ve Pipes, R.B. (1986). Finite element analysis of the end notched flexure (ENF) specimen for measuring Mode II fracture toughness. *Composites Science and Technology*, 26, s. 177-197.
- Glessner, A.L., Tahemori, M.T., Vallance, M.A. ve Gifford, S.K. (1989). Mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional carbon fibre composites using a novel wedge driven delamination design. *ASTM STP*, 1012, s.181-200.
- Goland, M. ve Reissner, E. (1944) The stresses in cemented lap joints. *Journal of Applied Mechanics – Transaction of the ASME*, 66(11), s. A17-A27.
- Grabovac, I. (2003). Bonded composite solution to ship reinforcement. *Composites: Part A*, 34, s. 847-854.

- Grabovac, I., Whittaker, D. (2009). Application of bonded composites in the repair of ships structures – A 15-year service experience. *Composites: Part A*, doi:10.1016/j.compositesa.2008.11.006.
- Griffith, A. A. (1921). The phenomena of rupture and flow in solids, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A 221, s. 163–198.
- Hart-Smith, L.J. (1973). *Adhesive-bonded single-lap joints*. Douglas Aircraft Co., NASA Langley Report CR 112236.
- Hart-Smith, L.J. (1974). *Analysis and design of advanced composite bonded joints*. Douglas Aircraft Co., NASA Langley Report CR 2218.
- Hashemi, S., Kinloch, A.J. ve Williams, G. (1989). Corrections needed in double cantilever beam tests for assessing the interlaminar failure of fibre-composite, *Journal of Materials Science Letters*, 8, s. 125- 129.
- Hollaway, L.C. ve Cadei, Y. (2002). Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites. *Progress in Structural Engineering*, 4, s.131-148.
- Ikegami, K., Takeshita, T., Matsuo, K. ve Sugibayashi, T. (1990). Strength of adhesively bonded scarf joints between glass fiber-reinforced plastics and metals. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 10(3), s. 199-206.
- Irwin, G. (1957). Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate, *Journal of Applied Mechanics*, 24, s. 361–364.
- Japanese Standards Association (1993). *Japan Industrial Standards, JIS 7086: Testing Methods for Interlaminar Fracture Toughness of Carbon Fiber Reinforced Plastics*, Tokyo.

- Johnson, C.L. (1989). Effect of ply stacking sequence on stress in a scarf joint. *AIAA Journal*, 2, s. 79-86.
- Johnson, W.S. ve Malgalgiri, P.D. (1987). Investigation of fiber bridging in double cantilever beam spacimens. *Journal of Composites Technology and Reserach*, 9, s.10-13.
- Kageyama, K. ve Hojo, M. (1990). Proposed methods for interlaminar fracture toughness tests of composite laminates, *Proceedings of the 5th C.I.S./Japan conference on composite materials*, Tokyo, s.227-234.
- Kageyama, K., Kikuchi, M., Yanagisawa, N. (1991). Stabilized end-notched flexure test: Characterization of Mode II interlaminar crack growth. *ASTM STP*, 1110, s. 210-225.
- Kaman, M.O. (2010). Dokuma cam fiber/epoksi kompozitlerde tabakalar arası kırılma tokluğunun araştırılması, 2. *Ulusal Tasarım, İmalat ve Analiz Kongresi Bildiriler Kitabı*, s.149-159, Balıkesir.
- Kaye, R.H. ve Heller, M. (2002). Through-thickness shape optimization of bonded repairs and lap-joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 22(1), s. 7-21.
- Kim, J.S., Kim, C.G. ve Hong, C.S. (2001). Practical design of tapered composite structures using the manufacturing cost concept. *Composite Structures*, 51(3), s. 285-299.
- Kinlock, A.J. (1987). *Adhesion and Adhesives*. Londra: Chapman and Hall.
- Kolat, K., Neşer, G. ve Özses, Ç. (2006).The effect of sea water exposure on the interfacial fracture of some sandwich systems in marine use. *Composite Structures*, 78, s. 11-17.

