

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EL YATIRMA VE VAKUM İNFÜZYON
YÖNTEMLERİ İLE ÜRETİLMİŞ SANDVIÇ
KOMPOZİTLERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ, ÇEKME VE
KAYMA MODLARINDA AÇIĞA ÇIKAN
ENERJİNİN HESAPLANMASI**

Salih Bilal ÇETİNKAL

Nisan, 2019

İZMİR

**EL YATIRMA VE VAKUM İNFÜZYON
YÖNTEMLERİ İLE ÜRETİLMİŞ SANDVIÇ
KOMPOZİTLERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ, ÇEKME VE
KAYMA MODLARINDA AÇIĞA ÇIKAN
ENERJİNİN HESAPLANMASI**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı

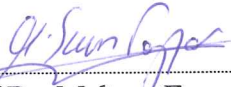
Salih Bilal ÇETİNKAL

Nisan, 2019

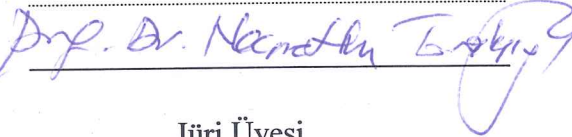
İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

SALİH BİLAL ÇETİNKAL, tarafından **PROF.DR. MELTEM EVREN TOYGAR** yönetiminde hazırlanan “ **EL YATIRMA VE VAKUM İNFÜZYON YÖNTEMLERİ İLE ÜRETİLMİŞ SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ, ÇEKME VE KAYMA MODLARINDA AÇIĞA ÇIKAN ENERJİNİN HESAPLANMASI** ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Prof.Dr. Meltem Evren TOYGAR

Yönetici


Prof. Dr. Necmettin Ertok

Jüri Üyesi


Prof. Dr. Ramazan KARAKUŞ

Jüri Üyesi


Prof.Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum tez danışmanım Prof. Dr. Meltem Evren TOYGAR, sürekli rehberliği, cömert desteği ve değerli tavsiyelerinin yanı sıra destekleri için içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bu çalışma ailem ve arkadaşlarımdan sabrı ve sonsuz desteği olmadan mümkün olmazdı. Özellikle değerli annem, babam ve kardeşime manevi destekleri için teşekkür ederim.

Laboratuvarlarını kullanma imkânı sağlayan Selçuk üniversitesi Teknoloji Fakültesine ve imalatta destek olan İzoreel firmasına teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Bu tez çalışması süresince bana sürekli destek ve sevgisini veren biricik eşime teşekkür ederim.

Salih Bilal ÇETİNKAL

EL YATIRMA VE VAKUM İNFÜZYON YÖNTEMLERİ İLE ÜRETİLMİŞ SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ, ÇEKME VE KAYMA MODLARINDA AÇIĞA ÇIKAN ENERJİNİN HESAPLANMASI

ÖZ

Dünyada yaygın olarak kullanılmakta olan kompozit malzemeler gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Savunma sanayi, denizcilik sanayi, havacılık sanayi vb. birçok sanayide boy göstermekte olan kompozit malzemelerden sandviç kompozitler incelenmiştir. Sandviç kompozitleri tercih etmemizdeki sebeplerin başında ülkemizin etrafının denilerle çevrili olmasından dolayı gelişen denizcilik ve yat sektörü gelmektedir.

Denizcilik ve yat imalatında kullanılan kompozit malzemeler sandviç yapısı şeklindedir. Merkezde çekirdek ve onun etrafını saran dış katmanlardan oluşmaktadır. Ayrıca yat imalatında el yatırma ve vakum infüzyon yöntemi tercih edilmektedir.

El yatırma ve vakum infüzyon yolu ile üretilen sandviç kompozit malzemeler, yat sektörüne uygun şartlarda(dış katman iç katmandan daha katlı, en dışlarda yük dağıtan kırılmış elyafların olduğu vb.) imal edildikten sonra kürleme işlemi ile mekanik değerleri arttırılmıştır.

İmal edilen numunelerin mekanik değerlerinin hesaplanması için, basma deneyi, çekme deneyi, yan basma deneyi, SCB deneyi ve MCSB deneyi uygulanmıştır. yapılan bu deneylerin sonucunda vakum infüzyon ile üretilen numunenin el yatırma ile üretilen numuneye göre 1,5-2 kat daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Mod I ve Mod II gerilmelerinin incelenmesinde aynı boylardaki numuneler üzerindeki ilk çatlakların boyları uzadıkça kırılmanın gerçekleşmesi için ihtiyaç duydukları enerji artmaktadır. Bu artış vakum infüzyon ile yapılan numune de yüzde 200-250 arası bir artış olurken el yatırmada yüzde 140-220 arası bir artış olmaktadır.

Anahtar kelimeler: Kırılma mekaniği, sandviç, vakum infüzyon, el yatırma, SCB, MCSB

**THE DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF
SANDWICH COMPOSITES MANUFACTURED BY HAND-LAY UP AND
VACUUM INFUSION METHODS AND STRAIN ENERGY RELEASE RATE
HAS BEEN TAKEN INTO ACCOUNT FOR TENSION AND SHEAR MODE**

ABSTRACT

Composite materials widely used in the world are getting more and more important day by day. Sandwich composites have been studied from composite materials, which are widely using in defense industry, marine industry, aviation industry, etc. At the beginning of the reasons we prefer sandwich composites are maritime and yacht sector which is developed due to being surrounded by the sea around our country.

Composite materials used in marine and yacht manufacturing are sandwich construction. It consists of a nucleus and skins surrounding nucleus. In addition, hand lay-up and vacuum infusion methods are preferred in yacht manufacturing.

Sandwich composite materials produced by hand lay-up and vacuum infusion are manufactured according to suitable conditions for the yacht industry (outer skin is more layered than inner skin, by using chopped strand to outermost for distribute the load etc.), then mechanical values are increased by using curing process.

For the calculation of the mechanical values of the manufactured samples, compression test, tensile test, side compression test, SCB test and MCSB test were applied. As a result of these experiments, it was seen that the sample produced by using vacuum infusion method was 1.5-2 times more resistant than the sample produced by using hand lay-up method. Examining Mode 1 and Mode 2 stresses, the energy needed to fracture the first cracks on the same longitudinal samples increases as the length of the first cracks increases. This increase is increase of 200-250 percent in the sample made by using vacuum infusion method and increase of 140-220 percent in the sample made by using hand lay-up method.

Keywords: Fracture mechanic, sandwich, vacuum infusion, hand lay-up, SCB, MCSB

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xiii

BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1

1.1 Genel	1
1.2 Kompozit Yapılar	4
1.1.1 Sandviç Kompozitler	5
1.2 Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri.....	7
1.2.1 Elle Yatırma (Hand Lay-up).....	7
1.2.2 Püskürtme (Spray-Up).....	8
1.2.3 Elyaf Sarma (Filament Winding).....	8
1.2.4 Reçine Transfer Kalıplama RTM / Reçine Enjeksiyonu	9
1.2.5 Vakum İnfüzyon	10
1.2.6 Profil Çekme / Pultrüzyon (Pultrusion)	10
1.2.7 Enjeksiyon Kalıplama (Injection moulding)	11

BÖLÜM İKİ - MALZEME VE ÜRETİM..... 12

2.1 Malzeme seçimi.....	12
2.2 Vakum İnfüzyon ve El Yatırma İle Üretim.....	14
2.2.1 Vakum İnfüzyon	15
2.2.1.1 Adım Adım Vakum İnfüzyon Yöntemi	15
2.2.1.2 Vakum İnfüzyon Yönteminde Dikkat Edilecek Hususlar	21
2.2.2 El Yatırma Yöntemi.....	22
2.2.2.1 Adım Adım El Yatırma Yöntemi.....	22

2.2.2.2 El Yatırma Yönteminde Dikkat Edilecek Hususlar	25
BÖLÜM ÜÇ - KIRILMA MEKANİĞİ	27
3.1 Kırılma Mekanîği	27
3.1.1 Klivaj Kırılma.....	28
3.1.2 Kayma Kırılması.....	30
3.2 Kırılma Mekanîği Çeşitleri.....	31
3.2.1 Lineer Elastik Kırılma Mekanîği	31
3.2.1.1 Griffith Teorisi	32
3.2.1.2 Irwin Teorisi.....	35
3.2.2 Elastik Plastik Kırılma Mekanîği (EPKM).....	36
3.2.3 Kırılma Modelleri	37
3.2.3.1 Çatlak açılma deformasyon tipi (Mod I).....	37
3.2.3.2 Çatlak Kayma Deformasyon Tipi (Mod II)	38
3.2.3.3 Çatlak Yırtılma Deformasyon Tipi (Mod III).....	38
BÖLÜM DÖRT - METOD VE METODOLOJİ	39
4.1 İmalat metotları	39
4.2 Mekanik Testler Metotları.....	41
4.2.1 Çekme deneyi	41
4.2.2 Basma deneyi.....	44
4.3 Tabakalar Arası Kırılma Tokluğu Metodları.....	45
4.3.1 Mod I Kırılma Mekanîği Test Yöntemleri	47
4.3.1.1 Çift Konsol Kiriş Testi Yöntemi (DCB)	48
4.3.1.2 Modifiyeli Çift Konsol Kiriş Testi Yöntemi(MDCB)	50
4.3.1.3 Üç Nokta Eğme Deney Yöntemi (TPF).....	50
4.3.1.4 Tek Kenar Çatlaklı Kiriş Testi Yöntemi(SCB).....	51
4.3.2 Mod II Kırılma Mekanîği Test Yöntemleri	59
4.3.2.1 Üç Nokta Eğme Deney Yöntemi (3ENF):	60
4.3.2.2 Dört Nokta Eğme Deney Yöntemi (4ENF):	61
4.3.2.3 Geliştirilmiş, Çatlaklı Sandviç Kiriş Testi Yöntemi(MCSB):	62

BÖLÜM BEŞ - SONUÇLAR 68

5.1 İmalat Yöntemleri.....	68
5.2 Testler.....	69
5.2.1 Basma Deneyi.....	69
5.2.2 Çekme Deneyi	69
5.2.3 MCSB	69
5.2.4 SCB.....	74

KAYNAKLAR 80

EKLER..... 85

EK 1:MCSB testi sonuçlarının 150 mm boyundaki numunelerin farklı çatlak boylarındaki kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	85
EK 2:MCSB testi sonuçlarının 200 mm boyundaki numunelerin farklı çatlak boylarındaki kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	86
EK 3:MCSB testi sonuçlarının 250 mm boyundaki numunelerin farklı çatlak boylarındaki kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	87
EK 4:MCSB testi sonuçlarının 30 mm çatlak boyuna sahip farklı boylardaki numunelerinin kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	88
EK 5:MCSB testi sonuçlarının 50 mm çatlak boyuna sahip farklı boylardaki numunelerinin kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	89
EK 6:MCSB testi sonuçlarının 70 mm çatlak boyuna sahip farklı boylardaki numunelerinin kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	90
EK 7:SCB testi sonuçlarının 150 mm boyundaki numunelerin farklı çatlak boylarındaki kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	91
EK 8:SCB testi sonuçlarının 200 mm boyundaki numunelerin farklı çatlak boylarındaki kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	92
EK 9:SCB testi sonuçlarının 250 mm boyundaki numunelerin farklı çatlak boylarındaki kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	93
EK 10:SCB testi sonuçlarının 30 mm çatlak boyuna sahip farklı boylardaki numunelerinin kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	94

EK 11:SCB testi sonuçlarının 50 mm çatlak boyuna sahip farklı boylardaki numunelerinin kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	94
---	----



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Sandviç malzemenin şematik gösterimi	5
Şekil 1.2 El yatırma yönteminin şematik gösterimi	7
Şekil 1.3 Püskürtme yönteminde kullanılan püskürtme tabancası	8
Şekil 1.4 Filament sarma makinası	9
Şekil 1.5 Reçine transfer kalıplama şematik gösterimi.....	9
Şekil 1.6 Vakum infüzyon şematik gösterimi	10
Şekil 1.7 Enjeksiyon kalıplama makinası	11
Şekil 2.1 Vakum infüzyon üretim aşaması kırmızı teflon ile alt yüzey	16
Şekil 2.2 Vakum spiral hortum ve kumaş katmanların görünümü	16
Şekil 2.3 Vakum infüzyonla üretim yöntemi - fileli kumaş.....	17
Şekil 2.4 Vakum infüzyonla üretim yöntemi - vakum öncesi	18
Şekil 2.5 Vakumlanmış numune	19
Şekil 2.6 Vakum infüzyonla üretim yöntemi - epoxy besleme.....	19
Şekil 2.7 Kırılma fırını	21
Şekil 2.8 El yatırma üretim yöntemi - kalıp ayırıcı	23
Şekil 2.9 El yatırma üretim yöntemi - epoxy sürme işlemi.....	24
Şekil 2.10 El yatırma üretim yöntemi-epoxyli katman üzerine yeni kumaşın yatırılması işlemi	25
Şekil 3.1 Kırılma mekaniği	27
Şekil 3.2 Kırılma Çeşitleri Şablonu	28
Şekil 3.3 a) Klivaj kırılma b)Kristal yüzey görünümü.....	29
Şekil 3.4 a)Sünek kırılma b) Lifli kırılma.....	30
Şekil 3.5 Merkezi çatlak içeren bir malzemedeki şematik çatlak görünümü.....	32
Şekil 3.6 Mod I şematik gösterimi	37
Şekil 3.7 Mod II şematik gösterimi.....	38
Şekil 3.8 Mod III şematik gösterimi	38
Şekil 4.1 Testler için kesim planı hazırlanmış olan taslak	40
Şekil 4.2 Çekme testi esnasında numunede meydana gelen değişimin şematik gösterimi	41
Şekil 4.3 Çekme cihazı ve numune	42

Şekil 4.4 Çekme testi sonrası numuneler	43
Şekil 4.5 Basma Deneyi ve Shimadzu test cihazı	44
Şekil 4.6 Basma deney numuneleri test öncesi ve sonrası	45
Şekil 4.7 Mod-I ve Mod-II yüklemelerinin şematik gösterimi ve örnekleri.....	46
Şekil 4.8 Çatlaklı sandviç kiriş testi ve çatlak ucunun yakınındaki gerilme durumu	47
Şekil 4.9 Çift konsol kiriş testi(DCB) konfigürasyonu.....	48
Şekil 4.10 Çift konsol kiriş testinin (DCB) sandviç kompozit numune ile geleneksel numune konfigürasyonun gösterimi	49
Şekil 4.11 Modifiyeli çift konsol kiriş testi (MDCB)	50
Şekil 4.12 Üç nokta eğme yöntemi (TPF) a)Üç nokta eğme aparatı b)Üç nokta şematik gösterimi	50
Şekil 4.13 Tek kenar çatlaklı kiriş testi (SCB).....	51
Şekil 4.14 SCB testi için imal edilen aparatın solid çizimi.....	53
Şekil 4.15 SCB testi için imal edilen aparat ve test düzeneği.....	53
Şekil 4.16 SCB testi çatlak ilerlemesinin görünümü	55
Şekil 4.17 Moment etkisi ile çatlak ucu çevresi.....	55
Şekil 4.18 Sandviç kompozit şematik görünümü epoxy-cam elyaf (1) PVC köpük (2)	58
Şekil 4.19 Üç nokta eğme deneyi düzeneği (3ENF).....	60
Şekil 4.20 Dört nokta eğme deney düzeneği (4ENF)	61
Şekil 4.21 Üç nokta eğme deneyi ile dört nokta eğme deneyi kuvvet dağılımı.....	62
Şekil 4.22 Geliştirilmiş, çatlaklı sandviç kiriş testi yöntemi (MCSB).....	62
Şekil 4.23 Solidworks ortamında MCSB test aparatı için 3ENF test aparatına yapılan revize tasarımı.....	63
Şekil 4.24 MCSB test aparatına numune bağlantı şekli.....	64
Şekil 4.25 MCSB testinde numuneye uygulanan kuvvet etkisiyle oluşan eğilme.....	65
Şekil 4.26 MCSB testinin sonucundaki çatlak ilerleyişi.....	65
Şekil 5.1 Farklı ön çatlak boyuna sahip 150mm uzunluğundaki MCSB test numunelerinin Mod II yüklemesi esnasında açığa çıkan enerji miktarı değişimi	70

Şekil 5.2 Farklı ön çatlak boyuna sahip 200mm uzunluğundaki MCSB test numunelerinin Mod II yüklemesi esnasında açığa çıkan enerji miktarı değişimi	71
Şekil 5.3 Farklı ön çatlak boyuna sahip 250mm uzunluğundaki MCSB test numunelerinin Mod II yüklemesi esnasında açığa çıkan enerji miktarı değişimi	72
Şekil 5.4 30mm’lik Ön çatlak boyuna sahip olan MCSB testi numunesinin uzunluğa bağlı Mod II yüklemesinde açığa çıkan enerji miktarı değişimi	73
Şekil 5.5 50mm’lik Ön çatlak boyuna sahip olan MCSB testi numunesinin uzunluğa bağlı Mod II yüklemesinde açığa çıkan enerji miktarı değişimi	73
Şekil 5.6 Farklı ön çatlak boyuna sahip 150mm uzunluğundaki SCB test numunelerinin Mod II yüklemesi esnasında açığa çıkan enerji miktarı değişimi	75
Şekil 5.7 Farklı ön çatlak boyuna sahip 200mm uzunluğundaki SCB test numunelerinin Mod II yüklemesi esnasında açığa çıkan enerji miktarı değişim	76
Şekil 5.8 Farklı ön çatlak boyuna sahip 250mm uzunluğundaki SCB test numunelerinin Mod II yüklemesi esnasında açığa çıkan enerji miktarı değişim	77
Şekil 5.9 30mm’lik Ön çatlak boyuna sahip olan SCB testi numunesinin uzunluğa bağlı Mod II yüklemesinde açığa çıkan enerji miktarı değişimi	78
Şekil 5.10 50mm’lik Ön çatlak boyuna sahip olan SCB testi numunesinin uzunluğa bağlı Mod II yüklemesinde açığa çıkan enerji miktarı değişimi	78

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 PVC köpük teknik özellikleri	13
Tablo 2.2 Cam elyaf örgülü kumaş teknik özellikleri.....	13
Tablo 2.3 Numune katman yapıları.....	14
Tablo 2.4 Reçine ve sertleştirici teknik özellikleri	14
Tablo 2.5 Numunenin üretimin de kullanılan reçine ve sertleştiricinin kürlendirme teknik özellikleri	20
Tablo 4.1 El yatırma ve vakum infüzyon yöntemi ile üretim yapılırken dikkat edilen şartlar	39

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Genel

Günümüzde malzeme alanındaki çalışmalar ve ilerlemeler teknolojik gelişmenin temelini oluşturmaktadır. Malzeme bilimi üzerine çalışmalar yapan meteoroloji malzeme mühendisliği artık kendi içerisinde alt branşlara bölünmeye başlamış. Metaller, ametaller, organikler, kompozitler, polimer vb. olmak üzere birçok branştan oluşmaktadırlar. Bu branşlar içerisinde kompozitin yeri oldukça önemlidir.

Kompozit malzeme yapay bir malzeme olup iki ya da daha fazla malzemenin birleşmesinden meydana gelir. kompoziti oluşturan temel birleşenler takviye malzemeler ve bunlarla bağlantı kurabilen matriksten oluşmaktadır. İstenilen özellikleri sağlamak için için matriksin içerisine birden fazla malzeme katılabilir. Örneğin cam elyaf ile takviye edilmiş kompozitler mukavemet değeri cam elyafa yakın olup kimyasal direnci ise içindeki plastiğinkine yakındır.

Endüstriyel alanda Fenolhormaldehit reçine 1899’ da bulunmuş olup 1907 ‘e ilk fenolik plastik kompozit kalıplanmıştır. Sentetik olan bu reçinenin bulunmasıyla kompozitler endüstriyel alanda kullanılmaya başlanmıştır (Lubin, 1982). Sırasıyla 1935’te Owens-Corning Fiberglass Corporation tarafından cam elyaf, 1936’da C.Ellis tarafından Polyester reçine imal edilmiştir. Bu gelişmelerden birkaç yıl sonra P. Caston tarafından bulunan eposksi reçineyi ile birlikte 1938’de cam elyaf takvyeli kompozitler yaygınlaşmıştır.

Endüstriyel alanda bu kadar hızlı yaygınlaşmasında kompozit malzemelerin başlıca özellikleri olan hafifliği, korozyon direnci, yorulma ömrünün uzun olması gelmektedir. Kompozit kullanılan Ana yapıların içerisinde diğer önemli bir avantajda anizotropik olmasıdır. Bu sayede ayarlanabilir katmanların dayanımına sahiptir (Balıkoğlu ve Arslan, 2013).

Kompozit malzemelerdeki gelişmelerin sonucunda kullanıldığı sektörlerde çoğalmaktadır. Günümüzde kompozitler otomotiv, havacılık, denizcilik, savunma sanayi iş ekipmanları, ev aletleri, gıda sektörü, korozyona dayanımlı ürünler ve insan sağlığı açısından önemli olan protezler gibi birçok alanda kullanımı artmaktadır (Koruvatan ve diğer., 2009; Yurttaş ve Fşar, 2000).

Endüstriyel bazı sektörlerde kompozit imalatı hızlı bir giriş yapmasına rağmen günümüzde sınırlı kalmıştır. Örneğin otomotiv sektöründe ilk olarak 1953 yılında General Motor'un üretmiş Chevrolet Corvette aracında kompozit gövde kullanılmıştır. İlk uygulamadan günümüze kadar gelindiğinde hala otomotiv sektöründeki kompozit kullanımları sınırlıdır. Bunda istenilen yüzey kalitesinin sağlanmasındaki zorluk, uzun parça üretim süreleri ve yüksek malzeme maliyetleri etkili olmuştur (Mangino, 2004).

Günümüzde ülkemizin üç tarafının denizlerle çevrili olmasının sektörel avantajından dolayı denizcilik ve yat sektörlerin de kompozit kullanılması yaygınlaşmıştır. Dünya genelinde teknelerin gövde ve güvertelerin de özellikle cam takviyeli polimer(CTP) kompozitler kullanılmaktadır. Dünya üzerinde tekneler de CTP kullanılmasıdaki şüpheyi 1969 yılında yapılan ilk CTP yat olan Apogee'nin dünyanın çevresini dolaşmasıyla ortadan kalkmıştır (Spur, 1999). yat ve tekne imalatında tercih edilmelerindeki başlıca sebepler hafif olmaları korozyona karşı dirençli olmaları, yorulma ömürleri, bakım ve onarım masraflarının düşük olmaları, kolay ve esnek tek parça(monocoque) olarak imal edilebilir olmaları ve estetik görünimleri şeklinde sıralanabilir (Miracle ve Donaldson, 2001; Gorev ve Rivkind, 2010).

Yat ve tekne imalatında 3 farklı tasarım kullanılmaktadır. Tek parça(monoque), sandviç kompozit ve yatay ve düşey takviyeli dış kaplama(framed sigle-skin) sahip olabilirler (Mouritz ve diğer., 2001). Çekirdek malzemesi olarak kullanılan köpüklerde iyi ısı ve ses yalıtımına sahiplerdir. Tekne imalatında çekirdek malzemesi olarak doğru ve çapraz bağlantılı PVC, balsa ve dokunmamış hacimli coremat (non-women) tercih edilmektedir (Karlsson ve Astrom, 1997).

Kullanılan kompozit malzemelerden, günümüzde en yaygın olan takviye malzemesi cam elyafıdır. Cam Elyaf Takviyeli Plastik'lerin (CTP) kullanıldığı imalatlarda tercih edilen başlıca üretim yöntemleri olarak vakum infüzyon, el yatırması gelmektedir (Poliya, 2012). Bazı kaynaklarda bu imalat yöntemlerine ilave olarak vakumlama yöntemi dâhil olmuştur (Yurddaş ve Afşar, 2000).

Bu çalışmada yat ve tekne imalatında üretim yöntemlerinden yaygın olarak tercih edilen el yatırma ve vakum infüzyon yöntemlerini üzerinde durulacaktır. Elle yatırma yöntemi ile vakum infüzyon yöntemi arasında bir karşılaştırma yapıldığında, vakum infüzyon yönteminde hava ile üretim arasındaki iletişim kesildiği için küreşme esnasında styrene buharının emisyonunu azalmaktadır. Ayrıca yapıda bulunan fazla reçinenin çıkmasına izin verilmektedir. Artan fiber oranı sayesinde dayanımı daha yüksek tekne gövdesi yapılmasına imkân verilmektedir (Balıkoğlu ve diğer, 2012).