- Kta-Tator Inc. (1976). *Keane – Tator Surface Profile Comparator for Shot Blast Cleaned Surfaces*, Pittsburgh.
- Lang, T. ve Mallick, K. (1998). Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 18(3), s. 167-177.
- Lang, T. ve Mallick, K. (1999). The effect of recessing on the stresses in adhesively bonded single-lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 19(4), s. 257-271.
- Le Lan, J.Y., Parneix, P. ve Gueguen, P.L. (1992). Composite material superstructures. *International Conference on Nautical Construction with Composite Materials*, Paris.
- Lewis, E.V. (1988). *Principles of naval architecture*, Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.
- Maheri, M.R. ve Adams, R.D. (2002). Determination of dynamic shear modulus of structural adhesives in thick adherend shear test specimens. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 22(2), s. 119-127.
- Matthews, F.L., Kilty, P.P.F. ve Godwin, E.W. (1982). A review of the strength of joints in fiber-reinforced plastics 2: adhesively bonded joints. *Composites*, 13(1), s. 29-37.
- Mazumdar, S.K. ve Mallick, K. (1998). Static and fatigue behavior of adhesive joints in SMC-SMC composites. *Polymer Composites*, 19(2), s. 139-146.
- Mertz, D.R. ve Gillespie, J.W. (1996). *Rehabilitation of steel bridge members through the application of advanced composites*. Final Report of National

Cooperative Highway Research Program of the Transportation Research Board of National Academies (NCHRP-93-ID001), Washington D.C.

Mertz, D.R., Gillespie, J.W., Chayes, M.J ve Sabol, S.A. (2001). *The rehabilitation of steel bridge girders using advanced composite materials*. IDEA Program Final Report of National Cooperative Highway Research Program of the Transportation Research Board of National Academies (NCHRP-98-ID051), Washington D.C.

Molitor, P., Barron, V. ve Young, T. (2001). Surface treatment of titanium for adhesive bonding to polymer composites: a review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 21(2), s.129-136.

Mortensen, F. ve Thomsen, O.T. (2002). Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach. *Composites Science and Technology*, 62, s. 1011-1031.

Moy, S. (2002). ICE DEsign and Practice Guides-FRP composites life extension and strengthening using FRP: Principles, applications and unresolved issues. *Construction and Building Materials*, 17(6-7), s. 439-446.

Murri, G.B. ve Guyun, F.G. (1988). Analysis of delamination growth from matrix cracks in laminates subjected to bending loads. *ASTM ST*, 972, s.322-339.

Nicholls, D.J. ve Gallagher, J.P. (1983). Determination of G_{IC} in angle-ply composites using a cantilever beam test method. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2, s. 2-17.

Office of Aviation Research. (2001). Effects of surface preparation on long-term durability of composite adhesive bonds, DOT/FAA/AR-01/8, Washington.

Obreimoff, J.W. (1930). The splitting strength of mica. *Proceedings of the Royal Society A*, 127, s. 290-297.

- O'Brien, T. K. (1998). Interlaminar fracture toughness: the long and winding road to standardization. *Composites- Part B: Engineering*, 29B(1), s.57–62.
- O'Brien, T.K. ve Martin, R.H. (1993). Results of ASTM round robin testing for Mode I interlaminar fracture toughness of composite materials. *Journal of Composites Technology and Research*, 15, s. 269-281.
- O'Brien, T.K., Murri, G.B. ve Salpekar, S.A. (1989). Interlaminar shear fracture toughness and fatigue thresholds for composite materials, *ASTM Special Technical Publications*, 1012, s. 222-250.
- Owens, J.F.P. ve Lee-Sullivan, P. (2000). Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminum joints-II: Experimental. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20(1), s. 47-58.
- Özdil, F. Ve Carlsson, L.A. (1992). Mode I interlaminar fracture of interleaved graphite/epoxy. *Journal of Composite Materials*, 26, s.432-459.
- Patrick, R.L. (Ed.) (1976). *Treatise on adhesion and adhesive-structural adhesives with emphasis on aerospace applications*. Vol.4, Marcel Dekker Inc., New York.
- Pendhari, S.S., Kant, T. Ve Desai, Y.M. (2008). Application of polymer composites in civil construction: A general review. *Composite Structures*, 84, s. 114-124.
- Pickett, A.K. ve Hollaway, L. (1985). The analysis of elastic-plastic adhesive stress in bonded lap joints in FRP structures. *Composite Structures*, 4, s.135-160.
- Pipes, R.B. ve Pagano, N.J. (1970). Interlaminar stresses in composite laminates under uniform axial extension. *Journal of Composite Materials*, 4, s. 538-548.