Farklı üretim yöntemleri ile imalatı yapılan malzemelerin karşılaştırılmasının sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için malzemelerden alınan numunelerin hem mekanik değerlerinin hem de enerji değerleri olan Mod-I ve Mod-II değerleri incelenmelidir.

Gerilme enerjisinin serbest kalma oranlarının hesaplanmasından birçok yöntem kullanılmıştır. Kompozit yapıların tabakaları arasındaki ayrılma olarak tanımlanan delaminasyondaki büyümenin gerilme enerjisinin serbest kalma oranlarını birçok yöntem yardımıyla hesaplanması sağlanmıştır. Honeycomb ve PVC köpüklü sandviç yapılarda Mod-I yüklemesinde açığa çıkan gerilim enerjisi miktarını çift konsol kiriş (DCB) kullanılarak hesaplanmıştır. Analitik modeller, delaminasyon ve yapay olarak oluşturulmuş ön çatlaklar göz önüne alınarak oluşturulmuş olan numuneler teste tabi tutulmuştur. Analitik sonuçlar ile sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan karşılaştırma sonucunda numune için uygun analitik denklemlere ulaşılabilir (Pradeep, Rao, Srinivasan ve Balasubramaniam, 2012; Pan, Wu, Sun ve Zhou, 2008; Toygar ve Maleki, 2018). DCB yönteminin yanı sıra Mod I yüklemesinin incelendiği diğer önemli bir yöntemde tek kenar çatlaklı kiriş testi (SCB) testidir. Alt yüzeyi sabitlenmiş sandviç kompozitin üst yüzeyinden çekilerek yapılan test yöntemi olan SCB'nin modifiye edilmiş halidir ve ayrıntılı deneysel ve sayısal araştırmalara dayanarak Mod

I için uygun bir metottur (Li ve Carlsson, 1999, 2000, 2001; Viana ve Carlsson, 2002, 2003).

Mod-II yüklemesi için genellikle üç nokta eğme (3ENF) tercih edilmektedir. Ancak sandviç kompozitler de Son Çentikli Kesme (ENS) testi geliştirilmiştir. Son araştırmalar, farklı sandviç konfigürasyonlarındaki kararlı çatlak büyümesi izlemeye odaklanmıştır. Test sırasında çatlak büyüme stabilitesinin, test esnasındaki deplasman uzunluğunun, numune hazırlanırken oluşturulan başlangıç çatlak uzunluğuna bağlıdır (Adams, Nelson, Bluth ve Hansen, 2011).

1.2 Kompozit Yapılar

Kompozit malzeme genel olarak tanımlanacak olursa, hem fiziksel hem de kimyasal özellikleri farklı olan iki veya daha fazla maddenin bir araya getirilmesi ile oluşan malzemedir. Bir araya getirilen ürünlerden daha üst düzey değerlere sahip olan bir malzemedir.

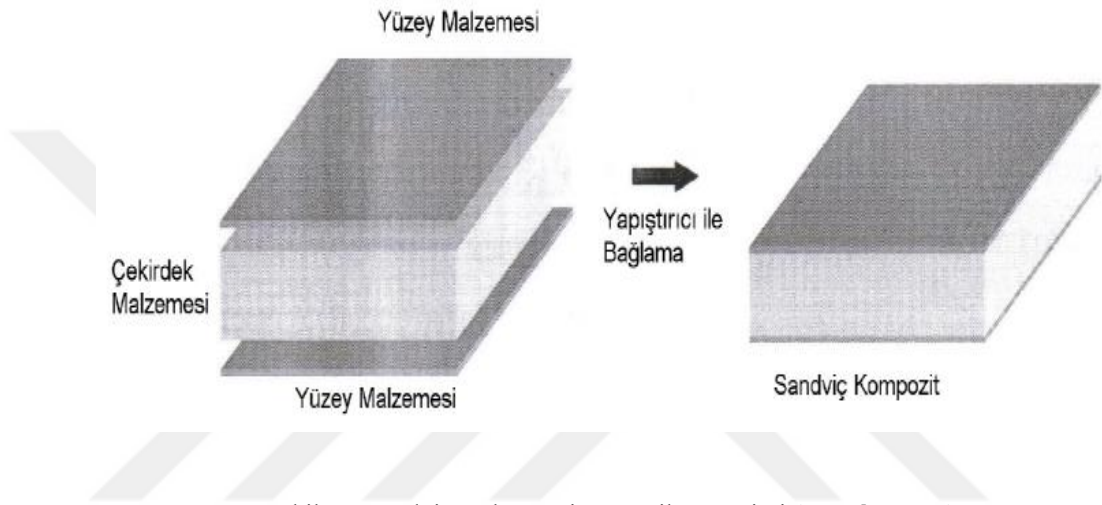
Kompozit malzemelerin metal malzemelere oranla daha fazla tercih edilmesinin sebeplerinin başında metalden ağırlık olarak %25'lere ulaşan hafiflik gelir. Bunun dışında düşük maliyet, kolay imal edilebilirlik, çok iyi kimyasal ve fiziksel özellikler gelir (Corigliano, Rizzi ve Enrico, 2000).

Kompozit malzemelerin kullanım alanları günümüzde gittikçe yaygınlaşmaktadır. Başlıcaları şu şekildedir:

- Havacılık Sektörü (Uçak ve roket imalatı)
- Otomotiv sektörü (Şasi imalatı)
- Denizcilik sektörü (Yat imalatı)

1.1.1 Sandviç Kompozitler

Sandviç malzemeler gelişen kompozit teknolojisinin en önemli uygulamalarıdır. Kompozit malzemeler birden çok malzemenin hedeflenen amaçlar doğrultusunda birleştirilmesiyle oluşan yapılardır. Sandviç malzemelerde farklı yapılar istenilen mekanik özelliklere ulaşmak için Şekil 1.1’de gösterildiği gibi birbiri içinde çözünmeden birleştirilmesi ile oluşur.



Sandviç kompozit malzemelerin tasarımında dış yüzeylerin yapısını mukavemet değerleri belirlerken, ara kısımda kalan çekirdeğin yapısını hafiflik ve burkulmada istenilen değerler belirler. Sandviç kompozit malzemelerin temel yapıtaşları ve çeşitleri:

1) Üst ve alt yüzeyler: Sandviç kompozitlerin dış yüzeyleri cam elyaf, aramid elyaf, karbon elyaf vb. malzemelerden oluşturabilmektedir. Bu tez kapsamındaki çalışmamızda üst ve alt yüzeyler olarak cam elyaf örgülü kumaş tercih edilmiştir.

2) Yapıştırma yüzeyleri: hem dış katmanları kendi aralarında, hem de çekirdek ile dış katmanın yapıştırılmasını sağlayan yapıştırıcı maddeler kullanılır. Epoxy, vinilester, polyester gibi maddeler bu yapıştırıcılar örnek olarak verilebilir. Çalışmamızda yapıştırıcı olarak epoxy tercih edilmiştir.

3) Çekirdek: Sandviç kompozit yapılarının merkezini oluşturan materyallere denir. PVC köpük, balsa, tahta, bal peteği vb. maddeler kullanım yerine göre tercih edilmektedir. Bu çalışmada çekirdek maddesi olarak PVC köpük tercih edilmiştir.

Yapıtaşlarındaki çeşitlilikler yapılabilecek kombinasyonları da bir o kadar arttırmaktadır. Bu sayede tercih edilecek sektörler ve oluşturulabilecek ürün portföyü artmaktadır, ve portföy kullanılacak sektörün şartlarına göre oluşturulmaktadır. Sandviç kompozitlerin avantaj ve dezavantajlarını özetleyecek olursak;

Avantajları;

- Yüksek mukavemeti yüzeylerin elde edilmesi
- Rijit ve mukavim bir yapı olması,
- Çekirdek yapısı sayesinde hafif bir yapı elde ediliyor olması
- Çekirdek sayesinde oluşan kalınlık sayesinde yüksek burulma ve bükülme rijitliğine sahip olması,
- Bir yüzeyde bası ve diğer yüzeyde çeki kuvvetinin oluşmasıyla birlikte yüksek mukavemet değerlerine ulaşılabilmesi,
- Termal yalıtım özelliği,
- Ses yalıtım özelliği,
- Yüksek hızlara dayanım,
- Korozyon dayanımı,
- Radar dalgalarına yakalanmaması,

gibi özellikler belli başlı avantajlarıdır ve her malzemede olduğu gibi avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunlar ise;

- Hammaddenin pahalı olması,
- Lamine edilmiş kompozitlerinin her zaman ideal olmaması,
- Üretim yöntemlerinin ürün kalitesini kalitesini belirlemesi olarak sayılabilmektedir.

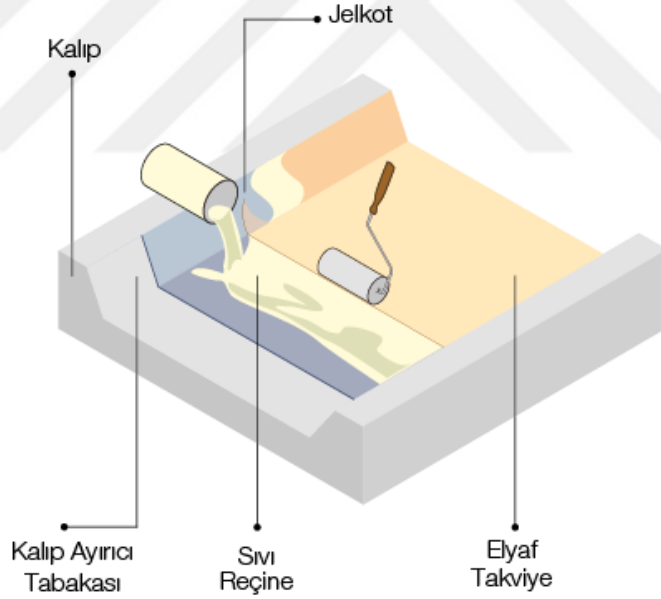
1.2 Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri oldukça fazladır. Ürünün kullanım alanı, ürünün şekli, ürün için imalat kolaylığı, ürünün adeti ve üretim süresi gibi sebeplerden dolayı birçok üretim yöntemi geliştirilmiştir.

Bu yöntemlerin başlıcaları aşağıdadır:

1.2.1 Elle Yatırma (Hand Lay-up)

Dokuma kumaş veya kırılmış elyaflardan oluşan kumaşların kalıp üzerine elle yatırılarak ara katmanlarına Şekil 1.2'deki gibi sıvı reçineyi fırça yardımı ile emdirilerek yapılan üretim yöntemi elle yatırma yöntemidir. Polyester ve epoksi'nin yanı sıra vinilester ve fenolik reçineler de el yatırma tekniğinde tercih edilmektedir.



Şekil 1.2 El yatırma yönteminin şematik gösterimi (Poliya, 2017)

1.2.2 Püskürtme (Spray-Up)

Püskürtme yöntemi, aslında elle yatırma yönteminin, kalıp üzerine kırılmış elyaf ile reçinenin Şekil 1.3'te görülen özel bir püskürtme tabancası yardımıyla püskürtülmesi şeklindedir. Elyafın kırılma işlemi püskürtme tabancasının üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırpıcı ünite sayesinde yapılmakta ve püskürtme işlemi bittikten sonra bir rulo yardımı ile yüzey düzeltilmektedir.(Genç ve Arıcı, 2008)



Şekil 1.3 Püskürtme yönteminde kullanılan püskürtme tabancası (Docplayer, 2016)

1.2.3 Elyaf Sarma (Filament Winding)

Bu yöntem adından da anlaşıldığı üzere sürekli elyaf liflerinin özel biçimli bir şekilde sarımı ile gerçekleştirilen seri üretim yöntemlerinden biridir.

Sarımın yapıldığı filament sarım makinası Şekil 1.4'te verilmektedir. “Sarım işlemi yapılırken sarım açılarındaki değişiklik ve sarım katman sayısı malzemeye çeşitli mekanik özellikler kazandırır. Bu yöntemle yapılan ürünler genellikle silindirik

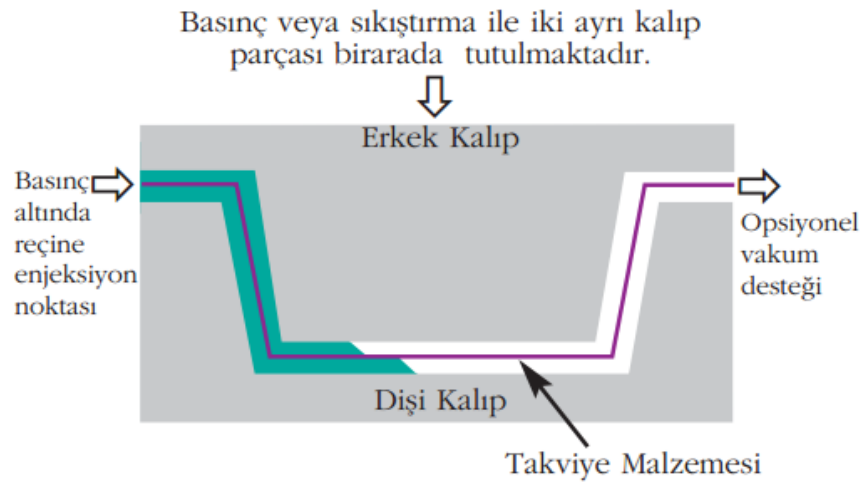
borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri, dairesel basınç tanklarıdır”(Tarakçıoğlu, 1992).



Şekil 1.4 Filament sarma makinası (Docplayer, 2016)

1.2.4 Reçine Transfer Kalıplama RTM / Reçine Enjeksiyonu

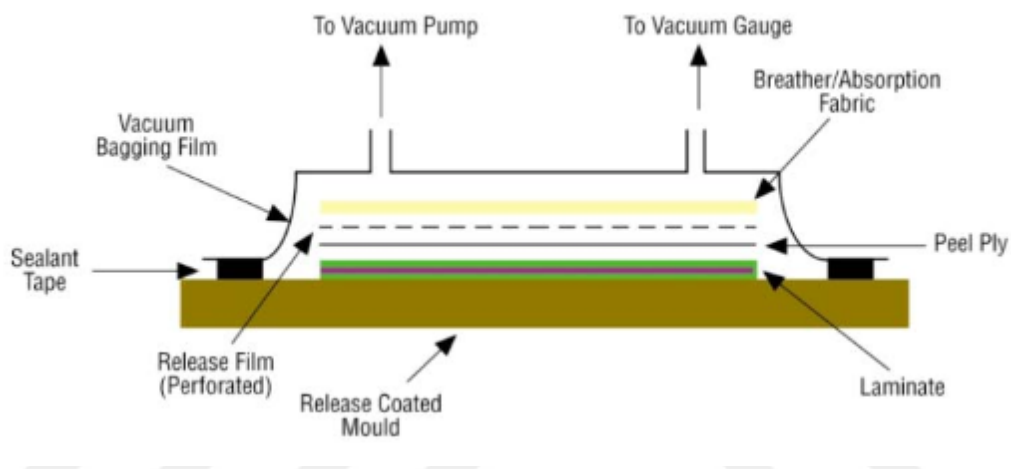
Reçine transfer kalıplama yöntemleri elle yatırma sistemlerine göre daha hızlı ve uzun ömürlüdür. Bu yöntemde iki parçalı kalıp kullanmak gereklidir. Şekil 1.5’e bakınız. İki kalıp arasına elyaf katmanları istenilen şekilde sıralanır. Kalıplar kapandıktan sonra arada kalan boşluğa basınç altında epoksi verilir. Karmaşık parçalar üretiminde tercih edilen bir yöntemdir. Concorde uçaklarında, F1 arabalarında bazı parçalar bu yöntemle hazırlanmaktadır (Enşici, 2008).



Şekil 1.5 Reçine transfer kalıplama şematik gösterimi (Enşici, 2008)

1.2.5 Vakum İnfüzyon

Bu yöntem reçine transfer kalıplama yöntemiyle hemen hemen aynı yöntemdir ve şematik gösterimim Şekil1.6’da verilmektedir. Ancak bu yöntemde epoksi sisteme verilmeden önce sistem içindeki hava vakum ile boşaltılıp, epoksi enjekte edilir vakum sayesinde epoksi hem daha kolay yayılır hem de katmanlar arasında hava boşluğu olmaz. Yat imalatında tercih edilen bir yöntemdir (Yurddaş ve Afşar, 2000).



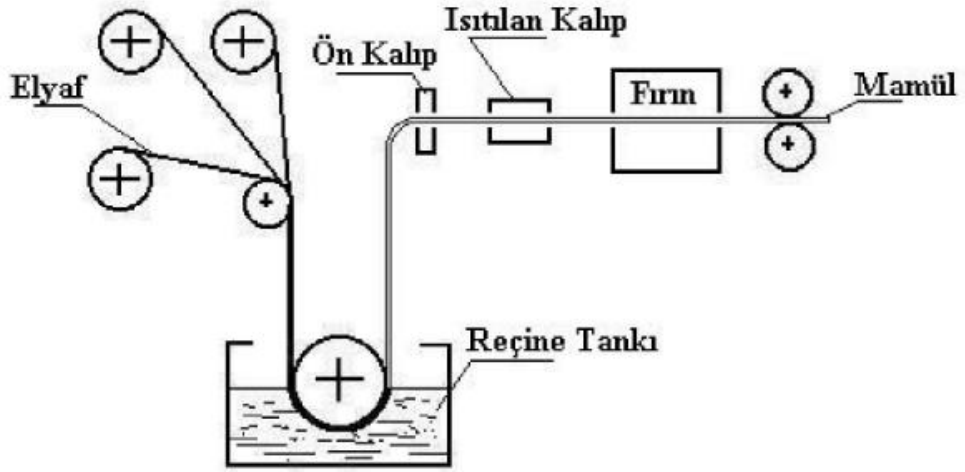
Şekil 1.6 Vakum infüzyon şematik gösterimi (Docplayer, 2016)

1.2.6 Profil Çekme / Pultrüzyon (Pultrusion)

Pultrüzyon işlemi çelik profil çekilirken kullanılan ekstrüzyon yönteminin kompozit için tasarlanmış halidir. Bu yöntem ile sürekli beslenen elyaf veya takviye malzemesi reçine banyosu içerisinden geçirilerek, 120-150 °C'ye ısıtılmış krom kaplanmış parlak çelikten yapılmış şekillendirme kalıbından çekilerek sertleştirilip şekil verilir (Enşici, 2008). Düşük maliyetli üretim yöntemidir ve kullanılan elyafların sürekli olmasından dolayı takviye yönünde çok yüksek mekanik mukavemet değerleri çok yüksektir. Ancak enine mukavemet değerlerini arttırmak için özel dokumalar kullanmak gerekmektedir.

1.2.7 Enjeksiyon Kalıplama (Injection moulding)

Reçine transfer yöntemine teorikte benzer bir yöntemdir. Örnek bir makine için Şekil 1.7'e bakınız. Reçine transfer yöntemine göre reçine ve elyaf dışarıda karıştırılarak eritilir. Sonra bu karışım basınç ile boş kalıp içerisine enjekte edilerek üretim yapılır. Bu yöntemde tercih edilen reçineler düşük viskoziteye sahip olmalıdır. Diğer üretim yöntemlerine göre daha hızlı bir yöntemdir. Çocuk oyuncaklarından uçak parçalarına kadar birçok ürün üretiminde kullanılabilmektedir (Enşici, 2008).



Şekil 1.7 Enjeksiyon kalıplama makinası (Aktaş, 2016)

BÖLÜM İKİ

MALZEME VE ÜRETİM

2.1 Malzeme seçimi

Bu çalışmada denizcilik ve yatçılık sektörünün sandviç yapıları ve üretim yöntemleri ön plana alınmıştır. Sektörde kullanılmak üzere oluşturulan kompozit yapılar ve üretim yöntemleri dikkate alınarak numune imalatı için gerekli olan materyal seçimi belirlenmektedir. Bu seçimde dikkat edilmesi için öngörülen unsurlar sırasıyla şunlardır:

- ✓ Denizcilik sektöründe genellikle darbeye maruz kalan yüzeyler ile daha az darbeye maruz kalan yüzeyler farklı yapıdadır. Yat gövdelerinin dış katmanları daha çok darbeye maruz kaldıkları için iç katmanlara göre daha kalın imal edilmektedirler.
- ✓ Dış ve iç katman arasında çekirdeği oluşturacak ve yapıya elastiklik katacak katman tercih edilmekte ve numune imalatında bu katman için PVC köpük kullanılmaktadır.
- ✓ Yapının en dış kısımları genellikle yükü dağıtmak için tasarlanmakta ve numune imalatında bu özelliği göz önünde bulundurarak, dış katman kırpılmış elyaf ile kaplanmaktadır.
- ✓ Termoform değeri çok düşük olmayacak şekilde tasarım yapılmaktadır.
- ✓ Kullanılacak yapıştırıcı ve sertleştirici hem el yatırma hem de vakum infüzyon yöntemine uygun olması gerektiğinden numune için viskozitesi düşük epoxy seçilmektedir.
- ✓ Yapılacak deney yöntemlerin ve numune ebatlarına göre malzeme miktarı belirlenmektedir.

Bu tez çalışmasında testlerde kullanılacak olan numuneler öncelikle Solidworks ortamında modellendi. Hem testler için lazım olan numuneler hem de yedekleri için gerekli olan alan yaklaşık $1,2 m^2$ olarak hesaplandı.

Tablo 2.1 PVC köpük teknik özellikleri

Köpüğün Yoğunluğu	100 kg/m ²
Köpüğün Kalınlığı	25 mm

Tablo 2.1 ‘de özellikleri verilmekte olan 1.2m²’lik, deliksiz, kanalsız, düz PVC köpük Armacell AC100 malzemesi çekirdek olarak kullanılmıştır ve köpüğün her iki tarafındaki katmanları oluşturan cam elyafın teknik özellikleri Tablo 2.2’de verilmektedir. Numune üretiminde kullanılan farklı iki kumaştan birincisi 28m²’lik 0-90 örgülü, diğeri ise 8m²’lik bir tarafı kırpılmış diğer tarafı 0-90 örgülüdür.

Tablo 2.2 Cam elyaf örgülü kumaş teknik özellikleri

Cam Elyaf Örgülü Kumaşlar	Dış katman	Ara katmanlar
Yoğunluk gr/m ²	800 gr/m ²	800 gr/m ²
Örgü Açıları	0 - 90 / kırpılmış	0 - 90
Örgü Şekli	plain / kırpılmış	Plain

Vakum infüzyon ile yapılan numune Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü kompozit laboratuvarında imal edilmiştir. El yatırma yöntemi ile yapılan numune de İzmir’deki İzoreel firmasında imal edilmiştir. Hem vakum infüzyon hem de el yatırma ile üretilen numunelerin katman yapıları Tablo 2.3 ‘te verildiği gibidir.

Tablo 2.3 Numune katman yapıları

	KATMAN SAYISI	ÖRGÜ ŞEKLİ	YOĞUNLUK (g/m ³)
Üst Katmanlar	1. Cam Elyaf	Kırpılmış/0-90	0,45
	2. Cam Elyaf	0-90 Dokuma	0,8
	3. Cam Elyaf	0-90 Dokuma	0,8
	4. Cam Elyaf	0-90 Dokuma	0,8
	5. Cam Elyaf	0-90 Dokuma	0,8
Çekirdek	25 mm PVC Köpük	Kanalsız/deliksiz	-
Alt katmanlar	1. Cam Elyaf	0-90 Dokuma	0,8
	2. Cam Elyaf	0-90 Dokuma	0,8
	3. Cam Elyaf	0-90 Dokuma	0,8
	4. Cam Elyaf	Kırpılmış/0-90	0,45

Teknik özellikleri Tablo 2.4'teki gibi olan reçine ve sertleştirici; 1,2 m²'lik numunenin üretilmesinde için yaklaşık karıştırılmış hali 24 kg olan reçine ve sertleştirici karışımı kullanılmıştır.

Tablo 2.4 Reçine ve sertleştirici teknik özellikleri

Reçine ve Sertleştirici	
Yoğunluk	1,10 ± 0,05 kg/lt
Viskozite	350 ± 50 mPas

2.2 Vakum İnfüzyon ve El Yatırma İle Üretim

Tez çalışmasında malzeme ve katman seçiminde dikkat edilen hususlar vakum infüzyon ve el yatırma yönteminde de göz önünde tutulmuştur. Denizcilik sektörünün başını çeken ve yatçılık sektöründe kullanılan iki üretim yönteminden vakum infüzyon ve el yatırması yöntemleri tezin ana unsurlarını oluşturmaktadır.

2.2.1 Vakum İnfüzyon

Vakum İnfüzyon yöntemi A.B.D. başta olmak üzere dünya genelinde birçok sanayi alanının da kullanılmakta olan imalat yöntemidir. Bu yöntem 1980’lü yıllara dayanmaktadır ve özellikle kompleks yapılarda tercih edilmektedir. Vakum infüzyon kompleks yapıların dışında homojen epoksi dağılımının önemli olduğu ve seri imalat için uygun olan bir yöntemdir.

2.2.1.1 Adım Adım Vakum İnfüzyon Yöntemi

Bu yöntem, vakumlanmış olan ortamın içerisine uygun viskoziteye sahip reçinenin ilerleyip, el değmeden elyaflara emdirilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemin ana yapı taşları:

- Vakum Pompası
- Vakum Tankı (reçine toplama tankı)
- Kalıp
- Reçine kovası’dır.

Vakum İnfüzyon Yöntemi ile numune üretiminde ilk olarak numunenin hazırlanma şartları belirlenmektedir. Sıcaklık, basınç, deney numune ebatları, yapılacak deneyler vb. şartlar standartlara bağlı olarak tesbit edilir ve Sonrasında deney numunelerinin ebatlarına uygun düz zemin ayarlanır. Bu zemin üzerine öncelikle teflon yayılır. Yayılan teflonun kenarlarına çift taraflı bant çekilir. Teflon sayesinde numune hazırlandıktan sonra tezgâhtan numune sökümü kolay olmaktadır. Teflonun üzerinde delik olmamasına dikkat edilmelidir. Çünkü delikler vakumu negatif olarak etkilemektedir. Çift taraflı bant ile sabit zemine bağlantısı sağlam olmalıdır aksi takdirde numune deki epoxy serleşirken numune şekli bozulmaktadır.



Şekil 2.1 Vakum infüzyon üretim aşaması kırmızı teflon ile alt yüzey (Kişisel arşiv, 2016)

Deney numunesi toplam 9 katmandan oluşmaktadır. 5 katman üst yüzeyde 4 katman alt yüzeyde olmak üzere arada köpük ile birlikte Şekil 2.2'deki gibi sandviç kompozit yapıyı meydana getirmektedir. En alt katman bir tarafı kırpılmış elyaf diğer yüzü 0-90 derece örgülü elyaf kumaş yerleştirilir. Kırpılmış elyafly yüzey teflona temas eden tarafta kullanılmaktadır ve bu sayede dış katmanlarda oluşan gerilmenin yüzeye dağılması sağlanır. Üzerine dört kat 0-90 derece örülü elyaf kumaşlardan serilir. Bu serilmiş olan beş kat, deney numunesinin dış yüzeyini oluşturmaktadır.



Şekil 2.2 Vakum spiral hortum ve kumaş katmanların görünümü (Kişisel arşiv, 2016)

Çekirdek olarak PVC köpük kullanılmıştır. (Bakınız Şekil 2.2) PVC köpük plaka halinde olduğundan köpüğün üzerine belirli mesafelerde 2 mm çapında delikler

açılarak epoxy emdirilirken epoxynin PVC'nin alt tarafına geçmesini sağlamakta kullanılmıştır.

PVC köpüğün üzerine üç kat 0-90 derece örgülü elyaf kumaşlardan serilip bu üç kat kumaşın üzerine bir tarafı kırpılmış elyaf diğer yüzü 0-90 derece örgülü elyaf kumaş yerleştirilmiştir. Bu katman en alt katmanda olduğu gibi kırpılmış yüzey deney numunesinin dış yüzeyini oluşturulmaktadır. Bu yüzden kırpılmış yüzey üste bakacak şekilde kumaş yerleştirilmiştir.



Şekil 2.3 Vakum infüzyonla üretim yöntemi - fileli kumaş (Kişisel arşiv, 2016)

Numune katmanları tamamlandıktan sonra üst yüzeye ayırma kumaşı örtülmüş ve epoxy katılaştıktan sonra numunenin rahat bir şekilde ayrılmasını sağlanmıştır. Ayırma kumaşının üstüne fileli bir kumaş örtülerek epoxy nin rahat bir şekilde ilerlemesini sağlanmıştır ve vakumlu bir ortamda sıvı olan malzemeler (epoxy, vinilester vb.) kolay yolu tercih etmektedirler. (Bakınız Şekil 2.10)

Bu katmanlar tamamlandıktan sonra sistemin birbirine zıt iki tarafına epoxy girişi ve çıkışı için iki yer hazırlanmıştır. Kalıpsal bir malzeme imalatı olmadığı için hem epoxynin kolay ve düzgün yayılması sağlamak hem de numunenin her tarafına ulaşmasını sağlamak için giriş ve çıkışların olduğu yerlere spiral hortumlar kullanılmıştır. Numune genişliğinde olan bu hortumlar vakum altındayken epoxy için boş alanlar oluşmakta ve böylece düzgün şekilde ilerlemesi sağlanmaktadır. Çıkış tarafındaki boş alan sayesinde de epoxinin yayılı olarak çekilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 2.4 Vakum infüzyonla üretim yöntemi - vakum öncesi (Kişisel arşiv, 2016)

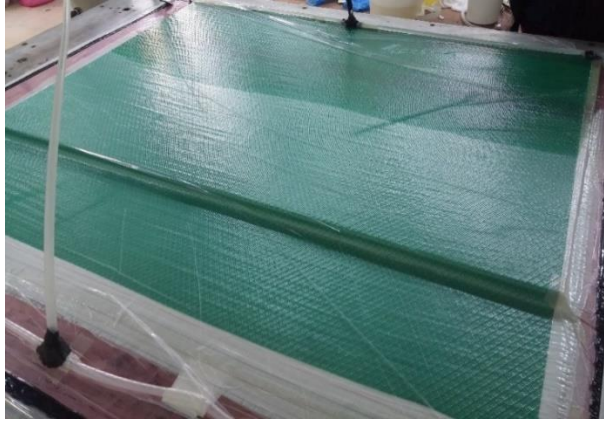
Deney numunesinin vakum öncesi son aşaması, vakum torbası ile sistemin kapatılmasıdır. Bu işlem yapılırken dikkatli olunması gereklidir. İlk işleme başlarken teflonu yapıştırmakta kullanılan çift taraflı bantlar torbayı yapıştırmakta kullanılmıştır. (Bakınız Şekil 2.4) Vakum torbası sandviç kompozit üretiminde üç boyutlu bir yapı oluşturacağı için yapılacak numunenin ebadından yaklaşık 1.5 kat daha büyük beklenmektedir. Vakum torbası deney numunesinin üzerine kapatılırken çift taraflı bantta adım adım yapıştırılmalıdır. Yapıştırma esnasında arada boşluk bırakılmamalıdır. Giriş ve çıkıştaki spiral hortumların hizalarına kulak adı verilen vakum torbasına 3 boyut katan kıvrımlar hazırlanmaktadır. Bu sayede hem spiral hortum için alan oluşur hem de vakum esnasında hortumların vakum torbasını delmesine engel olunur. Vakum torbasına giriş ve çıkış hortumlarının bağlantısı için iki adet delik açılmakta ve bu deliklerden hortum jakları çıkarılmaktadır. Kullanılan çift taraflı yapıştırıcının hamursal bir yapısı olduğundan dolayı bir miktar bant ile jakların etrafı sarılıp vakum torbasına yapıştırılır ve böylece hava kacağı önlenmiş olur.



Şekil 2.5 Vakumlanmış numune (Kişisel arşiv, 2016)

Epoksi'nin sisteme verileceği giriş körlenir. Diğer hortum ucundan vakum başlatılır. Hazırlık şartlarında belirlenen basınç seviyesine gelene kadar vakum işlemi devam eder, istenilen basınç değerine ulaşıncaya, vakum yapılan ucu da körleme gerekmektedir.

Böylece sistem kapalı devre bir sistem haline gelmiştir ve vakum kaçağının olup olmadığı önem arz etmektedir. Bu yüzden sistem bir süre kapalı halde bekletilir ve eğer sistemde kaçak var ise tespit edilip, tamiri yapılmadan sisteme epoksi verilmemektedir. Eğer kaçak yok ise artık sisteme epoksi verilebilir.



Şekil 2.6 Vakum infüzyonla üretim yöntemi - epoksi besleme (Kişisel arşiv, 2016)

Körlenen iki uçtan birine vakum pompası bağlanıp çalıştırılarak diğer uçtan epoksi verilmektedir. Kullanılacak epoksi ve sertleştirici karışımı uygun oranlarda önceden iyice karıştırılıp hazır hale getirilerek diğer uçtaki hortum yardımı ile karışım vakumlanmaya başlamaktadır. Şekil 2.6'dak gibi epoksi vakum yardımıyla ilerlemektedir. Epoksi vakum ucuna ulaşıncaya kadar beklenilir sonrasında vakum

durdurulup, iki hortum ucu da körlenir ve epoxy sertleşmeye bırakılır. Sertleşme süresi ise kullanılan sertleştiriciye ve karışım oranına bağlı olarak değişmektedir.

Tablo 2.5 Numunenin üretimin de kullanılan reçine ve sertleştiricinin kürlendirme teknik özellikleri (Telatex, 2017)

ÖZELLİK	BİRİM	STD.	50°C'de 16 Saat	60°C'de 12 Saat	80°C'de 8 Saat	100°C'de 4 Saat
Çekme Mukavemeti	N / mm ²	ISO 527-2	76-81	76-81	76-81	76-81
Max. çekme Uzaması	%	ISO 527-2	3,5-4	3,5-4	4,2-4,7	4,5-5
Çekme E-Modülü	kN / mm ²	ISO 527-2	3,4-3,7	3,3-3,6	3-3,3	3,1-3,4
Eğilme Mukavemeti	N / mm ²	EN ISO 178	113-118	113-118	113-118	128-133
Eğilme E-Modülü	kN / mm ²	EN ISO 178	3,1-3,4	2,9-3,2	2,9-3,2	3,4-3,7

Bu kürleme işlemi fırın içerisinde belirli bir sıcaklıkta, belirli bir süre tutularak yapılmaktadır. Kürleme işlemi sonrasında reçine ve sertleştirici değerleri Tablo 2.5'te verilmektedir. Her iki imalat yönteminde de aynı kürleme işlemi uygulanmaktadır. Kürlemenin takibinin kolay olması için 80 santigrat derecede 8 saat kürleme tercih edilmiştir.



Şekil 2.7 Kürleme fırını (Kişisel arşiv, 2016)

Deney numunesi sertleştikten sonra üzerindeki vakum torbası, teflon vb. tabakalar sökülerek numune sistemden çıkarılarak. Şekil 2.7 de görülmekte olan fırın içerisine yerleştirilmiştir. Mekanik değerlerini arttırmak için önceden kararlaştırılan derece ve sürede kürleme işlemine tabi tutulmuştur.

2.2.1.2 Vakum İnfüzyon Yönteminde Dikkat Edilecek Hususlar

- Vakum ortamının sağlandığı kapalı sistemden delik olmamalı
- Reçine ve sertleştirici karıştırılırken içerisinde hava kabarcığı oluşturulmamasına dikkat edilmelidir.
- Sistemde kaçağa sebep olmamak için yapıştırırmada kullanılan çift taraflının üzerine elyaf iplik denk gelmemesine dikkat edilmelidir.
- Epoxy verilmeden önce en az epoxy'nin donma süresi kadar malzeme vakum altında bekletilmelidir. Sistemde kaçak olup olmadığına bu süre zarfında bakılmalıdır.
- Numune hazırlanırken sabit bir zemin üzerine bağlanarak hazırlanmalıdır. Çünkü epoxy serleşirken malzemede çekmeye sebep olur ve sabit bir zemine bağlı değilse numunede istenmeyen şekiller oluşur.

- Sandviç malzemelerde spiral hortumların olduğu yerlere kulak yapılmalıdır. Bu sayede hem hortumdan dolayı vakum torbasında yırtılma riski azalır hem de hortum için rahat bir alan kalır.
- Spiral hortum elyaf kumaşlardan biraz uzağa yerleştirilmelidir. Elyafın üzerinde olursa fark etmeden epoxy vakuma pompasının içine kaçabilir. Eğer pompanın önünde emniyet haznesi yoksa pompaya zarar verebilir.
- Spiral hortum ile elyaf arasında bağ oluşturmak için kâğıt, selpak mendil vb. malzeme ile bağlantı yapılmalıdır. Bu sayede vakum esnasında vakum torbası ile alttaki teflon arasında vakum içi alan kalır. Aksi halde iki katman birbirine yapışır ve vakumlama işleminde problem oluşturabilir.
- Vakum yapıldığı zaman numunenin kenarlarında (vakum yönüne göre sağ ve sol kenarlar) boşluk bırakılmamalıdır. Epoxy direncin az olduğu yeri tercih edip hızlı şekilde oradan akmaya çalışır bu da malzemenin her yerine yayılmasına engel olur
- En az reçine ve sertleştirici karışımının kürlenme süresi kadar numune vakum altında bırakılmalıdır. Çünkü çok küçük bir kaçak varsa kürlenirken oluşan reaksiyon ve genişlemeden dolayı vakum açılabilir.
- Kürleme işlemi bitene kadar kürlenmiş uçlar açılmamalıdır.

2.2.2 El Yatırma Yöntemi

Uygun ortam şartlarında, imalatı yapılacak malzemenin kalıbının iç yüzeyini kaplayacak şekilde yayılmış olan takviye cam elyaflara, fırça yardımıyla reçine emdirilmesi (yedirilmesi) ve elyaf katmanlarının pres basıncı altında kalıp içerisinde kürleşmeye bırakılması ile yapılan üretim yöntemidir. En yaygın olan üretim yöntemidir.

2.2.2.1 Adım Adım El Yatırma Yöntemi

Yapılmak istenen ürünün kalıbı hazırlanır. Öncelikle kalıbın içerisi yağ, toz ve kalıp iç yüzeyindeki yüzey bozuklukları giderilir. Temizlenmiş olan yüzeye cilalama işlemi yapılır. Genellikle yat sektöründe tavsiye edilen altı saat arayla olmak üzere üç kez cilalama işlemi yapmaktır. Cilalama işleminden sonra kalıp ayırıcı uygulanmalıdır. Bu

uygulama ile hem yüzey pürüzsüz bir hale getirilir hem de numunenin kalıptan çıkarılması kolaylaşır.



Şekil 2.8 El yatırma üretim yöntemi - kalıp ayırıcı (Google, 2017)

Kalıp ayırıcı olarak kullanılacak malzemenin çeşidine göre ister fırça ile ister sprey ile kalıp yüzeyine uygulanır. Bu işlem bittikten sonra malzemenin kuruma süresi kadar beklenir. Kalıp ayırıcı kuruduktan sonra üzerine bir kat daha cilalama işlemi yeterlidir.

Çalışmadaki numuneler hazırlanırken kalıp yerine düz ve pürüzsüz bir yüzey kullanılıp üzerine teflon çekilmiştir. Bu sayede numune hazırlandıktan sonra yüzeyden rahatça ayrılabilir.

Üretilcek malzemenin özel bir renge boyanması isteniyorsa son cilama işleminden sonra istenilen renkte jelkot uygulaması yapılmaktadır. Jelkot hep aynı yönde sürülmelidir ve sürülürken fırça tek istikametle kullanılmalıdır. Hava kabarcığı oluşturmamaya dikkat edilmelidir. Jelkot sertleştikten sonra bir sonraki aşamaya geçilmelidir.

Reçine ve sertleştirici uygun oranlarda karıştırılmalıdır. Bu miktarlar yapılacak ürünün malzeme ihtiyacına, ortam sıcaklığına, jelleşme zamanına ve tercih edilen

reçine ve sertleştirici katalog oranlarına göre belirlenmeli ve reçine karışımı hazırlandıktan sonra teflonun üzerine sürülmelidir.

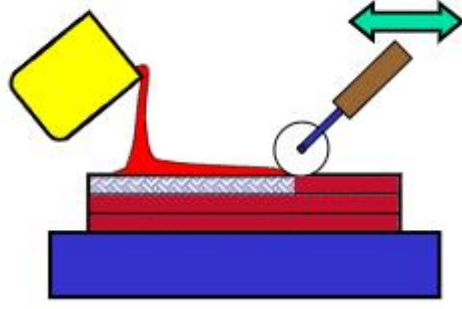
Hazırlanan deney numunesi toplam 9 katmandan oluşmaktadır. Önceden kesilmiş hazırlanmış olan cam elyaflar ve PVC köpük sıra ile yerleştirilir. Teflonun üzerine en alt katmanı oluşturan bir tarafı kırılmış elyaf ve diğer yüz 0-90 derece örgülü elyaf kumaş yerleştirilir. Dış katmanlarda oluşan gerilmenin yüzeye dağılması sağlanır. Sert fırça ile yatırılmış olan ilk katmana nokta vuruş hareketleri yardımıyla reçinenin elyafa emdirilmesi sağlanmaktadır. Daha sonra üzerine rulo ile reçine karışımı sürülür.



Şekil 2.9 El yatırma üretim yöntemi - epoxy sürme işlemi (Megep, 2014)

Üzerine 0-90 derece örülü elyaf kumaşlardan serilir. Tekrar fırça darbeleri ile reçine emdirilir. Bir tanesi bir tarafı kırılmış elyaf diğer yüzü 0-90 derece örgülü elyaf kumaş, dördü 0-90 derece örülü elyaf kumaştan olmak üzere aynı işlem tekrarlanır. Dördüncü 0-90 derece örgülü elyaf kumaşın üzerine reçine sürüldükten sonra üzerine PVC köpük yerleştirilir. PVC köpük üzerine reçine sürülür. PVC köpükte açılmış olan delikler yardımıyla köpüğün iki yüzeyi arasında bağlantı sağlanmış olur.

PVC köpük üzerine yerleştirilen teflonlar sayesinde numunenin üretimi tamamlandıktan sonra ara yüzeyde kusur oluşturulmuş olur ve böylece iki farklı yüzey arası çatlak ilerlemesi incelenir.



Şekil 2.10 El yatırma üretim yöntemi-epoxyli katman üzerine yeni kumaşın yatırılması işlemi (temsili)
(Docplayer, 2016)

PVC köpüğün üzerine reçine sürüldükten sonra 0-90 derece örülü elyaf kumaş konulur. Yine sert fırça ile nokta vuruşlarla reçine emdirilip üzerine rulo ile reçine sürülür. Bu döngü üçü 0-90 derece örülü elyaf kumaştan, bir tanesi bir tarafı kırılmış elyaf diğer yüzü 0-90 derece örgülü elyaf kumaş olmak üzere her katmana uygulanır. Son katman olan bir tarafı kırılmış elyaf diğer yüzü 0-90 derece örgülü elyaf kumaş yerleştirilirken 0-90 derece örülü yüzey altta kalacak şekilde yerleştirilir.

Kırılmış elyafly yüzey teflona temas eden tarafta kullanılır. Bu sayede numunenin alt yüzeyindeki gibi üst yüzeyinde de oluşan gerilmelerin dağıtılması sağlanır. Yat gövdesinin kesitinden referans alınarak oluşturulan numunenin yapısı, çekirdekdeki PVC köpüğün bir tarafında beş katman diğer tarafında dört katmandan oluşmaktadır. Yat gövdesinin yapısında, deniz ile gövdenin temas ettiği taraf gövdenin iç tarafına göre daha fazla katmandan oluşmaktadır.

Her iki üretim tekniğindeki şartları eşit tutabilmek için vakumun oluşturduğu 1 bar basınç, el yatırması ile üretilen numune de pres yardımı ile sağlanır.

2.2.2.2 El Yatırma Yönteminde Dikkat Edilecek Hususlar

- Üretim nemli ortamda yapılmamalıdır. Çünkü nemdeki su tanecikleri reçinenin tam görevini yapmasına engel olmaktadır.
- Üretim esnasındaki ortam sıcaklığına göre katalizör veya sertleştirici miktarı ayarlanmalıdır

- Elyaf katmanlarına reçine sürülürken bütün elyafın reçineyi emmesine dikkat edilmelidir.
- Sürülen reçinede hava kabarcığı veya hava boşluğu olmasına izin verilmemelidir.

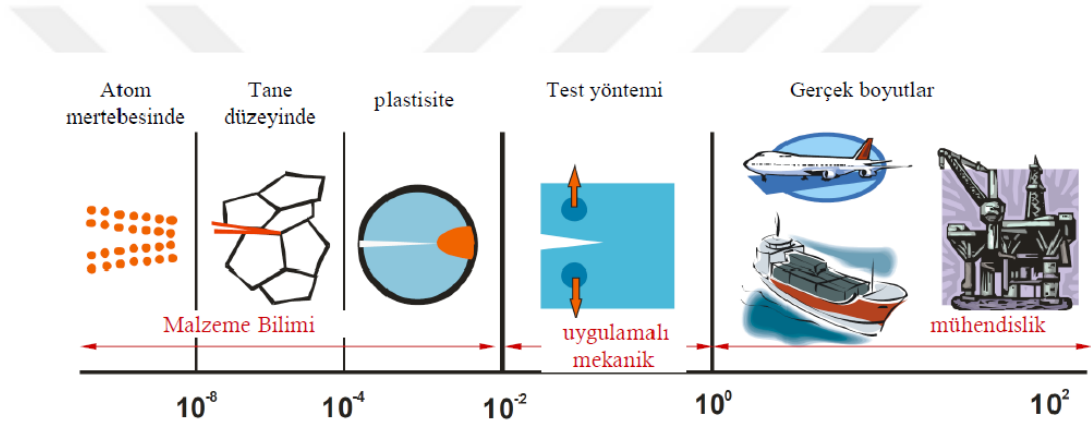


BÖLÜM ÜÇ

KIRILMA MEKANİĞİ

3.1 Kırılma Mekaniği

Katı bir cismin yükleme neticesinde meydana gelen gerilmeler ile iki veya daha fazla parçaya ayrılması olayına kırılma olarak ad verilmektedir. Genellikle gevrek ve sünek olarak ikiye ayrılır. Sünek kırılmada kalıcı şekil değişimi mevcut iken, gevrek kırılmada ise kalıcı şekil değişiminin önemsiz düzeyde olduğu gözlenmektedir. Sünek kırılmada çatlak oluşumu ve ilerlemesi yavaş iken gevrek kırılmada çok daha büyük hıza sahiptir. Bu yüzden gevrek kırılma en tehlikeli kırılma türüdür.



Şekil 3.1 Kırılma mekaniği (Gülmez, 2018)

Cisimlerin en küçük yapı birimi atomlardır. Atomların arasındaki bağ kuvvetleri cismin mukavemetinin temelini oluşturmaktadır. Eğer bu bağlar kuvvetli ise malzeme kuvvetli elastisite modülü yüksek, ergime sıcaklığı yüksek olmaktadır. Atomlar tek başına potansiyel enerjiye sahiptir ve aralarında bağ oluşması esnasında potansiyel enerji azalmaktadır. Denge konumunda minimum olur ve kararlı bir yapı oluşur. Bir çatlakın veya bir kusurun oluşması önce atomik bağlarda yeni mikro yapıda meydana gelir ve çatlak çevresinde gerilme yığılmaları oluşması kırılmayı tetikler. Kırılma Mekaniği de mikro ve makro yapılara hitap eden bir bilim dalıdır. (Bakınız Şekil 3.1)

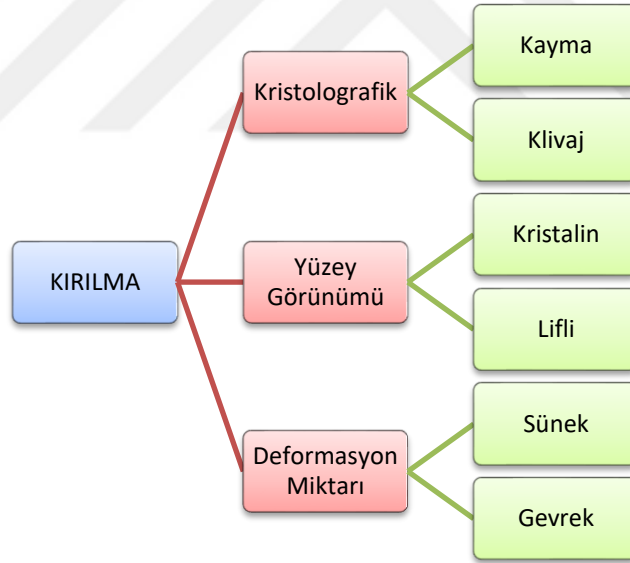
Makinadan ve malzemeden beklenen işlevi yapamaz hale gelmesine hasar denir. Bu hasar çatlakın oluşumu ve ilerlemesi safhalarında meydana gelmektedir.