- Rastogi, N., Soni, S.R. ve Nagar, A. (1998). Thermal stresses in aluminium-to-composite double-lap bonded joints. *Advances in Engineering Software*, 29(3-6), s. 273-281.
- Renton, W.J. ve Vinson, J.R. (1975). The efficient design of adhesive bonded joints. *Journal of Adhesion*, s. 175-193.
- Renton, W.J. ve Vinson, J.R. (1977). Analysis of adhesively bonded joints between panels of composite materials. *Journal of Applied Mechanics*, 44, s. 101-106.
- Ripling, E.J., Mostoroy, S. ve Patrick, R.L. (1964). Measuring fracture toughness of adhesive joints. *Materials Reserach and Standarts*, 3/4, s.129-134.
- Rispler, A.R., Tong, L., Steven, G.P. ve Wisnom, M.R. (2000). Shape optimisation of adhesive fillets. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20(3), s. 221-231.
- Robinson, P. Ve Song, D.Q. (1992). A modified DCB specimen for Mode I testing of multidirectional laminates. *Journal of Composite Materials*, 26, s. 1554-1577.
- Russell, A.J. and Street, K.N. (1982). Factors affecting the interlaminar fracture energy of graphite/epoxy laminates. *Progress in Science and Engineering of Composites*, Hayashi, T., Kawata, K. ve Umekawa, S. (editörler), ICCM-IV, ASM International, Tokyo, s. 279-286.
- Russell, A.J. and Street, K.N. (1985). Moisture and temperature effects on the mixed-mode delamination fracture of unidirectional graphite/epoxy, *ASTM Special Technical Publications*, 876, s. 349-370.
- Schwartz, M.M. (1992). *Composite Materials Handbook*. Mc Graw-Hill.

- Sen, R., Liby, L. ve Mullins, G. (2001). Strengthening steel bridge sections using CFRP laminates. *Composites Part – B*, 24, s. 309 – 322.
- Shaat, A., Schnerch, D., Fam, A. ve Rizkalla, S. (2004). Retrofit of steel structures using fiber reinforced polymers (FRP): State-of-the-art. Transportation Research Board (TRB) of National Academies 83. Annual Meeting, Washington DC.
- Shenoi, R.A., Read, P. ve Jackson, C.L. (1998). Influence of joint geometry and load regimes on sandwich tee joint behaviour. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 17(8), s. 725-740.
- Shi, Y.B., Hull, D. ve Price, J.N. (1993). Mode II fracture of $+0/-0$ angled laminate interfaces, *Composites Science and Technology*, 26, s.173-184.
- Smith, C.S., Murphy, P. (1986). Design of ship superstructures in fibrereinforced plastics. *Transactions of Royal Institute of Naval Architects*, 129, s. 45-62.
- Smith, C.S., Murphy, P. (1991) Response of hybrid GRP/steel superstructures to blast loading – theory and experiment. *Advances in marine structures – 2*, Dunfermline, Willey, s. 392-415.
- Society of Manufacturing Engineers (SME). (1989). *Fundamentals of Composite Manufacturing: Materials, methods, and Applications*. SME Development Reference Publication Division, Dearborn, Michigan
- Srinivas, S. (1975). *Analysis of bonded joints*. NASA TN D-7855.
- Suo, Z., Bao, G. ve Fan, B. (1992). Delamination R-curve phenomena due to damage, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 40, s. 1-16.