Mühendislik malzemeleri özellikle kompozit malzemelerden oluşmakta ve kullanım yerleri havacılık ve denizcilik ise malzemelerin imalat yöntemleri de önem arz etmektedir.

Metalik malzemeleri ve kompozitlerdeki hasar mekanizması iki şekilde incelenebilmektedir.

- Sayısal gerilme analizi
- Sayısal kırılma mekaniği dir ki

Bu metodlarla matris malzemedeki çatlakların yeri ve kırılması, deliminasyonun ilerlemesi ve potansiyel enerjinin tespiti ve bu deliminasyonun oluşumu ve büyümesinin araştırılması konuları kapsamaktadır. İlk önce metalik malzemelerdeki kırılma çeşitlerini inceleyecek olursak bunlar sırasıyla aşağıdaki gibidir

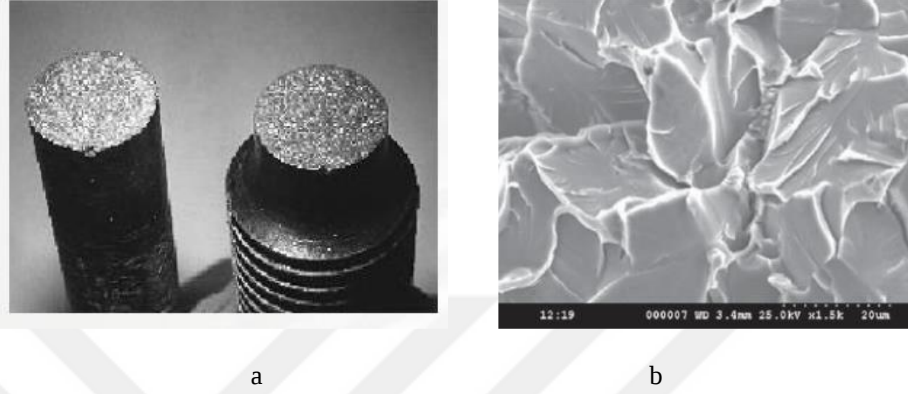


Şekil 3.2 Kırılma Çeşitleri Şablonu

3.1.1 Klivaj Kırılma

Klivaj kırılma, malzemenin dayanımı olan yükten daha fazla yüke maruz bırakılması sonucunda malzemede ani bir şekilde kırılma gerçekleşir. Kırılma düzlemine dik bağların kopması ile oluşan kırılma türüdür. Plastik deformasyona dair

bir belirti neredeyse gözükmez. Buda kırılma olmadan önce hiçbir belirti ortaya çıkmaz. Kırılma tane içerisinde gerçekleşirse yüzey görünümü kristalin olur. Klivaj kırılma esnasında malzeme plastik deformasyona girmediğinden dolayı gevrek kırılma meydana gelmiş olur.



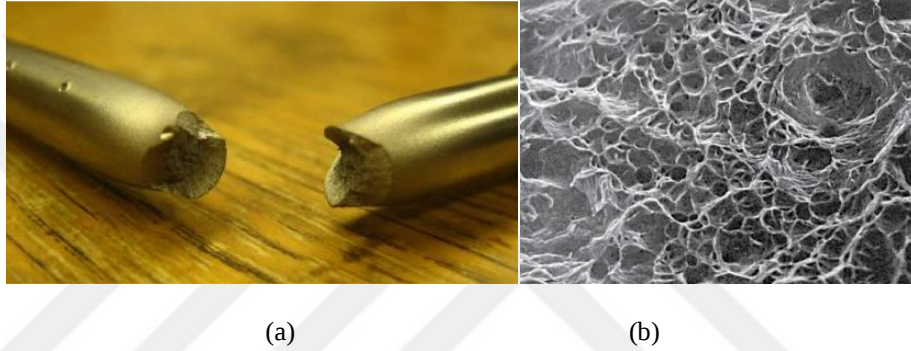
Şekil 3.3 a) Klivaj kırılma (Gülmez, 2018) b) Kristal yüzey görünümü (Gülmez, 2018)

Bu kırılma için örneklendirmek gerekirse, çelik halatın kullanıldığı sistem ele alınabilir. Çelik halat -15 santigrat derecelik bir ortamda taşıma kapasitesinden fazla yük yüklendiği zaman, bu yüke dayanamayıp kopacaktır. Bu kopma olayı yüksek bir gürültü ile ani bir şekilde gerçekleşecektir. Burada hem malzemenin içyapısındaki gerilmeler hem de ortam sıcaklığının düşük olması malzeme tokluğunun da düşmesine sebep olmaktadır. Çelik halatın sünekliliği yeterli miktarlarda değilse bu şekilde ani bir kopma olacaktır. Kopma yerindeki görünüm Şekil 3-3 a) 'da görüldüğü üzere adeta bıçakla kesilmiş gibi ve parlak olacaktır.

Klivaj kırılma en tehlikeli kırılma durumudur. Malzemelerde plastik deformasyon olmadığı için periyodik bakımlarda malzemede kırılmaya yönelik erken bir tespit yapılamaz. Malzemede kopmanın ne zaman gerçekleşeceği tam olarak bilinemez. Genellikle bu durumlar için riskli malzemelere uygulanan mekanik deneyler ve testler sonucunda tahmini bir ömür biçilebilir. Bu sayede yeterli süre çalıştıktan sonra malzeme değişikliği yapılır. Bu sayede ani kopma riskinden doğabilecek problemlere karşı önlem alınmış olur.

3.1.2 Kayma Kırılması

Sünnek yapıya sahip malzemelerde malzeme üzerine taşıma kapasitesinin üzerinde bir yük yüklenmesi durumunda malzeme sünerek kopar. Klivaj kırılmanın aksine malzemedeki atom düzlemlerinin kayması sonucu oluşan kırılma çeşididir. Malzemede kopma olayı gerçekleşmeden önce malzeme de belirtiler verecektir. Bu belirtiler malzemede oluşan plastik deformasyon sayesinde oluşur. Malzemede oluşan sünme periyodik bakımlarda fark edileceğinden dolayı kopma emniyetli bir şekilde olur.



Şekil 3.4 a) Sünnek kırılma (Gülmez, 2018) b) Lifli kırılma (Gülmez, 2018)

Klivaj kırılmada bahsedilmiş olan çelik örneğinin aksine soğuk ortamlarda kullanılmak üzere yüzey merkezli kübik yapıya sahip sünnek bir malzeme olan östenitik paslanmaz çelik örnek alalım. Bu çelik malzeme taşıma kapasitesinin üzerinde bir yükleme yapıldığında malzeme de önce sünme oluşur sonrasında kopma gerçekleşir. Sünerek gerçekleşen kopma olayında malzeme de uzama kesitte daralma gibi belirtiler gözlemlenir. Kopmanın olduğu nokta incelenecek olursa klivajın kırılmanın aksine girintili çıkıntılı bir yüzey görülecektir. Kopmadan hemen sonra kopmanın olduğu yerin sıcak olduğu hissedilir. Çünkü sünerek kopmada yüksek enerji gerekeceği için bölgede ısınma meydana gelir. Bu durumda bize kayma ile kırılmanın gerçekleştiğini gösterir.

Kayma kırılması plastik deformasyondan kaynaklanan sünme ile gerçekleştiği için malzemenin bu kısmında çapta incelme ve boyda uzama meydana gelir. Bu sayede

malzemede gözle görülür bir uyarı oluşmuş olur. Sünek kopmanın sonucunda malzeme de lifli kırılma oluşur.

3.2 Kırılma Mekaniği Çeşitleri

Kırılmayı klivaj ve kayma kırılması gibi iki ana gruba ayırmıştık. Kırılma mekaniğinde ise kırılma iki farklı yaklaşım üzerinden incelenmektedir. Bu yaklaşımlar:

- Lineer Elastik Kırılma Mekaniği
- Elastik Plastik Kırılma Mekaniği

3.2.1 *Lineer Elastik Kırılma Mekaniği*

Lineer(doğrusal) elastik kırılma mekaniği malzemelere uygulanan kuvvet gerilme vb. durumlarda malzemenin göstermiş olduğu davranışlarının elastik sınırların içinde kalmasını temel alan analitik ifadedir. Bu metotta çatlak ucundaki gerilme çatlakın uzunluğuna yönüne ve parçaya uygulanan gerilmeye bağlıdır.

Malzeme üzerinde uygulana gerilmeden dolayı malzeme de depolanan enerji miktarı kritik değeri aşarsa veya çatlak ucun da oluşan gerilme kritik değere ulaşırsa malzemede çatlak ilerlemesine sebep olur. Her iki durumda çatlak ilerlemesinin hesaplanabilmesini sağlar. Buradan da anlaşılacağı üzere lineer(doğrusal) elastik kırılma mekaniği temeli şu esaslara dayanır:

- Her malzeme temelinde mikro çatlaklara sahiptir
- Çatlak boyu ve uygulanan gerilme biliniyorsa K değeri hesaplanabilir
- Malzemenin K değeri biliniyorsa, bu değer aşıldığında malzemede hasar meydana gelir

Kırılma mekaniğinin temel sembolleri olan C_I (enerji boşalma miktarı) ve R (çatlak ilerleme direnci) çatlakın davranışını belirleyen unsurlardır. Eğer;

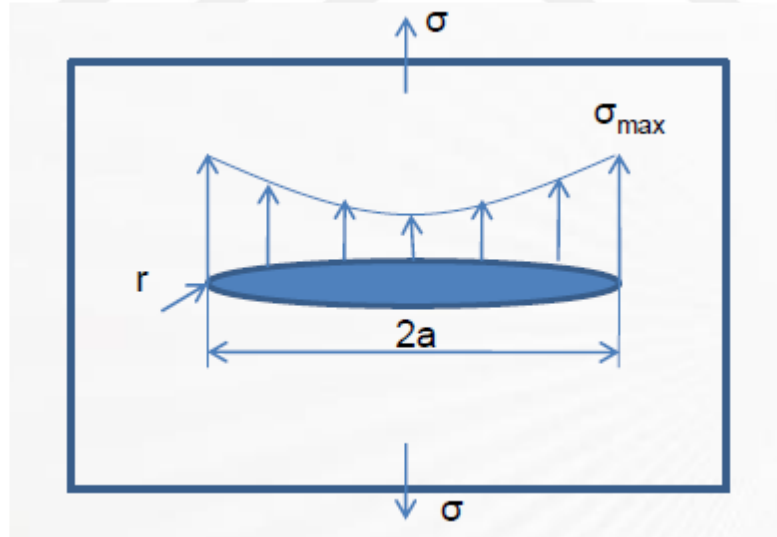
$C_1 = R$ ise kararlı çatlak ilerlemesi var,

$C_1 < R$ ise çatlak ilerlemesi yok,

$C_1 > R$ ise kararsız çatlak ilerlemesi var, demektir.

3.2.1.1 Griffith Teorisi

1920 yılında ideal gevrek cisimler için Griffith tarafından ortaya konulan teoridir. Bu teorideki kriterler kırılma mekaniğinin temelini oluşturmuştur. Griffith cisimlerin küçük çatlaklar içerdiğini ve bir çatlağın büyümesi sırasında serbest kalan elastik enerjinin yeni yüzeylerin oluşması için gerekli olan enerjiye ya eşit ya da daha fazla olması halinde çatlakta ilerleme olacağını savunmuştur. Camların mukavemeti üzerine çalışma yaparken kullandığı numunelerde cam boyundaki değişikliklerin mukavemeti azalttığını gözlemlemiştir. Bu azalmanın malzemedeki kusurlardan kaynaklandığını savunmuştur. Çünkü malzeme büyüdükçe hasar çıkma olasılığı artmaktadır.



Şekil 3.5 Merkezi çatlak içeren bir malzemedeki şematik çatlak görünümü

Böylece Griffith “ Bir çatlağın büyümesi ancak bu sırada serbest kalan elastik enerjinin yeni yüzey yaratmak için gerekli yüzey enerjisine eşit veya daha fazla olması halinde gerçekleşebilir” kriterini oraya koymuştur. Matematiksel olarak bu kriter

(3.1)

$$\frac{\partial(\Delta U_E)}{\partial(2a)} \geq \frac{\partial(\Delta U_Y)}{\partial(2a)}$$

Şeklinde ifade edilebilir. Burada ΔU_E Elastik enerji ve ΔU_Y Yüzey enerjisidir. $2a$, merkezi çatlak boyutudur. Griffith'in bu kriterini göz önüne alarak oluşturduğu denklemi inceleyecek olursak; malzemede bulunan çatlak ne kadar büyükse elastik enerji o kadar küçüktür. Örneğin standart bir malzeme için elastik enerji denklemi, $2a$ boyunda çatlığa sahip olan malzemenin elastik enerji denklemleri ile karşılaştırıldığında elastik enerjide azalma görülebilmektedir.

$$U_E = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (3.2)$$

$$U_E = \frac{\pi a^2 \sigma^2}{E} \quad (3.3)$$

U_E :Elastik enerji

σ : Gerilme

E : Elastisite modülü

a : Çatlak boyu (mm)

Griffith denklemine göre çatlak boyu ile kırılma gerilmesi birbirleri ile ters orantılıdır.

$$\sigma_f = \left(\frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

σ_f : Kırılma Gerilmesi

γ : Yüzey Enerjisi

E :Elastisite Modülü

a :Çatlak Boyunun Yarısı (mm)

2a uzunluğunda bir çatlak oluşması için gerekli yüzey enerjisi ΔU_y ile gösterilirse;

$\Delta U_y = 2 \cdot 2a \cdot \gamma$ olarak verilebilir.

Griffith denkleminde açığa çıkan enerji miktarı, G parametresi ile tanımlanmakta, ve yüzey olan γ ile denge durumunda $G_c = 2\gamma$ şeklinde bir eşitliğe sahiptir. Bu eşitlik ile denklem

$$\sigma_f = \left(\frac{E \cdot G_c}{\pi \cdot a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

şeklinde yazılabilir.

Bünyesinde 2a uzunluğunda çatlak içeren birim kalınlıktaki sonsuz bir levhayı ele alacak olursak, çatlağın ilerlemesi için zorlayıcı faktör açığa çıkacak elastik enerjidir. Yukarıda da bahsedildiği üzere açığa çıkan enerji miktarının G_c değerini (kritik değer) aşması halinde çatlak ilerler ve kırılma oluşur. Enerji ile gerilme şiddeti faktörü arasındaki bağlantı (LEKM) açısından incelendiğinde aşağıda verilmektedir.

$$G = \frac{K^2}{E^*} \quad (3.6)$$

E^* : Elastik modülü olup, burada düzlem gerilme için $E^* = E$, düzlem şekil değiştirme için

$$E^* = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (3.7)$$

verilmektedir.

Griffith yaklaşımı, Hollomon ve Zener metalik yapıdaki malzemelerin gevrek kırılmalarına uygulamayı denemişlerdir. 1944 yılında yapılan bu denemede Griffith yaklaşımının metallerde doğrudan kullanılamayacağı anlaşılmıştır. Çünkü oluşan kalıcı şekil değişikliği, Griffith yaklaşımında her çeşit malzemeye göre sabit bir katsayı değeri olarak yaklaşıma dahil edilmesi uygun değildir. (Griffith, 1921)

3.2.1.2 Irwin Teorisi

Yine lineer elastik kırılma mekaniği kapsamında diğer bir faktör olan K parametresi incelenmektedir. K değeri “gerilme şiddeti faktörü” olarak adlandırılır. Ve çatlak ucundaki elastik alanın davranışını tarif eder.

$$K = \sigma \beta \sqrt{\pi a} \quad (3.8)$$

Bu bağlantıdaki β şekil değiştirme faktörüdür ve çatlak geometrisine göre değişmektedir. K değeri kritik K_c değerine ulaştığında kırılma gerçekleşir ve bu değere “ Kırılma Tokluğu “ adı verilmektedir. Yani malzemenin kırılmaya karşı gösterdiği dirençtir. Birimi $MPa\sqrt{m}$ 'dir. Denklemi 3.9'daki gibidir.

$$K_c = \sqrt{E \cdot G_c} \quad (3.9)$$

Gerilme şiddet faktörü olan “ K ”, çatlağın geometrik şekli ve gerilme durumu ile bağlantılıdır. Malzemenin özellikleri ile bağlantısızdır. Kırılma tokluğu olan “ K_{IC} ve K_{IIC} ” parametreleri, gerilme şiddet faktörü olan “ K_I “ aksine malzeme özelliğiyle ilgilidir. Eğer “ $K_I=K_{IC}$ veya $K_{II}=K_{IIC}$ “ durumu sağlanırsa çatlak ilerlemeye başlar ve kırılma gerçekleşir.

Ayrıca, Irwin'in gerilme şiddet faktörü ile yapmış olduğu yaklaşım sayesinde malzemelerde oluşan gerilmeli korozyon çatlaması ya da yorulma çatlak ilerlemesi vb. kritik-altı çatlamlar tahmin edilebilir hale gelmesi sağlanmıştır. (Irwin ve Tada, Paris, New York, NY 10016)

3.2.2 Elastik Plastik Kırılma Mekanikliği (EPKM)

Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği (LEKM) yaklaşımı malzemelerin elastik koşullardaki hem çatlak ilerlemesini hem de kırılmayı hesaplayabilmek için geliştirilmiştir. LEKM yaklaşımı gevrek malzemeler için yapılması daha uygundur. LEKM yaklaşımı ile incelenen numunelerde çatlak ucunda oluşan plastik deformasyon ya sıfır ya da sıfıra yakın kabul edilir. İşte çatlak ucunda büyük ölçüde plastik deformasyona sahip malzemeler için Elastik Plastik Kırılma Mekanikliği (EPKM) geliştirilmiştir. EPKM yaklaşımında malzemedeki çatlak ilerlemesini tanımlayabilmek için çatlak ucu açılması (COD) ve J-integrali kavramları kullanılmaktadır. Bu kavramlardan J-integrali ile gerilme şiddeti arasında 3.10 'daki denklem bağlantısı mevcuttur.

$$J = \frac{K}{E^*} \quad (3.10)$$

E^* parametresi düzlem şekil değiştirme ve düzlem gerilme problemleri içerisinde sırasıyla düzlem gerilme durumunda ise;

$$E^* = E \quad (3.11)$$

şekil değiştirme durumunda ise;

$$E^* = \frac{E}{(1 - \nu)} \quad (3.12)$$

Eşitliği olarak ele alınmaktadır. Burada poisson oranı ν parametresi ile göstermektedir. Malzemedeki çatlak ucunda, çatlağın oluşturduğu ilerleme(yer değiştirme) miktarı doğrudan malzemenin plastik şekil değiştirme değeri ile ilgilidir. Bundan dolayı bu kavram kırılma kriteri olarak elastik plastik kırılma mekaniğinde kullanılmıştır.

3.2.3 Kırılma Modelleri

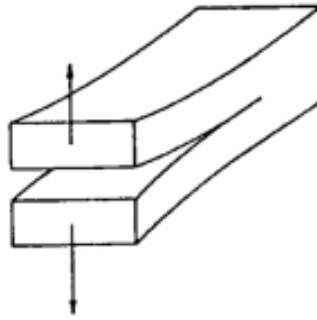
Şimdiye kadar çatlak yüzeyinin iki tarafından çatlağa dik yönde gerilme etkisiyle ayrılmaya zorlanması ele alınmıştır. Aslında gerilmeden kaynaklanan 3 çeşit kırılma söz konusudur. Bunlar sırası ile:

- Çatlak açılma deformasyon tipi (Mod I)
- Çatlak kayma deformasyon tipi (Mod II)
- Çatlak yırtılma deformasyon tipi (Mod III)

Bunların içinde en önemlisi Çatlak açılma deformasyon tipi (Mod I)'dir. Kırılma bakımında en tehlikeli olanıdır.

3.2.3.1 Çatlak açılma deformasyon tipi (Mod I)

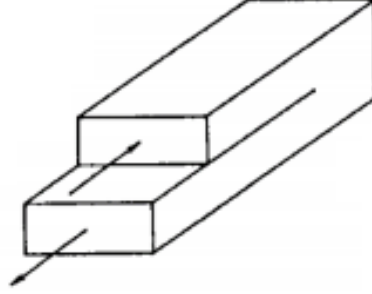
Mod-I çatlak açılma deformasyon tipinde, gerilme kuvvetinin normal bileşeni çatlak yüzeyine dik olarak etkiler. Y ekseninde doğrultusunda etki eden kuvvet ile malzemece açılma meydana gelir ve çatlak ilerler. Kırılma modları içerisinde en önemlisidir. Bu yüzden en çok incelenendir. Farklı malzemelerde belirlenen K_c değeri bu yükleme modunda K_{Ic} olarak adlandırılır.



Şekil 3.6 Mod I şematik gösterimi (Gülmez, 2018)

3.2.3.2 Çatlak Kayma Deformasyon Tipi (Mod II)

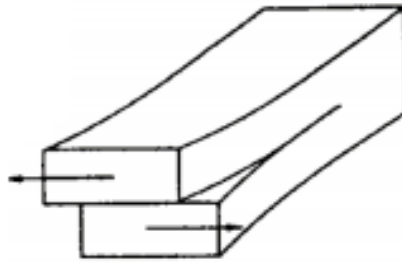
Mod II çatlak kayma deformasyon tipinde, malzemeye uygulanan gerilme kuvveti çatlakta kayma etkisi yapması durumudur. Gerilme kuvvetinin çatlağa etkisi x yönündedir.



Şekil 3.7 Mod II şematik gösterimi (Gülmez, 2018)

3.2.3.3 Çatlak Yırtılma Deformasyon Tipi (Mod III)

Mod III çatlak yırtılma deformasyon tipinde, malzemeye uygulanan gerilme kuvveti aynen Mod II de olduğu gibi kayma etkisi yapmaktadır. Ancak bu kayma etkisi z eksenine doğrudur.



Şekil 3.8 Mod III şematik gösterimi (Gülmez, 2018)

BÖLÜM DÖRT

METOD VE METODOLOJİ

4.1 İmalat metotları

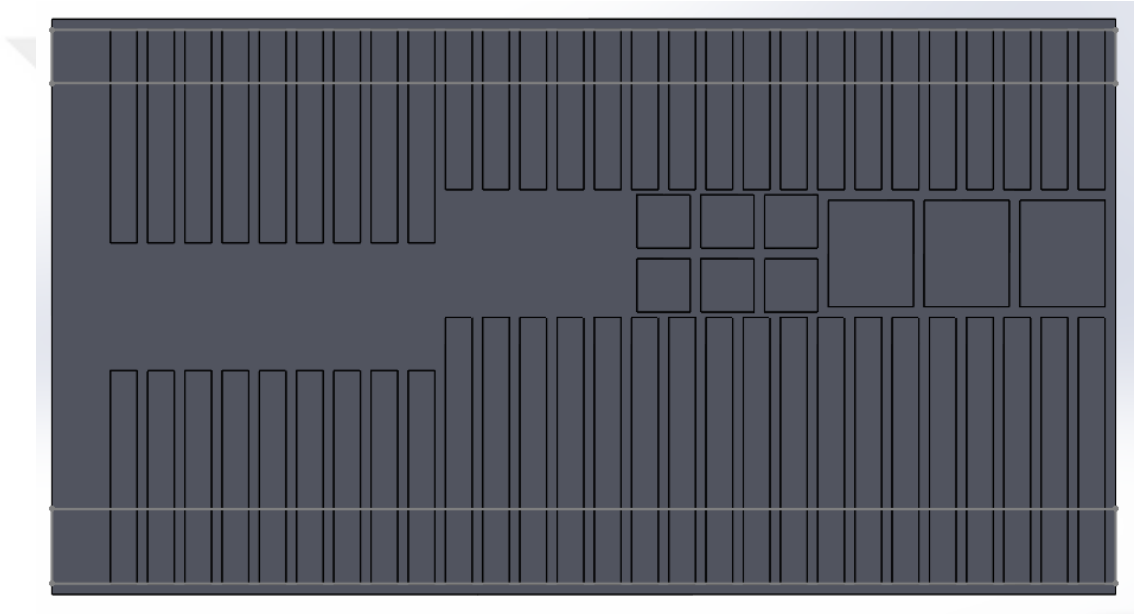
Günümüzde yaygın olarak kullanılan iki ana üretim yöntemi olan vakum infüzyon ve el yatırma yöntemleri çalışmanın ana kriterini oluşturmaktadır. Kompozit üretim yöntemlerinde bahsedilen birçok metot özel şartlar için geliştirilmiştir. İki ana yöntem bu çalışmada aynı ürün üretiminde kullanılmıştır. Hangisinin daha uygun olacağının tercih edilmesinde dayanıklılık, üretim kolaylığı, üretim adet vb. birçok etken yer almaktadır ve ürünün mukavemeti bu etkenler arasında ön plandadır ve mukavemeti, kırılma mekaniği üzerinden incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.1 El yatırma ve vakum infüzyon yöntemi ile üretim yapılırken dikkat edilen şartlar

EL YATIRMA YÖNTEMİ		VAKUM İNFÜZYON YÖNTEMİ
İMALAT	İmalat Ortam Sıcaklığı	20° - 25°
	Epoxy Miktarı	%79
	Sertleştirici Miktarı	%21
	Ortam Basınç	1 Bar(Pres Altında)
		1 Bar(Vakum Altında)
KÜRENDİRME	Kür. Süresi (Basınç Altında)	24 Saat (Preste)
	Kür. Süresi (20° - 25° Sıcaklığında)	24 Saat
	Kür. Isıl İşlem	Var
	Kür. Isıl İşlem Sıcaklığı	80°
	Kür. Isıl İşlem Süresi	8 Saat (Fırında)

El yatırma ve vakum infüzyon üretim yöntemi ile üretilen numunelerde teflon kullanılarak kusurlu imalat gerçekleştirilmiştir. Böylece meydana gelen kusurların kırılma mekaniği çerçevesinde incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

Hem el yatırma hem de vakum infüzyon yöntemlerinin karşılaştırılmasının sağlıklı ve doğru bir şekilde olması için aynı malzemelerin yanı sıra üretim ortamının ve numunelere uygulanan işlemlerin de aynı olması oldukça önemlidir. Aynı reçine, elyaf köpük kullanılarak üretilen numunelerin üretim koşulları ve kütleme koşulları Tablo 4.1’deki verilmektedir.



Şekil 4.1 Testler için kesim planı hazırlanmış olan taslak

Üretim şartlarının birbirlerine yakın tutabilmesi elde edilecek deney sonuçlarının sağlığı açısından gerekli görülmektedir. Tüm işlemler tamamlandıktan sonra solidwork ortamında test numunelerinin ebatlarına göre Şekil 4.1’deki gibi kesim şablonu hazırlanmıştır ve üretilen sandviç plakalar numune ebatlarına göre su soğutmalı testere yardımıyla yavaş kesilerek hazırlanmıştır. Çünkü hızlı kesim sırasında numunelerin ve kusurlu bölgelerin hasar görmesi muhtemeldir ve kusurlu bölgeler Şekil 4.1’deki solid görünümün üst ve alt kısmında gri renkte gösterilen teflon döşenmiş dikdörtgen şeklindeki bölgelerdir ve bu bölgeler başlangıç çatlağı(ön çatlak) olarak algılanmaktadır.

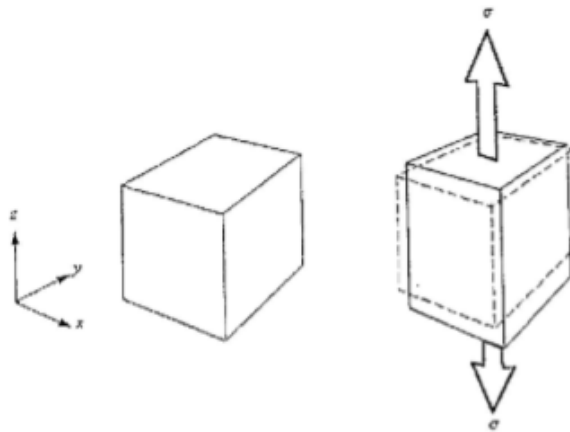
4.2 Mekanik Test Metotları

Mekanik testlerin geniş bir test yelpazesi vardır. Malzemenin statik yüklere dayanma kapasitelerinin belirlenmesinde çekme ve basma deneyleri tercih edilmektedir. Statik yükler ile kalıcı şekil değiştirmelere karşı malzemenin direnci hakkında veri elde edilmektedir. Darbe deneyi ise malzemelerin darbe neticesinde zorlanmalarını incelemektedir. Malzeme ömrü tayini için değişken ve tekrarlı yükler altında deney yapılırken, malzeme yüzeyinin çizilmeye karşı dayanımı sertlik deneyleri ile takip edilmektedir.

Bu tezde üretim yöntemlerini karşılaştırırken gerilme kuvvetlerindeki farklılıkları inceleyebilmek için yaygın kullanılan çekme, basma ve yan basma deneyleri tercih edilmiştir.

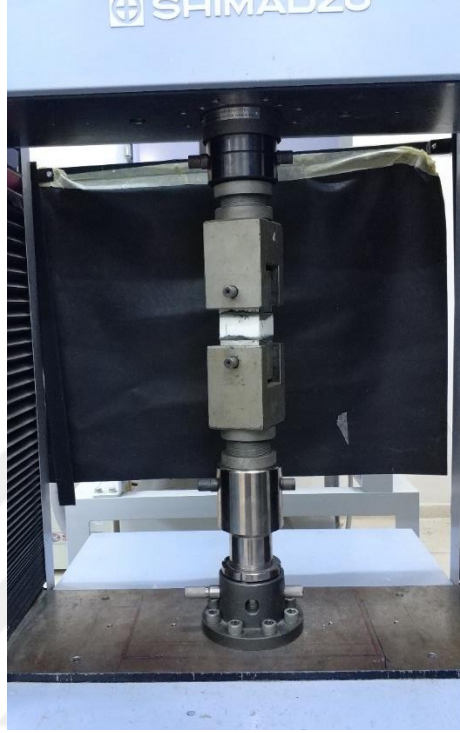
4.2.1 Çekme deneyi

Malzemelerin mekanik davranışlarını ve özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan en yaygın mekanik test yöntemi çekme deneyi yöntemidir. Çekme deneyi, standartta uygun boyutlarda hazırlanmış olan numunelerin, sabit hızda, sabit sıcaklıkta ve tek ekseninde uygulanan statik yükleme sayesinde numunenin kopuncaya kadar çekme işleminin uygulanması esasına dayanır.



Şekil 4.2 Çekme testi esnasında numunede meydana gelen değişimin şematik gösterimi (Google, 2018)

Çekme deneyinde ende daralma meydana gelirken boyda uzama oluşur. Sünek malzemelerde bu değişim fazla olurken gevrek malzemelerde az olur. Endeki daralma statik kuvvete yenilince kopma meydana gelir.



Şekil 4.3 Çekme cihazı ve numune (Kişisel arşiv, 2018)

Çekirdek üzerinde oluşan düz çekme mukavemetini hesaplayabilmek için ASTM C297 / C297M'ye (ASTM) standardına göre her iki üretim yönteminden 3'er adet numune hazırlanıp test edilmiştir. 50 mm x 50 mm ebatlarındaki numuneler Şekil 4.3'te verilen ve uluslararası bir test cihazı olan Shimadzu AG-100 de teste tabi tutulmuştur.



Şekil 4.4 Çekme testi sonrası numuneler (Kişisel arşiv, 2018)

Yükleme neticesinde numunelerin kopma anına kadar olan kuvvet değerleri test cihazından takip edilip kaydedilmektedir. Numunelerin en zayıf yeri olan çekirdekteki kopma anında ortaya çıkan maximum kuvvet değeri alınarak denklem 4.1 yerine konularak çekme değeri hesaplanır.

$$\sigma_z = \frac{P_{max}}{A} \quad (4.1)$$

Yapılan testler sonucunda altı numunenin de maksimum çekme değerleri kaydedilmiş olup, bunlardan el yatırma yöntemi ile üretilen numunelerde oluşan kuvvetin ortalama değeri 2665N vakum infüzyon ile üretilen numunelerin ise 3974N olarak ölçülmüştür. Denk.4.1 de yerine yerleştirildiğinde çekme gerilmesi olan σ_z el yatırma için 1.06 Mpa vakum infüzyon için 1.56 Mpa dır.

4.2.2 Basma deneyi

Numunede ezilme veya boyunda kısalma meydana gelmesini sağlayan basma yükü altında yapılan deneye basma deneyi denir. Çekme ve basma deneyleri benzer sistemlerdir. Basma deneyinde tıpkı çekme deneyindeki gibi sabit sıcaklık, hız altında tek doğrultuda malzemeye uygulanan statik bası kuvvetinin değeri ölçülmektedir ve her iki deney de aynı test cihazında gerçekleştirilmiştir.

Basma deneyinde çekme deneyinin tersine numunenin eninde(kesitinde) artış görülürken boyunda azalma olur. Basma deneyi bilhassa gevrek ve yarı gevrek malzemelerin sünekliğinin hassas bir şekilde belirlenmesinde kullanılmaktadır. (Pürçek G. 2014) Ayrıca kare, yuvarlak veya dikdörtgen kesitli numuneler de bu deney esnasında kullanılabilir.

Çekme deneyinde olduğu gibi çekirdeğe uygulanan basma kuvveti ASTM C365/C365M standartlarına uygun olarak hesaplanabilmesi için üretilen malzemelerden 3'er adet 50mm X 50mm numune hazırlanmış ve basma deneyleri uluslararası test cihazı olan Shimadzu AG-100 de gerçekleştirilmiştir.

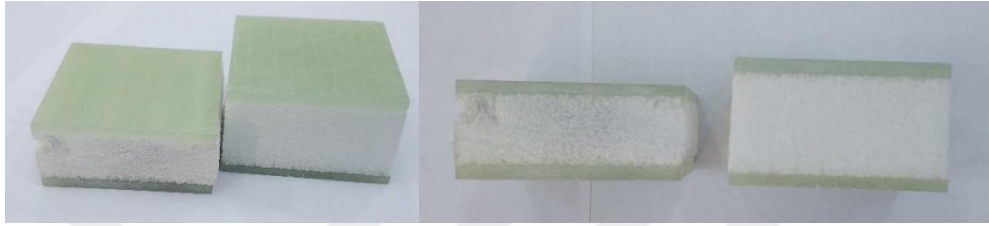


Şekil 4.5 Basma deneyi düzeneği ve Shimadzu test cihazı (Kişisel arşiv, 2017)

Yükleme yapıldıktan sonra numunenin kopma anındaki kuvvet değerlerine kadar olan değerler test cihazından izlenmekte ve kaydedilmektedir. Deney belirlenen minimum yüksekliğe kadar numunelere, basma kuvveti uygulanarak yapılmaktadır. Bütün numuneler için aynı konumdaki maksimum kuvvet değeri ölçülüp, maksimum

kuvvet değeri alınarak denklem 4.2 de yerine konulmak suretiyle çekme değeri hesaplanmıştır.

$$\sigma_z = \frac{P_{max}}{A} \quad (4.2)$$

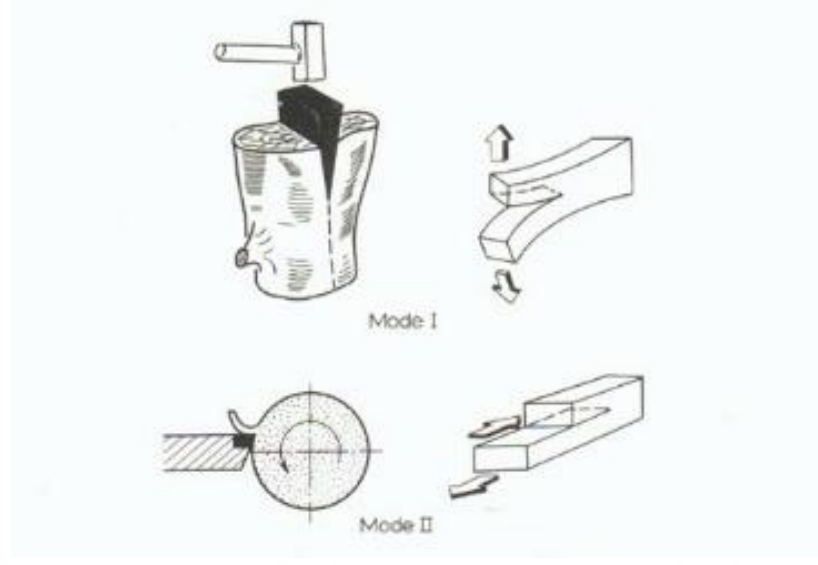


Şekil 4.6 Basma deney numuneleri test öncesi ve sonrası (Kişisel arşiv, 2017)

Yapılan testlerin sonucunda altı numunenin de maksimum basma değerleri alınmış, bunlardan el yatırma yöntemi ile üretilen numunelerde oluşan kuvvetin ortalama değeri 3378N vakum infüzyon ile üretilen numunelerin ise 4073N olarak ölçülmüştür. Denk.4.2 de yerine yerleştirildiğinde basma gerilmesi σ_z el yatırma için 1.35Mpa vakum infüzyon için 1.65 Mpa'dır.

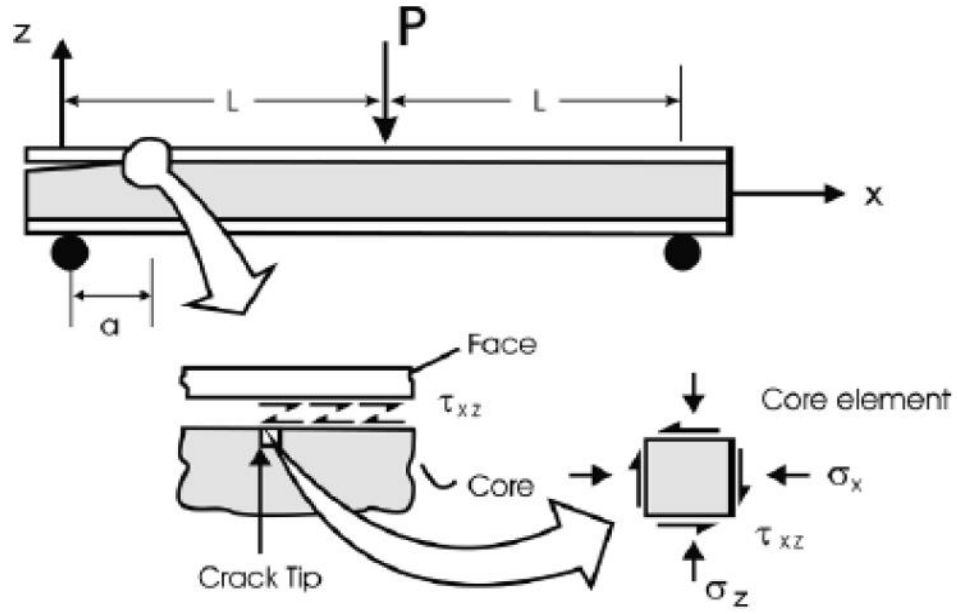
4.3 Tabakalar Arası Kırılma Tokluğu Metodları

Kompozit yapıya sahip malzemelerde tabakalar(katmanlar) arasında kalan bölgenin dayanımı hakkında bilgi sahibi olmak için kullanılan iki genel yöntem vardır. Ara yüzeydeki gerilme değeri çatlak ilerlemesi için gerekli olan değerlere ulaştığında ara yüzeylerde ayrılma gözlemlenir. Çatlak ilerlemesi için uygulanan bu gerilme eğer tabaka yüzeyine dik ise çatlak açılma deformasyonu (Mod I), tabaka yüzeyine paralel ise çatlak kayma deformasyonu (Mod II) meydana gelir.



Şekil 4.7 Mod I ve Mod II yüklemelerinin şematik gösterimi ve örnekleri (Google, 2018)

Mod I yüklemesi ile iki tabaka arası açılmaya zorlanmaktadır. Mod II yüklenmesinde ise iki tabaka birbirleri üzerinde kayma çalışmaktadır. Her iki modun aynı anda ortaya çıktığı karışık mod durumları gözlemlenebilmektedir. Tabakalı olarak imal edilen kompozitler için tabakaların arasındaki çatlağın ilerlemesi ile tabakaların ayrılmasını ve dolayısıyla açığa çıkan enerji miktarını tespit etmek ve buna bağlı olarak kırılma tokluğu hesaplamalarının yapılmasını sağlamak ana hedefler içerisinde yer almaktadır. Elde edilen bu değer tasarlanan tabakalı kompozitler için en önemli parametredir. Kompozitlerde Mod-I durumundaki ara yüzey kırılma tokluğu, iki yapışan yüzeylerin arasındaki bölgenin deformasyonunu ve kırılma davranışı hakkında bilgi edinilmesi sağlanmaktadır (Davies ve diğer., 1989; Palley, 1990; Zulkifli, 2009).



Şekil 4.8 Çatlaklı sandviç kiriş testi ve çatlak ucunun yakınındaki gerilme durumu (Leif, Carlsson ve Kardomateas, 2011)

Bu çalışma da hem el yatırma hem vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiş olan malzemeler için kırılma tokluğu parametresi Mod II yüklemesi için incelenmiştir. Bu yöntemlerde iki mod yüklemesinin birbirine karışmasını önlemek amacıyla tercih edilen yöntemleri kullanarak ilgili aparat geliştirilmiştir.

ASTM test standartları çerçevesinde farklı uzunluk ve ön çatlak boyutlarına sahip farklı üç numune hem vakum infüzyon hemde el yatırma yöntemi için hazırlanarak SHİMADZU test cihazına bağlanarak Mod I ve Mod II deneyleri gerçekleştirilmiştir.

4.3.1 Mod I Yüklemesi, Test Yöntem

Mod I Yüklemesinde; çatlak yüzeyine dik yönde gerçekleşmekte ve çatlağın ilerlemesi ve bu esnada açığa çıkan enerji miktarı hesaplanmaktadır. Çekme işlemi esnasında bölgesinde meydana gelebilecek kayma, bükülme, ve eğilme gibi kuvvet etkileri minimuma indirgenmektedir.

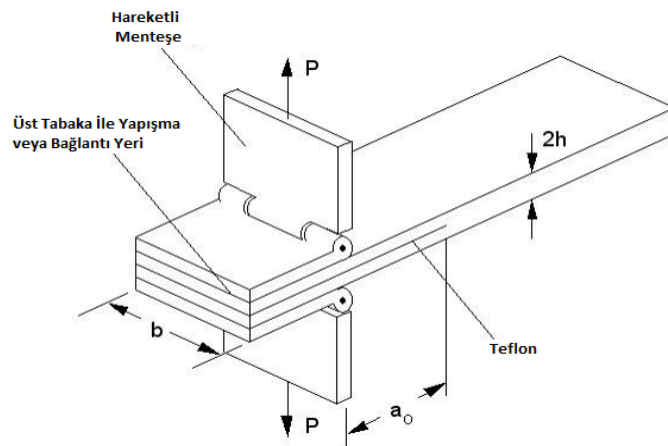
Mod I yüklemesi için kullanılabilecek test yöntemleri:

- Çift konsol kiriş testi (DCB)
- Modifiyeli çift konsol kiriş testi (MDCB)
- Tek kenar çatlaklı kiriş testi (SCB)
- Üç nokta eğme deney yöntemi (TPF)

4.3.1.1 Çift Konsol Kiriş Testi (DCB) Test Yöntemi

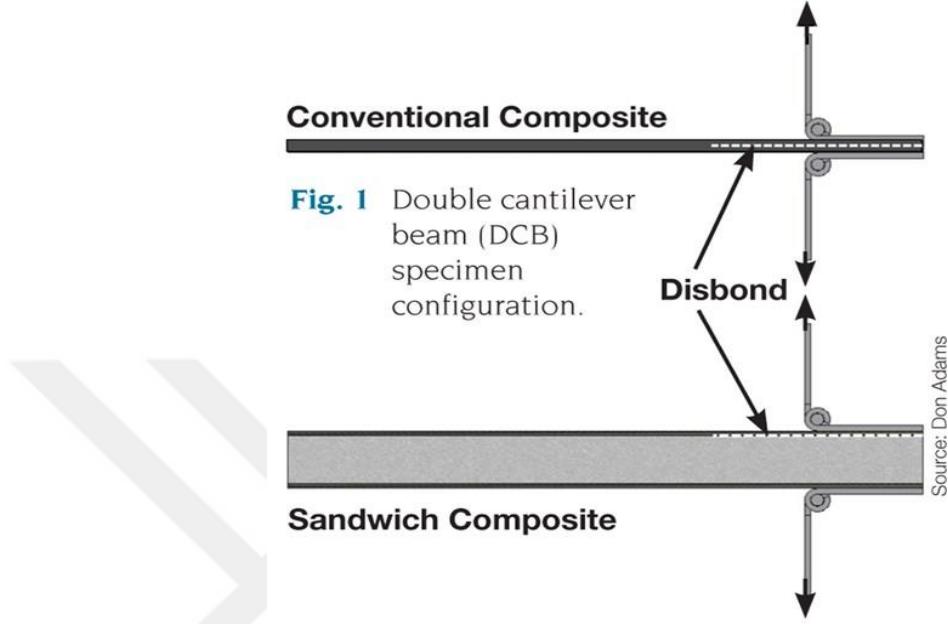
Numuneler hazırlanırken birbirine yapıştırılmış katmanların(malzemelerin) hasar çalışmalarını incelemek için geliştirilen ve daha sonrasında kompozit malzemelerde delaminasyon çalışmalarına uyarlanan DCB test metodu, tabakalar arası Mod I kırılma tokluğunun incelenmesi ve deneysel olarak sonuçların elde edilmesi için kullanılan test metodu olmuştur.

Tabakalar arası bölgenin kalınlık doğrultusundaki zorlanmalar altında zayıflığının bilinmesi sebebiyle önemli olan bir deneydir. (Korkut, S. 2017) Üst üste yapıştırılmış olan iki kompozit kirişin serbest ucuna bağlanan menteşeler yardımıyla Şekil 4.9’da görüldüğü gibi iki kiriş arasındaki delaminasyon bölgesi ayrılmaya zorlanarak delaminasyon incelenir.



Şekil 4.9 Çift konsol kiriş testi (DCB) konfigürasyonu (Toygar ve İzdar, 2012 Tezinden eklenerek değiştirilmiştir)

Çift konsol kiriş testi, şekil 4.10’da gösterildiği gibi geleneksel kompozit DCB numunesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu geleneksel DCB numune Konfügürasyonu bir sandviç kompozite de şekil 4.11’de görüldüğü gibi uyarlanmıştır.



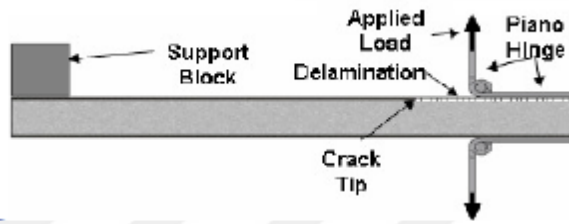
Şekil 4.10 Çift konsol kiriş testinin (DCB) sandviç kompozit numune ile geleneksel numune konfigürasyonunun gösterimi (Adams, Kessler, Kuramoto, Bluth, Weaver ve Gill, 2010)

Deneyleri gerçekleştirilecek olan numunenin imalatı yapılırken tabakalar arasında çatlak olacak şekilde teflon malzeme kullanılarak kusurlu imalat yapılmış ve numune hazırlandıktan sonra ara yüzeyde kusur oluşturulmuştur. Numunenin kusurlu olan taraftaki alt ve üst yüzeylere, yüzeyler iyice temizlendikten sonra menteşe yapıştırılmıştır. Menteşeler yardımıyla malzeme çekilerek Mod I yüklemesine maruz bırakılmıştır.

Çatlağın bulunduğu alt ve üst yüzey tabakalarının farklı kalınlıklarda olması nedeniyle bu tabakalara yapıştırılmış olan menteşelere dik yönde uygulanan kuvvetin çatlak ilerlemesi esnasında DCB numunelerinde moment oluşumuna sebep olabileceğinden ve mixed-mod durumu gerçekleşeceğinden DCB testi tercih edilmemiştir.