- Tavakkolizadeh, M., Saadatmanesh, H. (2002). Fatigue strength of steel girders strengthened with carbon fiber reinforced polymer patch. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 129(2), s. 186-196.
- Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., Lam, L. (2002). *FRP-strengthened RC structures*, West Sussex (UK): John Wiley and Sons Ltd.
- Toftgaard, H. ve Lystrup, A. (2005). Design and test of lightweight sandwich T-joint for naval ships. *Composite Part A – Applied Science and Manufacturing*, 36(8), s. 1055-1065.
- Tong, L. (1997). An assessment of failure criteria to predict the strength of adhesively bonded composite double lap joints. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 16(8), s. 698-713.
- TSE (1999). *TS EN ISO 8501-1 Çelik Yüzeylerin Hazırlanması-Boya ve İlgili Malzemelerin Uygulanmasından Önce-Yüzey Temizliğinin Gözle Muayenesi Bölüm 1: Kaplanmamış Çelik Alt Yüzeylerin Önceki Kaplamanın Tamamen Kaldırılmasından Sonraki Pas ve Hazırlanma Dereceleri*, Ankara.
- Türk Loydu, (2008). *Türk Loydu Kuralları, Cilt A, Kısım – 2 : Malzeme Kuralları*, Türk Loydu Vakfı Yayınları, İstanbul
- Volkersen, O. (1938). Die Niekraftverteilung in Zugbeanspruchten mit Konstanten Laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung*, 15, s. 41-68.
- Vu-Khanh, T. (1987). Crack-arrest study in Mode II delamination of composites. *Polymer Composites*, 5/8, s.331-341.
- Wang, C.H., Heller, M. ve Rose, L.R.F. (1998). Substrate stress concentrations in bonded lap joints. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 33(5), s. 331-346.

- Wang, Y. ve Williams, J.G., (1992). 'Corrections for mode II fracture toughness specimens of composite materials' , *Composite Science and Technology*, 43, s.251-256.
- Whitney, J.M. (1988). Analysis of the end notch flexure specimen using a higher order beam theory based on Reissner's principle. *Proceedings of American Society for Composites, 3rd Technical Conference*, Lancaster, Pennsylvania
- Whitney, J.M. (1989). Experimental characterization of delamination fracture. *Interlaminar Response of Composite Materials*. Pagano, N.J. (editör). Elsevier, Amsterdam, s. 180-184.
- Whitney, J. M., ve Browning, C. E. (1982). A double cantilever beam test for characterizing Mode I delamination of composite materials. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1, s. 297-313
- Whitney, L.M., Gillespie, J.W. (Jr) ve Carlsson, L.A. (1987). Singularity approach to the end notched flexure specimen', *Proceedings of the Second Conference on Composite Materials*, Lancaster, Pennsylvania
- Wilkins, D.J., Eisenmann, J.R., Camin, R.A., Margolis, W.S. ve Benson, R.A. (1982). Characterizing delamination growth in graphite-epoxy. *ASTM Special Technical Publications*, 775, s. 168-183.
- Wu, Z.J., Romeijn, A. Ve Wardenier, J. (1997). Stress expressions of single-lap adhesive joints of dissimilar adherends. *Composite Structures*, 38(1-4), s. 273-280.
- Yang, C., Huang, H., Tomblin, J.S. ve Sun, W. (2004). Elastic-plastic model of adhesive-bonded single-lap composite joints. *Journal of Composite Materials*, 38(4), s. 293-309.

- Yang, C. ve Pang, S.S. (1993). Stress-strain analysis of single-lap composite joints under cylindrical bending. *Composite Engineering*, 3, s.1051-1063
- Yang, C.. ve Pang, S.S. (1996). Stress-strain analysis of single-lap composite joints under tension. *Journal of Engineering Materials and Technology – Transaction of the ASME*, 118, s. 247-255.
- Zeng, Q. ve Sun, C.T. (2001). Novel design of bonded lap joint. *AIAA Journal*, 39, s.1991-1996.
- Zhang, J., Bednarczyk, B.A., Collier, C., Yarrington, P., Bansal, Y. ve Pindera, M.J. (2006). Analysis tool for adhesively bonded composite joints, part 2: unified analytical theory. *AIAA Journal*, 44(8), s. 1709-1719.
- Zou, G.P., Shanin, K. ve Taheri, F. (2004). An analytical solution for the analysis of symmetric composite adhesively bonded joints. *Composite Structures*, 65(3-4), s. 499-510.