4.3.1.2 Modifiyeli Çift Konsol Kiriş Testi Yöntemi (MDCB)

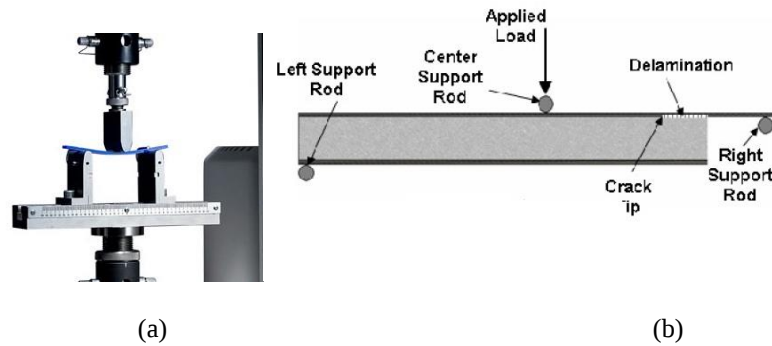
Momentin etkisini yok etmek için DCB test metodunun yerine geliştirilmiş olan MDCB testi, özellikle tercih edilmiştir. Mod II'ye sebep olan alt ve üst yüzeylerin çatlak yüzeyine olan mesafelerindeki farklılığın etkisini azaltmak için numunenin kusursuz tarafının üst yüzeyine destekleyici bloğun ilave edildiği test metodudur. Destekleyici blok(support block) sayesinde azaltılan Mod II'nin etkisi yeterince azaltılamamaktadır.



Şekil 4.11 Modifiyeli çift konsol kiriş testi yöntemi (MDCB) (Adams, Kessler, Kuramoto, Bluth, Weaver ve Gill, 2010)

4.3.1.3 Üç Nokta Eğme Deney yöntemi (TPF)

Üç nokta eğme numunesi mesnetler üzerine oturmakta ve 3 noktadan temas etmektedir. İki destek noktası ve bir adette kuvvetin etki ettiği nokta mevcuttur (Bakınız şekil 4.13).



Şekil 4.12 Üç nokta eğme yöntemi (TPF) a) Üç nokta eğme aparatı (Instron, 2017) b) Üç nokta şematik gösterimi (Adams, Kessler, Kuramoto, Bluth, Weaver ve Gill, 2010)

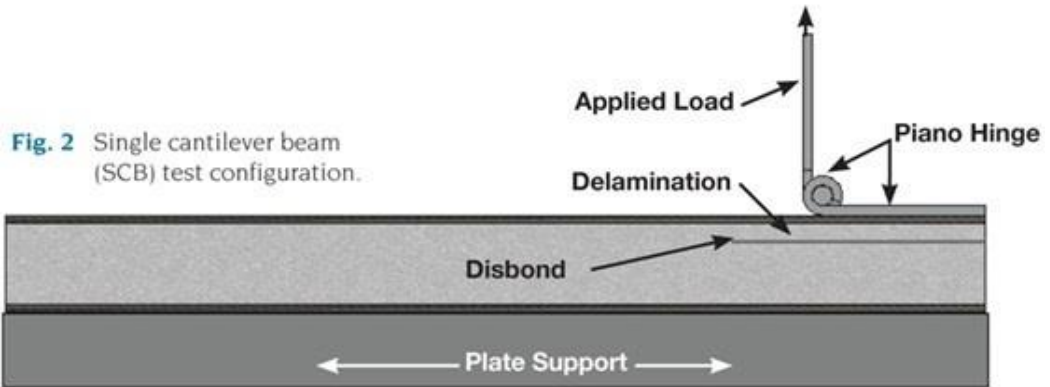
Üç nokta eğme Standart üç nokta eğme testiden biraz daha farklıdır. Alt mesnetlerin yükseklik konumları farklıdır. Biri alt plaka ile temas halindeyken diğeri üst plaka ile

temas halindedir. Sabit mesnetlerin ayrı ayrı alt ve üst tabakalara temas etmesinden dolayı kuvvet uygulanmaya başlandığında tabakalar arası açılma gözlemlenir. Ancak üstteki noktadan kuvvet uygulanmaya başlandığında malzemedeki bükülme durumu azda olsa Mod II'nin de oluşmasında olanak sağlamaktadır.

Üst tabakanın mesnette Şekil4.12'deki sağdaki şekildeki gibi temasta bulunabilmesi için hem alt tabakanın hem de çekirdeğin kesilmesi gerekmektedir. Bu işlemler sırasında hazırlanan kusurlar veya numune zarar görebilir. Bu yüzden her ne kadar Mod II minimize edilmiş olsa da standart bir test metodu için uygun olmamaktadır.

4.3.1.4 Tek Kenar Çatlaklı Kiriş Testi Yöntemi(SCB)

Sandviç kompozitlere uygulanan DCB test yönteminde meydana gelebilecek sorunlar ve yukarıda izah edildiği üzere moment etkisi nedeniyle, araştırmacılar, alternatif yöntemleri tercih etmişlerdir. Yapılan araştırmalar neticesinde tek kiriş testi (SCB) testi bu çalışmada da tercih edilmiştir (Adams, Kessler, Kuramoto, Bluth, Weaver ve Gill, 2010).



Şekil 4.13 Tek kenar çatlaklı kiriş testi (SCB) (Adams, Kessler, Kuramoto, Bluth, Weaver ve Gill, 2010)

DCB test yönteminin aksine burada iki menteşe yerine tek menteşe kullanılır. Numunenin tüm alt yüzeyi komple alt tablaya sabitlenir ve üst yüzeydeki kusurlu tarafta menteşe bağlanır. Numune menteşeden dikey bir şekilde çekilmeye başlanır. Ve çatlak büyümesi esnasında dikey yönü korumak için menteşenin hareketliliğinden

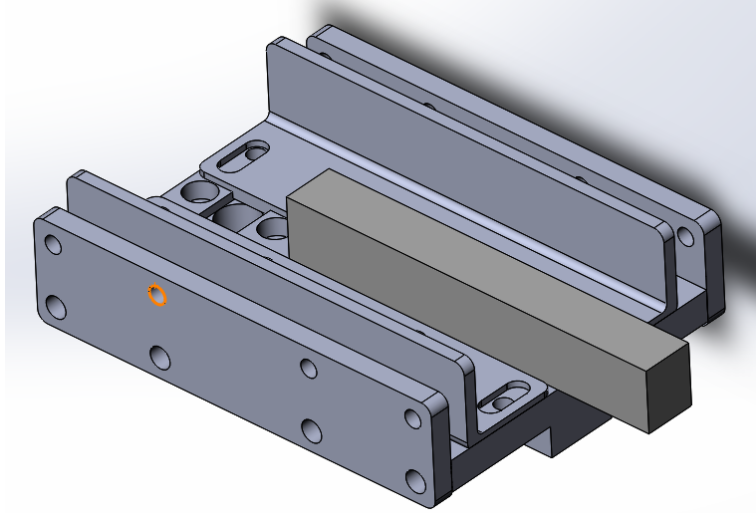
yararlanılır. Alt tabaka sabit olduğu için çekilme işlemi uygulanırken kuvvetin moment etkisi minimize edilmiştir. Standartlara uygun bir test yöntemidir. Sandviç kompozitler de Mod I hesabı için geliştirilen yöntemler arasında en çok tercih edilen yöntemdir.

Neden SCB?

- Test esnasında ana ve alt yüzeydeki bükülme deformasyonunu önlemek için alt yüzey ile alttaki destek plakası birbirlerine yapıştırılmıştır (Bakınız Şekil4.13).
- Kayma gerilmesi Mod II'yi minimize etmekte ve % 5 ten daha az bir etkiye sebep olmaktadır. Bu sayede uygulanan gerilmenin büyük bir etkisi Mod I olarak etki etmektedir.
- Alt tabakanın yapıştırılmasından dolayı sandviç kompozit malzemenin çekirdeğinde önemli bir eğilme oluşmamaktadır.
- DCB testi yapılacak olan numunelerde üst ve alt tabaka kalınlıkları aynı olması önemlidir. Sandviç kompozitler de görüldüğü üzere iki tabaka aynı değildir. Bu da malzemenin bükülmesine sebep olmaktadır. Mod I'in içerisinde Mod II'nin karışmasına sebep olur.

SCB testinin aparat imalatı:

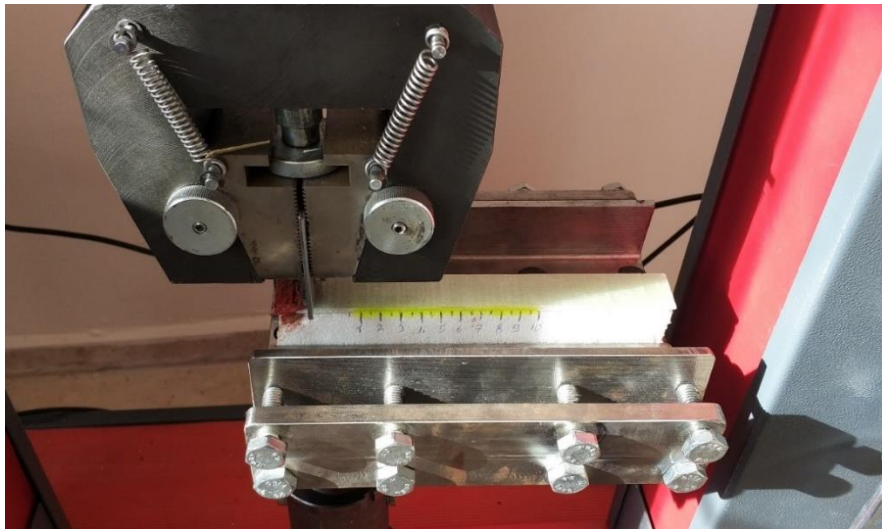
SCB testinin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için numunenin alt yüzeyi Şekil 4.13'de olduğu gibi sabitlenir. Bu sabitleme genellikle yapıştırma ile yapılmaktadır. Bu çalışmada yapıştırma sistemi yerine Solidwork ortamında tasarlanan ve Şekil 4.14'te görüldüğü gibi hem numunenin sabitlendiği hem de aparatın test cihazına sağlıklı bir şekilde bağlantısının sağlandığı bağlantı elemanı tasarlanmıştır.



Şekil 4.14 SCB testi için imal edilen aparatın solid çizimi

Solidworks'teki tasarımına göre SCB testi aparatının imalatı yapılmıştır. Bu aparat sayesinde numunenin alt tabakası, yandaki köşebentlerin cıvata yardımı ile parçayı sıkıştırması sonucunda sabitlenmekte ve aparatın üzerindeki slotlar sayesinde farklı genişlikteki numunelere kolaylıkla bağlanabilmektedir.

Tasarlanan aparat (Şekil 4.14) ile test cihazı arasındaki bağlantı şekil 4.15'de görülen siyah parça yardımıyla yapılmaktadır. Yapılan aparat birçok test cihazına uygun tasarlanmıştır.

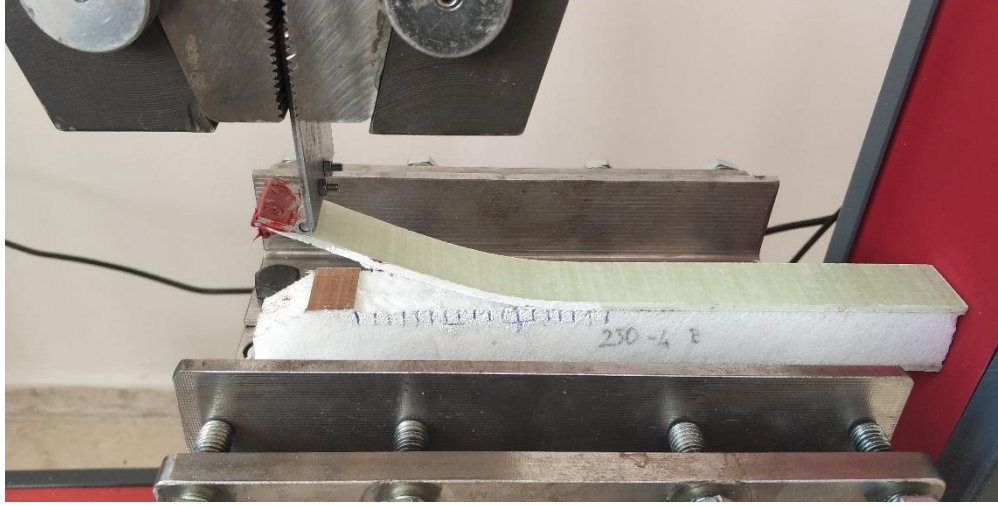


Şekil 4.15 SCB testi için imal edilen aparat ve test düzeneği (Kişisel arşiv, 2018)

Tasarlanan aparat (Şekil 4.15) ile hem numunenin her seferinde tabana yapıştırma işleminin zorluğu hem de cihaza bağlantı zorluğu ortadan kaldırılmıştır.

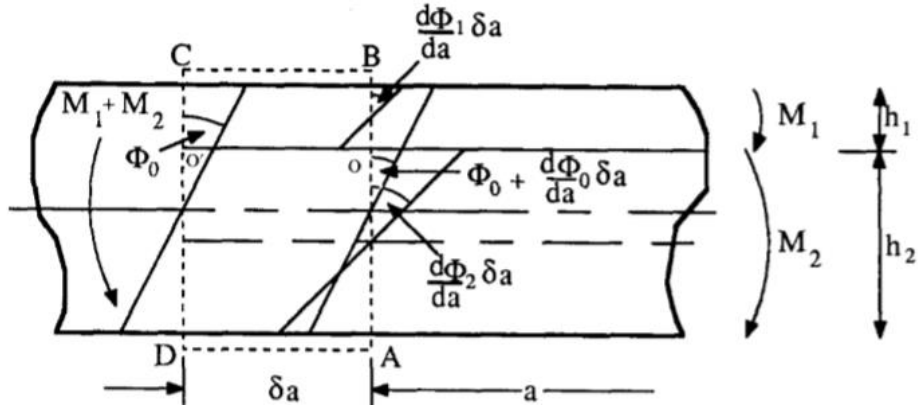
SCB test düzeneğinin hazırlanışı:

- Test aparatı ile bağlantı parçası test cihazına bağlanır.
- Numune üzerine çatlak ilerlemesinin izlenmesi için cetvel çizilir.
- Numunelerin üzerine yüzey iyice temizlendikten sonra menteşeler bağlanır. Çekme işlemine kolaylık olması için menteşelerin çekilen taraflarına birer plaka bağlanarak çekim çenelerinin tutma alanı arttırılır.
- Numune aparatın içerisine yerleştirildikten sonra önce üst çekme ile menteşe arasına konulan bir plaka (Şekil 4.16) yardımıyla sıkılıp sabitlenir. Plakanın Şekil 4.16'de görüldüğü gibi menteşe tarafı cıvata somun ile bağlıyken diğer tarafı çene dişleri arasına sıkıştırılır. Hem üst çene hem de alt aparata malzeme beraber bağlanmalıdır. Çekme işlemi yapılırken açılı bir çekim oluşmaması için bu aşamaya dikkat edilmelidir.
- Numune aparata sabitlenir. Bu sabitleme esnasında sağlıklı bir çekme olması için malzemenin ortalandığından emin olmak gerekir. Ortalama işlemi tamamlandıktan sonra sıkıştırma cıvataları iyice sıkılır. Sabitleme işlemi tam olarak yapılmamış olursa çekme esnasında malzeme sökülebilir veya kayabilir.
- Çekme çenesinin kuvvet ve deplasman sıfırlamaları yapılır.
- Sabit ve yavaş (0,5 mm/dk) hızda çekme işlemi yapılır.
- Numunelerdeki kırılma adım adım meydana geliyorsa bir kamera ile takip etmek daha sağlıklı olur.
- Açığa çıkan enerji miktarını hesaplayabilmek için çatlağın ilerlemesi esnasındaki kuvvet değerinin kaydedilmesi ve takip edilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.16 SCB testi çatlak ilerlemesinin görünümü (Kişisel arşiv, 2018)

Test aparatına şekil 4.16'deki gibi bağlanan numune 0,5 mm/dk sabit hızda çekilir. Çekilmenin etkisi ile deplasman artmaktadır ve bu yüzden çatlakta oluşan gerilme sonucunda şekil 4.16'de görüldüğü üzere çatlak ilerlemesi oluşur. Çatlak ilerlemesine sebep olan maksimum kuvvet değeri ölçülür. Bu değer, Mod I (çekme modu) yüklemesi neticesinde meydana gelen açığa çıkan enerji hesabı için Denklem 4.17'de bu maksimum kuvvet kullanılır.



Şekil 4.17 Moment etkisi ile çatlak ucu çevresi (Williams, 1987)

G'nin (Enerjinin) hesaplanması:

Açığa çıkan enerji miktarı (G) Denklem 4.4 kullanılarak ve Şekil 4.17'deki ABCD bölgesindeki OO' mesafesi göz önünde bulundurularak hesaplanabilir:

$$G = \frac{1}{B} \left(\frac{dU_e}{da} - \frac{dU_s}{da} \right) \quad (4.4)$$

burada U_s şekil değiştirme enerjisi, U_e dış kuvvetlerle yapılan işi temsil eder. Momentlerin etkisi ile eğilimdeki değişim

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{M}{EI'} \quad (4.5)$$

Şekil 4.17'de çatlakın O noktasından O' noktasına kadar ilerlemesi esnasında (Williams'ın 1987) üst ve alt kırışlerdeki açılma değişimi Denklem 4.6 a ve b'de verilmektedir. Bu denklemler sırasıyla;

$$\left(\frac{d\phi_1}{da} - \frac{d\phi_0}{da} \right) \delta a \quad (4.6a)$$

$$\left(\frac{d\phi_2}{da} - \frac{d\phi_0}{da} \right) \delta a \quad (4.6b)$$

Açıların çatlak ilerlemesine göre değişimleri

$$\frac{d\phi_0}{da} = \frac{M_1 + M_2}{EI_0}, \quad I_0 = \frac{B(2h)^3}{12} = 8I$$

$$\frac{d\phi_1}{da} = \frac{M_1}{EI_1}, \quad I_1 = \frac{Bh_1^3}{12} = \xi^3 I_0$$

$$\frac{d\phi_2}{da} = \frac{M_2}{EI_2}, \quad I_2 = \frac{Bh_1^3}{12} = (1 - \xi)^3 I_0$$

$$I = \frac{Bh^3}{12}, \quad \xi = \frac{h_1}{h_1 + h_2}$$

şekilde hesaplanır. Alt ve üst kirişlerin açılma değişiminin sonucunda açığa çıkan iş enerjisi

$$\delta U_e = M_1 \left(\frac{d\phi_1}{da} - \frac{d\phi_0}{da} \right) \delta a + M_2 \left(\frac{d\phi_2}{da} - \frac{d\phi_0}{da} \right) \delta a, \quad (4.7)$$

ifade edilir. Şekil değiştirme enerjisi ise,

$$\delta U_s = \frac{1}{2} \frac{M_1^2}{EI_1} \delta a + \frac{1}{2} \frac{M_2^2}{EI_2} \delta a - \frac{1}{2} \frac{(M_1 + M_2)^2}{EI_0} \delta a \quad (4.8)$$

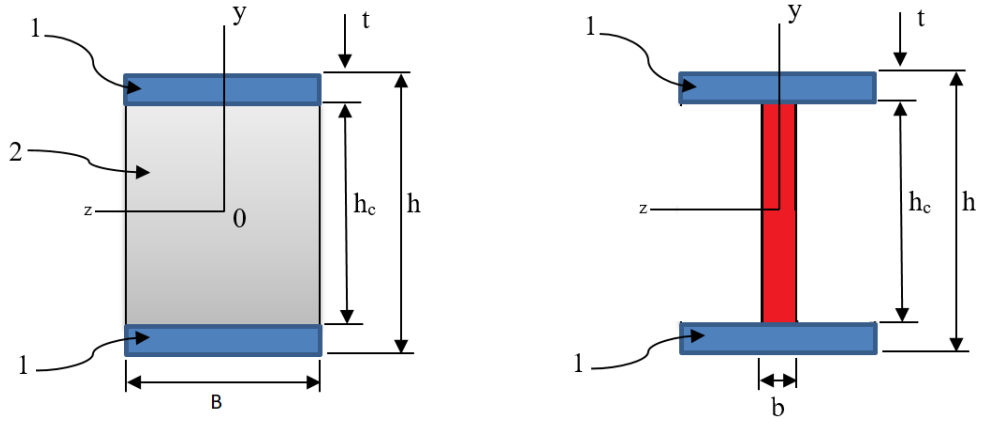
şeklindedir. Şekil değiştirme (Denklem 4.7) ve dış kuvvetlerin yaptığı iş (Denklem 4.8) enerji değişimlerinin denklemleri olan Denklem 4.4'te yerine konulmak suretiyle

$$G = \frac{1}{16BEA} \left[\frac{M_1^2}{\xi^3} + \frac{M_2^2}{(1-\xi)^3} - (M_1 + M_2)^2 \right] \quad (4.9)$$

şeklinde çatlak ilerlemesinde açığa çıkan enerjinin teorik denklemi bulunur. Hesaplanan enerji aslında $G = G_I + G_{II}$ şeklindedir. Denklem 4.9'daki denklem Mod I ve Mod II enerji denklemleri olarak

$$G_I = \frac{M_I^2}{BEI} \cdot \frac{(1+\psi)}{16(1-\xi)^3}, \quad G_{II} = \frac{M_{II}^2}{BEI} \cdot \frac{3(1-\xi)}{16\xi^2} (1+\psi) \quad (4.10)$$

şeklinde ayrılır. Denklem 4.10 numunelerin tek bir yapısal malzemeden olması halinde kullanılabilir aksi halde geçersizdir. O yüzden sandviç kompozitlerdeki dış tabakalar ile çekirdeklerin farklı malzemeden oluşması nedeniyle kompozit yapı tek bir malzemeye indirgenerek I-kesit elde edilir ve bütün denklem takımları Denklem 4.10 kabullerle Denklem 4.17'ye indirgenir.



Şekil 4.18 Sandviç kompozit şematik görünümü Epoxy-cam elyaf (1) Pvc köpük (2)

Testlerde kullanılan numunelerin kesitleri Şekil 4.18’de gösterilmektedir. Sistemin enerji denklemleri Şekil 4.17’deki yapıya uygundur. Burada tek bir malzemeden söz edilebilir ve DCB, SCB vb. testler bu sistemde gerçekleştirilebilir.

Öncelikle kesit alanı $A = bh$ ‘tır. Şekil 4.18’deki kesit görünümüne göre lamine ve çekirdek alanları

$$A_1 = Bt, A_2 = bh_c \quad (4.11)$$

şeklinde ifade edilir. Kompozit kirişlerde denge denklemi;

$$E_1 \int_1 \gamma dA + E_2 \int_2 \gamma dA = 0 \quad (4.12)$$

şeklinde yazılabilir. Sabit oran

$$n = E_2 / E_1 \quad (4.13)$$

şeklinde tanımlanır ve Denklem 4.13’ü Denklem 4.12’de yerine yerleştirilirse;

$$\int_1 \gamma dA + \int_2 n \gamma dA = 0 \quad (4.14)$$

denklemleri elde edilir. Bu sayede sandviç kompozit numunemiz tek bir malzemeye I-kesit şeklinde indirgenebilir. Tek malzemeden oluşan kirişimiz için Denklem 4.10'daki Mod I açığa çıkan enerji denklemini SCB testine uyarlayacak olursak

$$M_2 = -M_1 = Pa \text{ ise, } M_I = Pa, M_{II} = 0 \quad (4.15)$$

şeklinde elde edilir. Ayrıca Şekil 4.18'deki (Bakınız sy:57) sandviç kompozit numunenin dörtgen yapısının sadece cam elyaf-epoxy olacak şekilde I-kesit yapıya çevrimden dolayı

$$I = \frac{Bh^3}{12} \text{ yerine } I = 2 \left[\frac{Bt^3}{12} + (Bt) * \left(\frac{h}{2} - \frac{t}{2} \right)^2 \right] + \frac{bh_c^3}{12} \quad (4.16)$$

kullanılarak

$$G_I = \frac{P^2 a^2}{bEI} \left[1 + \frac{1+\nu}{5} \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right] \quad (4.17)$$

elde edilir. Denklem 4.17 yardımıyla SCB testindeki numunelerin Mod I yüklemesinde açığa çıkan enerji hesaplanır.

SCB testi uygulanan el yatırma yöntemi ile imal edilmiş olan L=150mm uzunluğunda B=25mm kalınlıkta a=40-10=30mm (menteşe mesafesi 10mm) ön çatlak boyuna sahip h=30mm yüksekliği olan numune P=125N kuvvet etkisinde gevrek kırılma gözlenmiştir. Epoxynin eğilme elastisite modülü E=3200MPa, köpüğün ise E=85MPa'dır. Şekil 4.18'e (Bakınız sy:58) göre t=h₁=3mm, h_c=24mm'dir. Denklem 4.19 yardımıyla I= 28.263mm⁴ bulunur. Açığa çıkan enerjiyi bulmak için tüm bu veriler Denklem 4.20 de yerine konularak G_{II}=234,8 J/mm² hesaplanır. Testleri yapılan bütün SCB numuneleri aynı şekilde hesaplanır.

4.3.2 Mod II Kırılma Mekaniği Test Yöntemleri

Tabakalar arasındaki kırılma tokluğunun Mod II'ye sebep olan kayma gerilmesinin ölçümünü sağlayan başlıca test yöntemleri:

- Üç nokta eğme deney yöntemi (3ENF)
- Dört nokta eğme deney yöntemi (4ENF)
- Geliştirilmiş, çatlaklı sandviç kiriş testi yöntemi(MCSB)

4.3.2.1 Üç Nokta Eğme Deney Yöntemi (3ENF)

Adından da anlaşılacağı üzere numune deney setine 3 noktadan temas etmektedir. Altta bulunan iki tane silindirik mesnet numuneyi tutarken üstteki silindirik mesnet numuneye baskı yapar. Silindir kullanılmasıdaki en önemli nokta numuneye çizgisel bası uygulamasının sağlanabilmesidir.



Şekil 4.19 Üç nokta eğme deney düzeneği (3ENF) (Instron, 2017)

Lamine yapıdaki test numuneleri ile sandviç yapıdaki test numunelerine uygulanan standart üç nokta eğme testi aynı test düzeneğinde aynı şekilde yapılabilir. Alttaki noktalar alt plaka ile temas halindedir. Üstteki noktadan kuvvet uygulanmaya başlandığında malzemedeki tabakalar arasındaki çatlak ilerlemeye başlar.

3ENF testi plaka şeklindeki bir numuneye uygulanırken numunede Mod II yüklemesi meydana gelir ve çatlak bölgesi ilerler. Plaka şeklindeki numunedeki kusur yaklaşık olarak orta katmanda bulunmaktadır. Üst ve alt tabakaların yükseklikleri hemen hemen aynıdır.

Sandviç kompozitlerde hazırlanan çatlaklı numuneler 3ENF yöntemine göre test edildiğinde sistemin aynı zamanda Mod I ve Mod II yüklemesine maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Sebep olarak da üst ve alt kısımdaki katmanlar arasındaki yükseklik farkı söylenebilir.

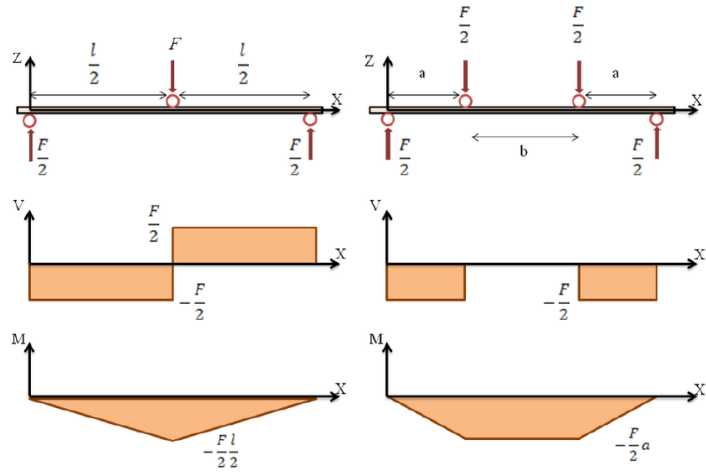
4.3.2.2 Dört Nokta Eğme Deney Yöntemi (4ENF)

Tıpkı üç nokta eğme deneyinde olduğu gibi malzemeye dört noktadan temas edilmektedir. Bu noktalardan mesnet görevi gören noktalar alt düzlemde olup, kuvvet etkisi yapan iki nokta üst düzlemde uygulanır.



Şekil 4.20 Dört nokta eğme deney düzeneği (4ENF) (Instron, 2017)

Kuvvetin uygulanmasını sağlayan noktaların arasındaki mesafe, üç nokta eğme deneyine göre daha istikrarlı değerler verilmesini sağlamaktadır. Üstteki iki nokta arasındaki mesafe kuvvetin noktasal olmasına rağmen yayılı yük etkisi oluşmasını sağlamaktadır. Tek noktadan uygulanan bir kuvvette malzemenin homojen yapısındaki farklılıklar, testi etkilemektedir. Ama numune homojen olmasa bile kuvvet uygulanan iki nokta arasında homojen etki meydana gelir.

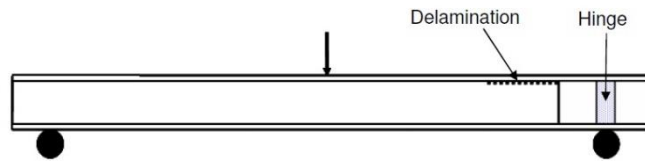


Şekil 4.21 Üç nokta eğme deneyi ile dört nokta eğme deneyi kuvvet dağılımı

Üstteki noktalardan (3ENF’de üstteki tek silindirik noktadan, 4ENF’de üstteki iki silindirik noktadan) kuvvet uygulanmaya başlandığında malzemede hem çekmenin (Mod I) hem de kaymanın (Mod II) oluşmasına olanak sağlanmaktadır. Kayma etkisine çekme etkisi karıştığından dolayı sistem mix Mod yüklemesi oluşmaktadır.

4.3.2.3 Geliştirilmiş, Çatlaklı Sandviç Kiriş Testi Yöntemi(MCSB)

Geliştirilmiş, çatlaklı sandviç kiriş testi (MCSB), üç nokta eğme testi temeline sahip dört noktalı bir test yöntemidir. Bu dört noktanın dizilimi dört nokta eğme testinden biraz farklıdır. Üç nokta mesnet olarak kullanılırken bir nokta kuvvet uygulamakta kullanılır.



Şekil 4.22 Geliştirilmiş, çatlaklı sandviç kiriş testi yöntemi (MCSB) (Adams, Kessler, Kuramoto, Bluth, Weaver ve Gill, 2010)

Üç nokta eğme testinde kuvvetin etkisi ile çatlak tarafındaki tabaka arasındaki mesafede değişiklikler oluşmaktadır. Bu yöntemde çatlakla ilgili taraftaki çift silindirik mesnet sayesinde, numunenin üst ve alt cam elyaf-epoxy yüzeylerinin

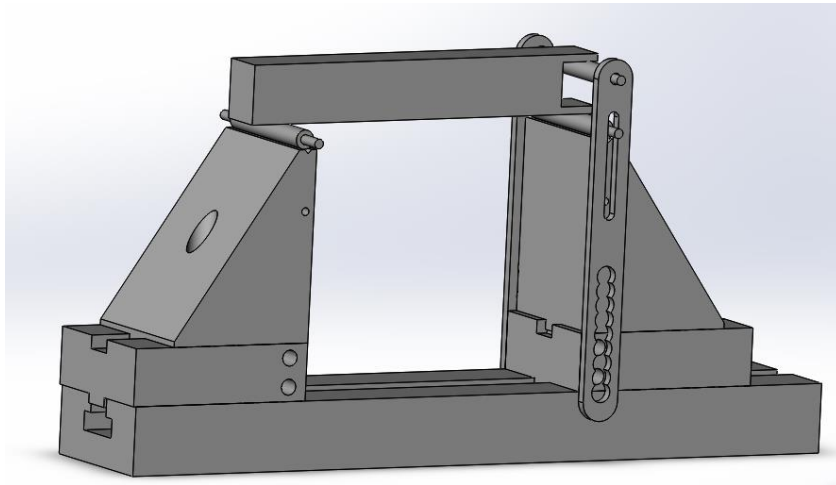
birbirlerine olan mesafeleri kuvvet uygulanırken sabit tutulmaktadır. Bu sayede oluşan gerilmenin büyük bir kısmı Mod II etkisi yapar. Test esnasında meydana gelen yeterli miktarda sehîm nedeniyle numunede oluşan eğrisel görünüm de Mod II'nin etkisi ne kadar yüksek olduğunun gözlemlenebilir.

Neden MCSB?

- Delaminasyon olarak çatlak açma yayılır
- Yüksek Yüzde Mod II(%80) elde edilir. Oluşan gerilmenin büyük bir kısmı Mod II etkisi oluşturur.
- Yarı istikrarlı çatlak büyümesi yüzey tabakası ile çekirdek arabirimi boyunca

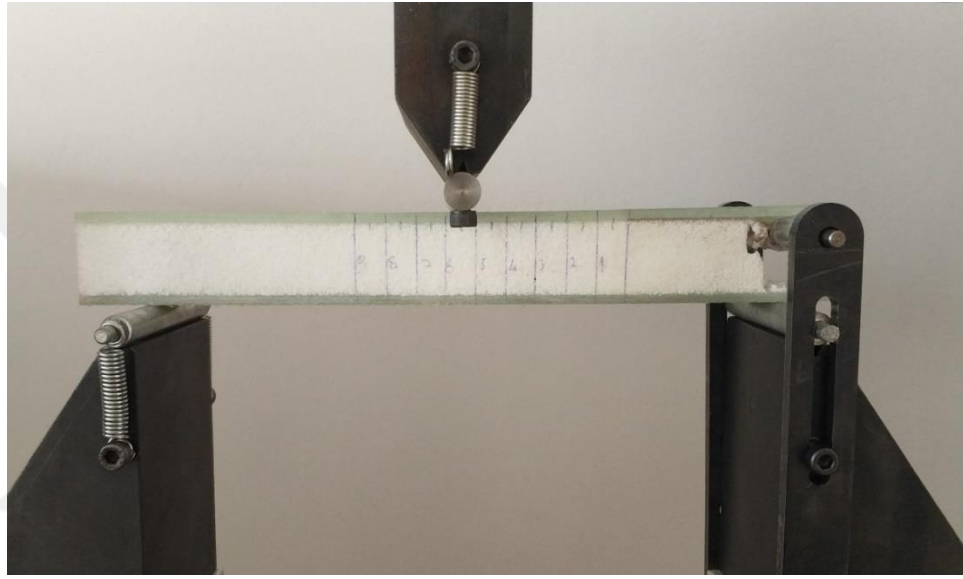
MCSB testinin aparat imalatı:

MCSB testi standart 3ENF deneyinin geliştirilmiş halidir. Bu yüzden MCSB testi için 3ENF testinin aparata küçük bir revize işlemi ile uygun hale getirilmektedir. Standart 3ENF testinin aparatı numuneye noktasal temas eden 3 adet silindirden oluşmaktadır. Şekil 4.22'de görüldüğü üzere numunenin kusurlu tarafındaki numuneye destek olan silindirin hizasında üst katman ile temas edecek bir silindir daha yerleştirilir. İki silindir merkezleri arasındaki mesafe ile üst ve alt tabakalarının alt noktaları ile olan mesafeye denk olmalıdırlar.



Şekil 4.23 Solidworks ortamında MCSB test aparatı için 3ENF test aparatına yapılan revize tasarımı

Standart 3ENF aparatlarında baskı yapan silindir sisteme yay ile bağlıdır. Bu sayede hem zamanla oluşan yıpranma sonrasında kolay bir şekilde değiştirilebilir hem de daha geniş numunelerin bağlanmasına olanak sağlamaktadır. Ancak MCSB için yapılan revizde şekil 4.23’de görüldüğü gibi cıvata yardımı ile sabitlenmiştir. Çünkü MCSB testi yapılırken sandviç kompozit numunede oluşan enerjinin %80-90 civarı numunede Mod II ye sebep olmaktadır. Kayma kuvvetinin etkisi yaylı silindiri yerinden çıkarabilir diye böyle bir yöntem tercih edilmiştir.



Şekil 4.24 MCSB test aparatına numune bağlantı şekli (Kişisel arşiv, 2018)

MCSB testinin yapılışı:

- Numune boyuna göre alttaki silindir mesnetler konumlandırılır. Konumlandırılırken teorikteki gibi numunenin uçlarından değil biraz içerisinden olacak şekilde ayarlanır.
- Şekil 4.24’de görüldüğü gibi kusurlu tarafın geleceği yerdeki çift silindirin konumu numune yüksekliğine göre ayarlanıp sabitlenir.
- Numuneyi kuvveti uygulayacak olan üst çenedeki silindirin tam ortasına gelecek şekilde iki mesnetin üzerine yerleştirilir.
- Hareketli olan üst çene numuneye yaklaştırılır ve temas ettiği konumda durdurulur.

- Cihazın kuvvet ve deplasman değerleri sıfırlandıktan sonra sabit bir hız ile numuneye baskı yapılır.



Şekil 4.25 MCSB testinde numuneye uygulanan kuvvet etkisiyle oluşan eğilme (Kişisel arşiv, 2018)

Baskının etkisi ile malzeme yapısına göre çatlakta ilerlemeye başlar ve bu ilerleyiş için son konum numunenin tam ortası kabul edilmektedir. Çatlak şekil 4.26'daki gibi buraya ulaştıktan veya geçtikten sonra deney tamamlanır.



Şekil 4.26 MCSB testinin sonucundaki çatlak ilerleyişi (Kişisel arşiv, 2018)

Uygulanan kuvvetin etkisi ile numune Şekil 4.26'daki deki gibi şekil alır. Kuvvetin etkisi ile oluşan çatlak ilerlemesi takip edilir.

G_{II} Enerjinin hesaplanması:

Mod II testlerinde oluşan enerjinin hesaplanabilmesi için denklem 4.9'daki hesaplamış olduğumuz enerji denkleminin Denklem 4.10'daki Mod II hali olan

$$G_{II} = \frac{M_{II}^2}{BEI} \cdot \frac{3}{16} \frac{(1 - \xi)}{\xi^2} (1 + \psi)$$

kullanmak uygun olur. A. J. Kessler ve D. Adams (2010) 'in JAMS'taki konferansta yapmış oldukları sunumda sandviç kompozitlerin kırılma mekaniği test yöntemlerindeki çalışmalarını anlatırken MCSB testinde açığa çıkan enerjinin %80'den fazlası Mod II olduğunu belirtmişlerdir. Bu yüzden

$$M_1 = 0 \text{ ve } M_2 = \frac{Pa}{2} \text{ ise, } M_I = M_{II} = \frac{Pa}{2(1 + \psi)}, \psi = \left(\frac{1 - \xi}{\xi} \right)^3 \quad (4.18)$$

ve bu parametreleri Denklem 4.18'e yerleştirilir. Ayrıca Şekil 4.18'deki (Bakınız sy:57) sandviç kompozit numunenin dörtgen yapısının sadece cam elyaf-epoxy olacak şekilde I-profil yapıya çevrimden dolayı

$$I = \frac{Bh^3}{12} \text{ yerine } I = 2 \left[\frac{Bt^3}{12} + (Bt) * \left(\frac{h}{2} - \frac{t}{2} \right)^2 \right] + \frac{bh_c^3}{12} \quad (4.19)$$

eşitliği kullanılarak

$$G_{II} = \left(\frac{P^2 a^2}{bEI} \right) \frac{3}{64} \frac{1}{(1 + \psi)^2} \cdot \frac{(1 - \xi)^4}{\xi^2} \left[\frac{1}{\xi^3} + \frac{1}{(1 - \xi)^3} \right] \quad (4.20)$$

denklemini elde edilir. MSCB testinde açığa çıkan Mod II enerjisi Denklem 4.20 ile hesaplanır.

MCSB testi uygulanan el yatırma yöntemi ile imal edilmiş olan $L=150\text{mm}$ uzunluğunda $B=25\text{mm}$ kalınlıkta $a=30\text{mm}$ ön çatlak boyuna sahip $h=30\text{mm}$ yüksekliği olan numune $P=451\text{N}$ kuvvet etkisinde gevrek kırılma gözlenmiştir. Epoxynin eğilme

elastisite modülü $E=3200\text{MPa}$, köpüğün ise $E=85\text{MPa}$ 'dır. Şekil 4.18'e (Bakınız sy:58) göre $t=h_1=3\text{mm}$, $h_c=24\text{mm}$ 'dir. Denklem 4.19 yardımıyla $I= 28.263\text{mm}^4$ bulunur. Açığa çıkan enerjiyi bulmak için tüm bu veriler Denklem 4.20 de yerine konularak $G_{II}=17,6 \text{ J/mm}^2$ hesaplanır. Testleri yapılan bütün MCSB numuneleri aynı şekilde hesaplanır.



BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR

5.1 İmalat Yöntemleri

Sandviç kompozit imalat yöntemlerinden olan el yatırma ve vakum infüzyon, çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Her iki yöntem ile imalat yapılırken aynı materyallerin kullanılmasının yanı sıra aynı ortam şartlarında imal edilmeleri gerekmektedir. Ortam şartlarındaki farklılık imalatı etkilediği gibi deneylerden alınan sonuçları da etkilemektedir. Bu yüzden Tablo 4.1'deki (Bakınız sy:39) ortam şartları sağlanarak imalatı yapılmıştır.

El yatırma yöntemi aşamaları, vakum infüzyona göre daha uğraştırıcı olduğundan homojen bir yapı elde etmek oldukça zordur. El yatırma yöntemi ile mukayese edildiğinde vakum yöntemi, homojenliği ve kolay imal edilebilirliği bir avantaj olarak sağlarken, vakum esnasında reçine akışında meydana gelebilecek bir sorun hatalı üretime neden olmaktadır.

El yatırma yöntemi her türlü ürün çeşidine ve ebatına uygundur. Örneğin deliksiz bir PVC'den çekirdek yapıldığında ebat ne olursa olsun rahatça uygulanabilir. Ancak vakum infüzyon yönteminde üretilecek ürün büyük olursa deliksiz bir PVC'nin alt katmanlarına sağlıklı bir şekilde epoxy geçmesi sağlanamayabilir. Bu olumsuz durumu önlemek için üretimi yapılan ürünlerdeki epoxy dağılımına göre farklı noktalardan takviye vakum işlemi uygulanır. Bu sayede epoxy dağılımı kolaylaştırılmış olur ve bu olumsuz durum giderilir.

El yatırma yöntemi ile vakum infüzyon yöntemi karşılaştırılırken, üretilen numunelerin üretim açısından incelendiği gibi mekanik özelliklerinin, Mod I ve Mod II yüklemeleri neticesinde oluşan açığa çıkan enerji miktarının da incelenmesi gerekmektedir.

5.2 Testler

5.2.1 Basma Deneyi

El yatırma ve vakum infüzyon yöntemleri ile üretilen 3'er adet numuneye uygulanan basma kuvveti sonucunda gözlemlenen kuvvet miktarlarının ortalaması hesaplanıp, ASTM C365/C365M' ye göre Denklem 4.2'de yerine konularak gerilme değerleri hesaplanmıştır.

Vakum infüzyon ile üretilen numunenin gerilme değeri el yatırma ile üretilen numunenin değerinden yaklaşık 1,5 kat daha fazladır. (Bakınız sayfa 45)

5.2.2 Çekme Deneyi

El yatırma ve vakum infüzyon yöntemleri ile üretilen numunelerin kopma anındaki kuvvet değerleri gözlemlenerek ortalama kuvvet hesaplanmıştır. Basma deneyinde olduğu gibi çekme deneyinde elde edilen maksimum kuvvet ASTM C297/C297M'ye göre Denklem 4.1 yerine konularak maksimum gerilme değeri hesaplanmıştır.

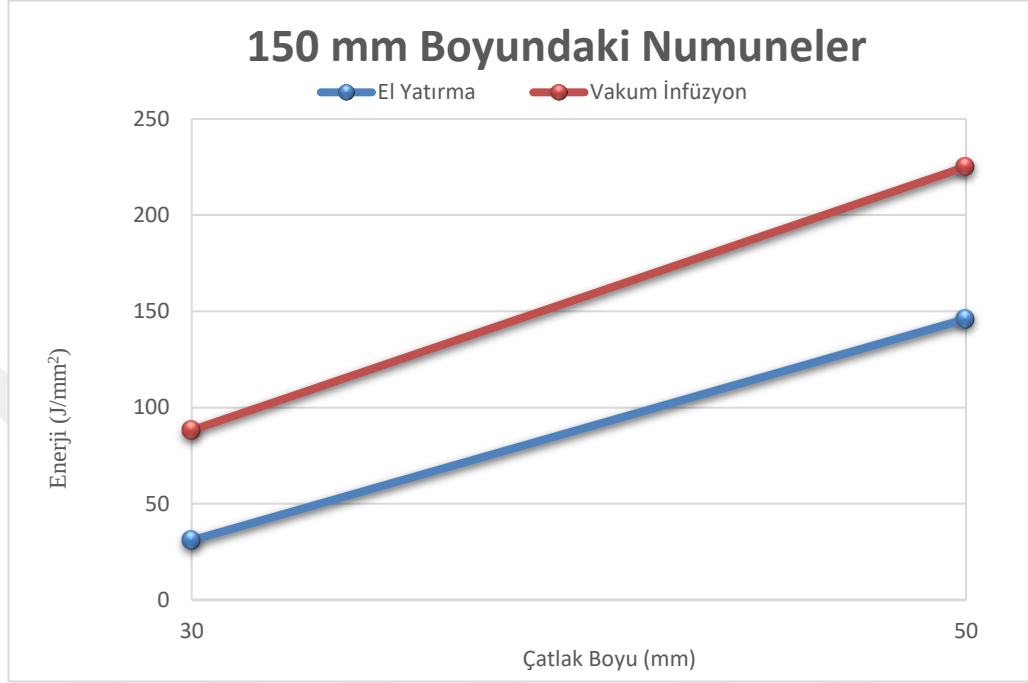
Vakum infüzyon ile üretilen numunenin gerilme değeri, el yatırma ile üretilen numunenin gerilme değerinden yaklaşık 1,2 kat daha fazladır. (Bakınız sayfa 43)

5.2.3 MCSB

Geliştirilmiş, çatlaklı sandviç kiriş testi (MCSB), ASTM/D5528 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu test için 150-200-250mm boylarında numuneler sırasıyla 30-50-70 mm ön çatlaklı olacak şekilde hazırlanmıştır.

150mm boyundaki numunelerde 70mm ön çatlak boyu incelenmemiştir. Çünkü ön çatlak boyu numunenin ortasına yakın olmasından dolayı numunenin tam ortasına uygulanan bası kuvveti sonucu meydana gelen kırılma sağlıklı olarak gözlemlenememektedir.

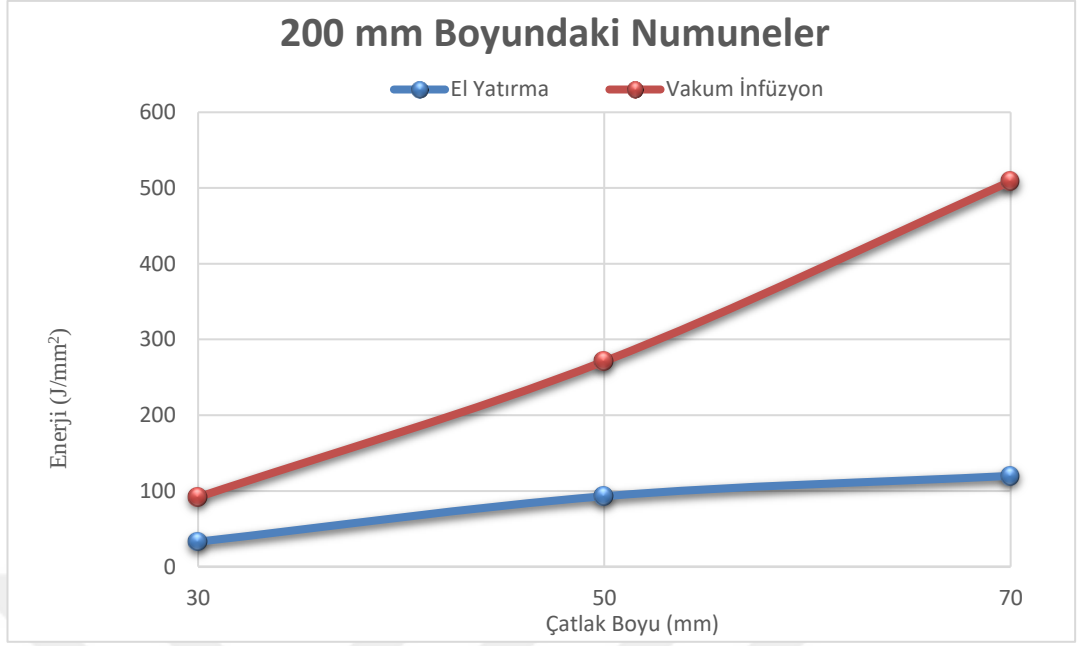
MCSB testleri esnasında açığa çıkan enerji miktarının grafikleri Şekil 5.1-5.3 arasında sunulmuştur ve bu grafiklerde vakum infüzyon numuneleri kırmızı renkle, el yatırma numuneleri mavi renkle gösterilmektedir.



Şekil 5.1 Farklı ön çatlak boyuna sahip 150mm uzunluğundaki MCSB test numunelerinin Mod II yüklemesi esnasında açığa çıkan enerji miktarı değişimi

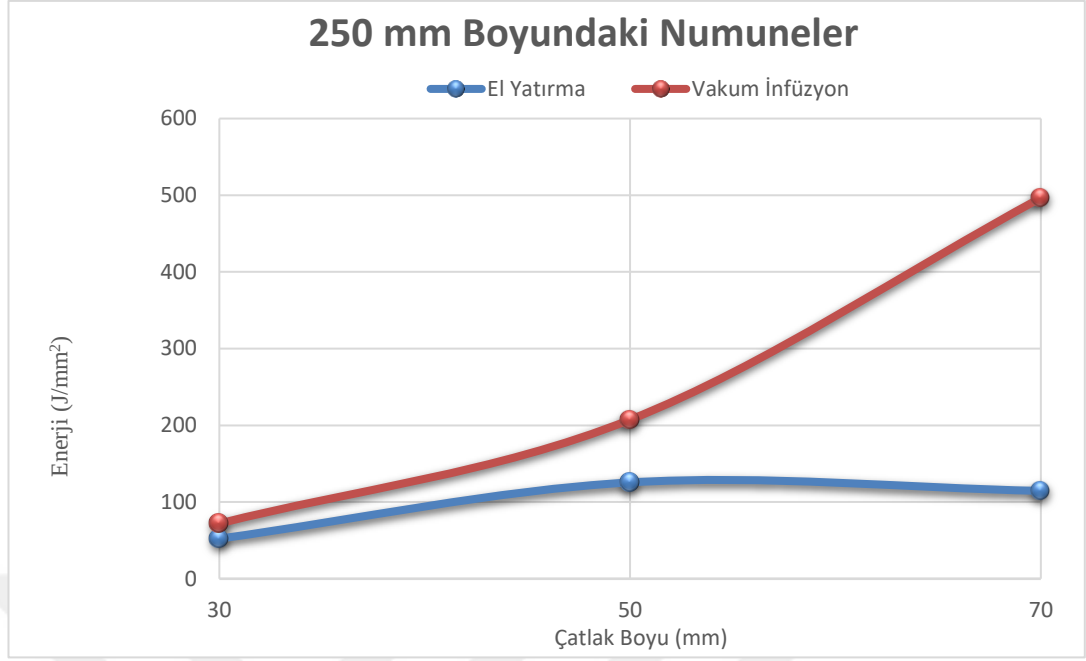
Maleki ve Toygar'ın 2017 yılındaki benzer çalışmasında oda sıcaklığında (23°C) 200mm boyunda aynı özellikte çekirdek malzemesine sahip, (80kg/m³ density, 25 mm çekirdek kalınlığına sahip) vakum infüzyon ile üretilmiş olan numunelere yapılan MCSB testlerinde çatlak boyu arttıkça açığa çıkan Mod II enerjisinin arttığı gözlemlenmiştir. Benzer çalışmadaki gibi Şekil 5.2 da görüldüğü üzere vakum infüzyon numuneleri de aynı karakteristiği sergilemektedir.

Üretim yöntemleri kıyaslandığında, Şekil 5.1'de verilen ön çatlak boyuna (30mm-50mm) karşı açığa çıkan enerji miktarı değişimi 150mm uzunluktaki numuneler için incelendiğinde vakum infüzyon yönteminin el yatırma yöntemine göre 1,5-2,5 kat daha mukavemetli sonuçlar sergilediği görülmüştür. (Bakınız Ek-1).



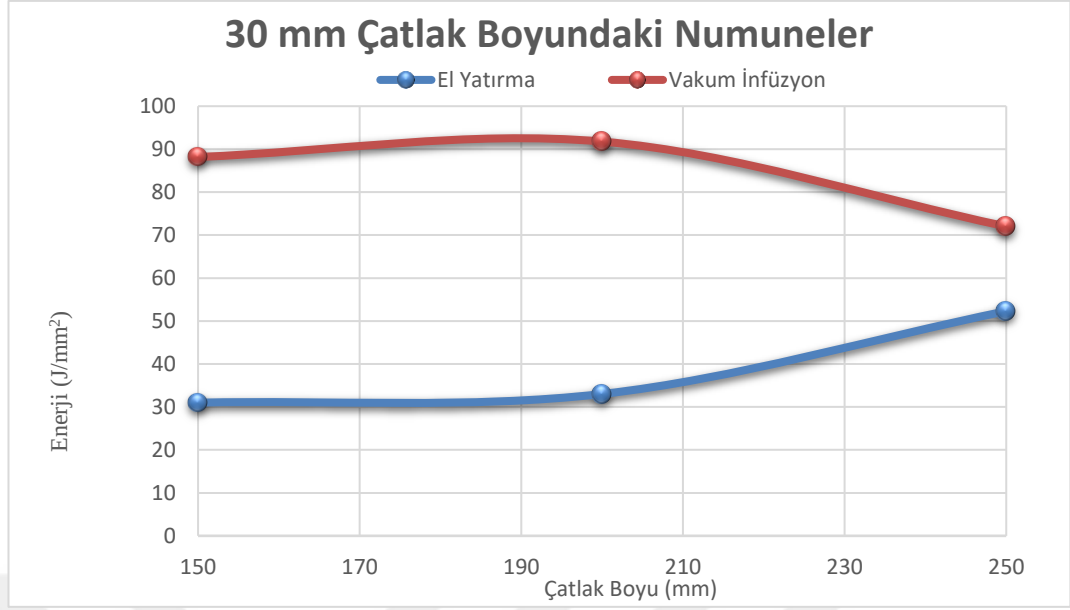
Şekil 5.2 Farklı ön çatlak boyuna sahip 200mm uzunluğundaki MCSB test numunelerinin Mod II yüklemesi esnasında açığa çıkan enerji miktarı değişimi

Şekil 5.2’de ise vakum infüzyon yöntemi ile imal edilmiş ve Mod II yüklemesine maruz 200mm uzunlukta 30mm, 50mm ve 70mm ön çatlğa sahip numunelerin açığa çıkan enerji miktarının değerleri incelendiğinde, 30mm ve 50mm’lik ön çatlaklı numunelerde 3 kata kadar 70mm’lik ön çatlğa sahip numuneler de ise yaklaşık 4 kata kadar mukavemetli olduğu gözlemlenmiştir (Bakınız Ek-2).

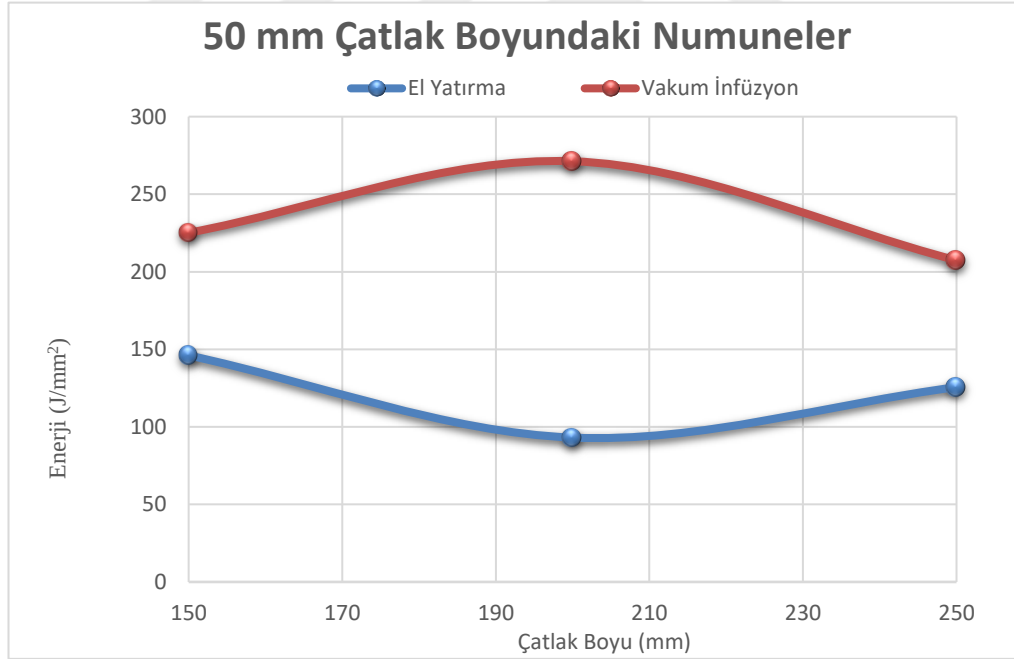


Şekil 5.3 Farklı ön çatlak boyuna sahip 250mm uzunluğundaki MCSB test numunelerinin Mod II yüklemesi esnasında açığa çıkan enerji miktarı değişimi

Şekil 5.3 de farklı ön çatlaklara sahip vakum infüzyon ve el yatırma yöntemleri ile imal edilmiş 250mm uzunlukta ve Mod II yüklemesine maruz MCSB test numunelerinin ön çatlak boyuna göre açığa çıkan enerji miktarı değişimi verilmektedir. Grafikten görüldüğü üzere 30mm ve 50mm ön çatlaklı numuneler 1,5 kata kadar 70mm ön çatlaklı numuneler 4 kata kadar mukavemetlidirler (Bakınız Ek-3).



Şekil 5.4 30mm’lik Ön çatlak boyuna sahip olan MCSB testi numunesinin uzunluğa bağlı Mod II yüklemesinde açığa çıkan enerji miktarı değişimi



Şekil 5.5 50mm’lik Ön çatlak boyuna sahip olan MCSB testi numunesinin uzunluğa bağlı Mod II yüklemesinde açığa çıkan enerji miktarı değişimi

Şekil 5.4 - 5.5’de görüldüğü üzere vakum infüzyon yöntemi ile üretilen numuneler de ön çatlak boyları sabit tutulduğunda numune boylarına göre açığa çıkan enerji

miktarlarındaki değişim birbirleri ile kıyaslandığında benzer karakteristik gösterir. 200mm boyundaki numunelerde açığa çıkan enerji miktarı maximuma çıkarken 250mm'lik numunelerde enerji miktarı düşüş göstermiştir. Sonuç olarak, vakum infüzyon yöntemi ile üretilen numunelerin oldukça homojen bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.

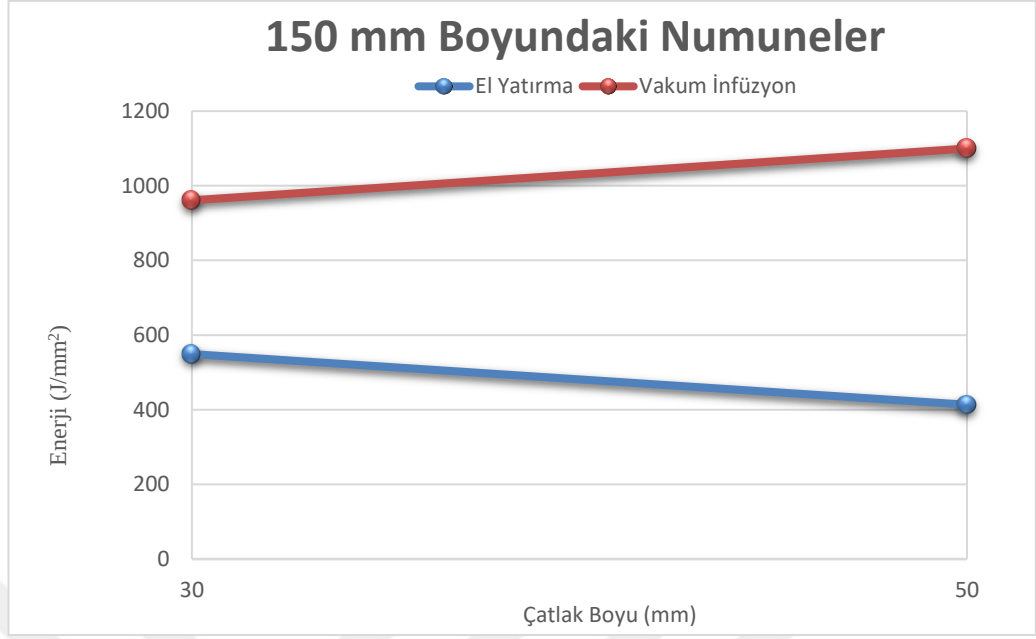
El yatırma yöntemi ile üretilen numunelerin şekil 5.4 - 5.5'deki grafikleri incelendiğinde aynı karakteristiği sergilemedikleri görülmektedir. Bu nedenle üretilen numunelerin homojen bir yapıya sahip olmadığı izlemine varılmaktadır. Sebep olarak da el yatırma yönteminde imalat usulü gereği (fırça ile sürme işlemi vb.) Epoxy'nin homojen dağılımının sağlanmasının oldukça zor olduğu söylenebilir.

5.2.4 SCB

Tek kenar çatlaklı kiriş testi (SCB) için sırasıyla 150-200-250mm boylarında ve 40-60mm ön çatlak boyuna sahip numuneler hazırlanmıştır. Denklem hesabında (Denklem 4.17) çatlak boyları 30-50 mm olarak işleme alınır. Çünkü ön çatlak boyu menteşenin kuvvet uygulanan kulağından ölçüldüğü için çatlakların ilk 10mm'si çatlak boyundan düşülür. (ASTM Standart D5528)

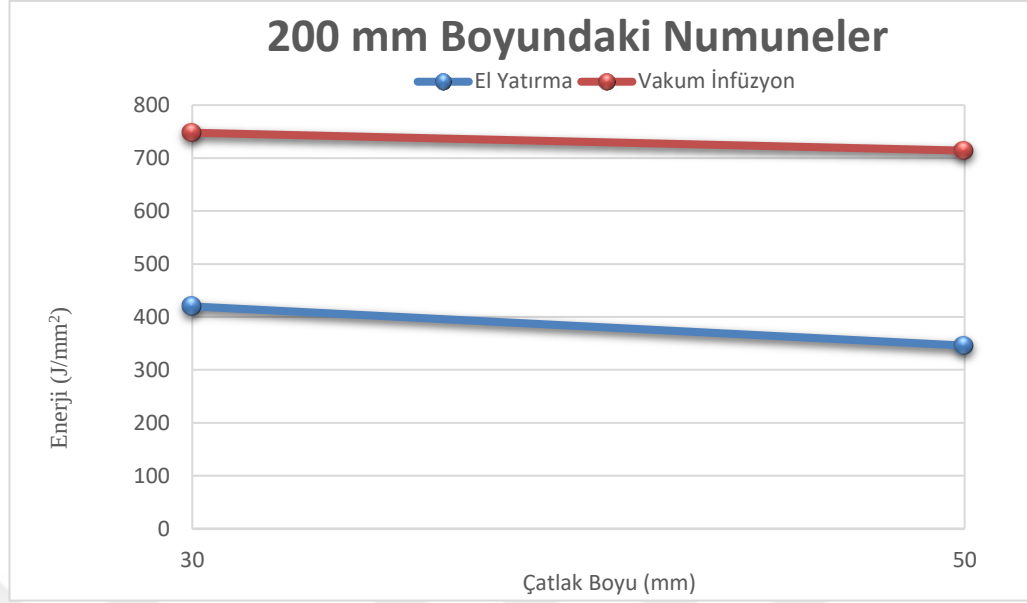
Benzer çalışmalarda oda sıcaklığında (23°C) 190mm boyunda aynı özellikte çekirdek malzemesine sahip, (80kg/m³ density, 25 mm çekirdek kalınlığına sahip) vakum infüzyon ile üretilmiş olan numunelere yapılan SCB testlerinde çatlak boyu arttıkça Mod I yüklemesi sonucu açığa çıkan enerji miktarı da azalmaktadır. (Maleki ve Toygar, 2017) Benzer çalışmalardaki gibi Şekil 5.7 da görüldüğü üzere vakum infüzyon numuneleri de aynı karakteristiği sergilemektedir.

SCB testleri esnasında açığa çıkan enerji miktarının grafikleri Şekil 5.6-5.10 arasında sunulmuştur ve bu grafiklerde vakum infüzyon yöntemi ile imal edilmiş numuneler kırmızı renkle, el yatırma yöntemi ile imal edilmiş numuneler mavi renkle gösterilmektedir.



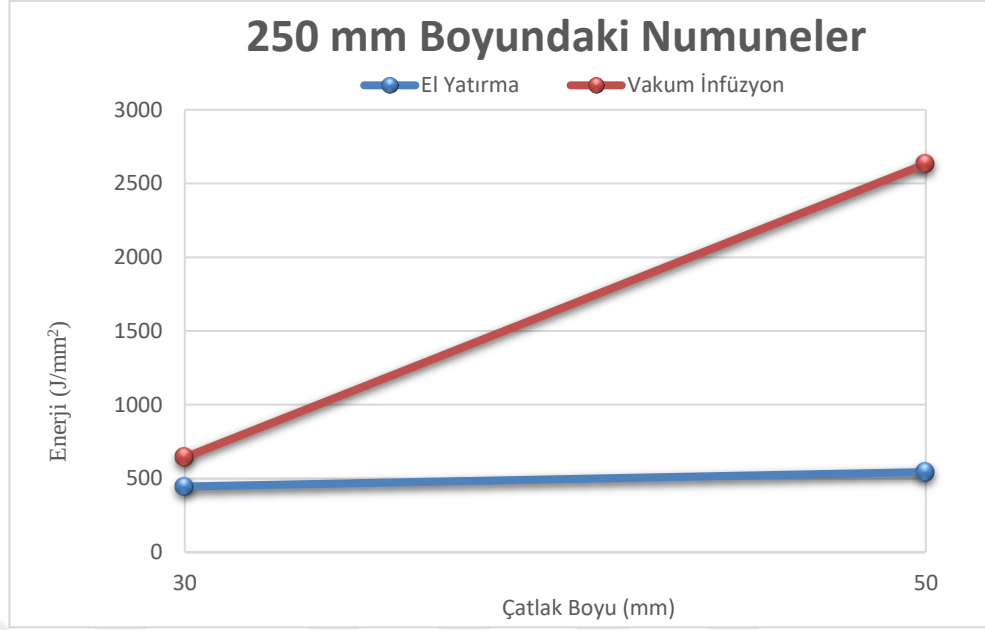
Şekil 5.6 Farklı ön çatlak boyuna sahip 150mm uzunluğundaki SCB test numunelerinin Mod I yüklemesi esnasında açığa çıkan enerji miktarı değişimi

Üretim yöntemleri kıyaslandığında Şekil 5.6'daki 150 mm boyunda 30 mm ön çatlak boyuna sahip numunelerle, 50mm'lik ön çatlak boyuna sahip numunelerin açığa çıkan enerji miktarları karşılaştırıldığında vakum infüzyon ile elde edilen numunelerin 1,5-2 kat daha fazla mukavemetli olduğu gözlemlenmektedir. (Bakınız Ek-1).



Şekil 5.7 Farklı ön çatlak boyuna sahip 200mm uzunluğundaki SCB test numunelerinin Mod I yüklemesi esnasında açığa çıkan enerji miktarı değişimi

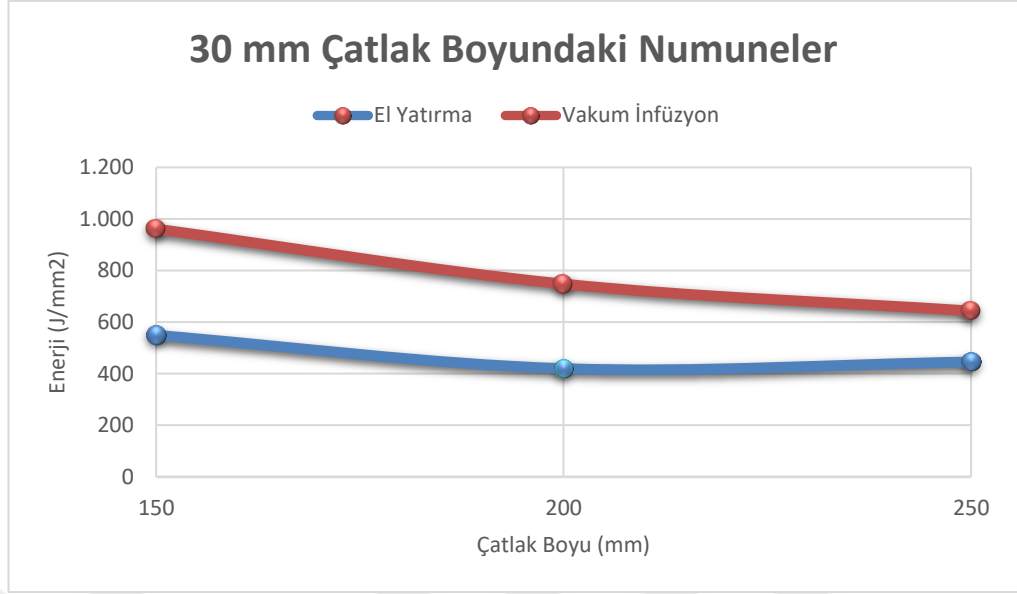
Şekil 5.7’de numune boyu 200mm iken ön çatlak ile açığa çıkan enerji miktarının karşılaştırılması görülmektedir. 30 mm ön çatlak boyuna sahip numunelerle ve 50mm’lik ön çatlak boyuna sahip numuneler de 2 kata kadar vakum infüzyon yöntemi daha fazla mukavemetlidir (Bakınız Ek-8).



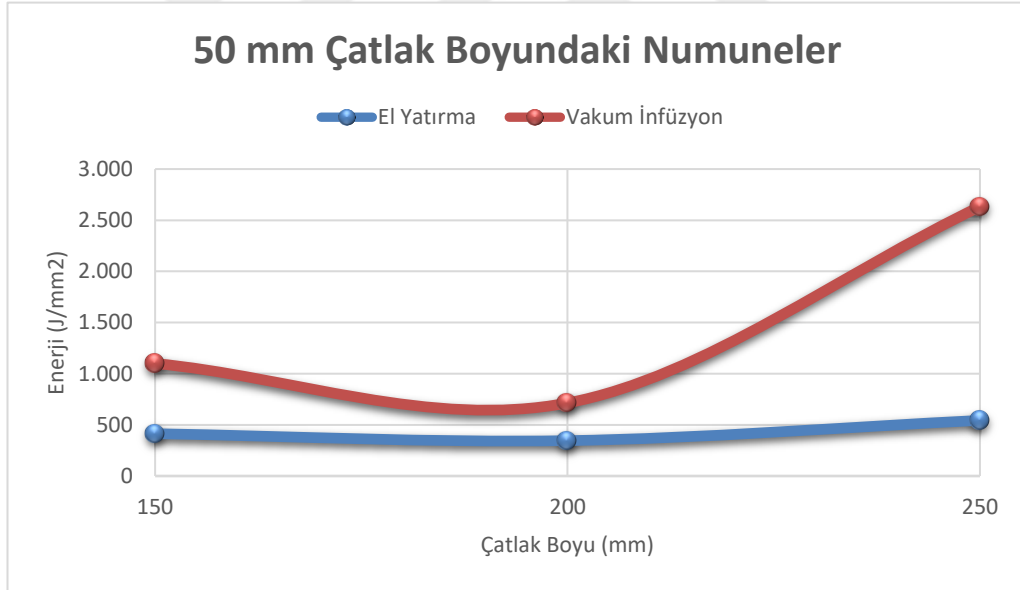
Şekil 5.8 Farklı ön çatlak boyuna sahip 250mm uzunluğundaki SCB test numunelerinin Mod I yüklemesi esnasında açığa çıkan enerji miktarı değişimi

Şekil 5.8’de 250 mm uzunlukta ve Mod I yüklemesine maruz numunelerin ön çatlak boyuna göre açığa çıkan enerji miktarı açısından karşılaştırılması görülmektedir. 30mm ön çatlak boyuna sahip numuneler 1,5 kata, 50mm’lik ön çatlak boyuna sahip numunelerde ise 4 kata kadar vakum infüzyon yöntemi daha mukavemetli çıkmıştır (Bakınız Ek-9).

Vakum infüzyon yolu ile üretilen 150mm ve 250mm’lik numunelerde ön çatlak boyu arttıkça açığa enerji miktarı da artmaktadır. 200mm’lik numunede ise azalma görülmektedir. El yatırma ile üretilen 150mm ve 200mm’lik numunelerde ön çatlak boyu arttıkça açığa çıkan enerji miktarı azalırken 250mm boyundaki numunelerde artış gözlemlenmektedir.



Şekil 5.9 30mm’lik Ön çatlak boyuna sahip olan SCB testi numunesinin uzunluğa bağlı Mod I yüklemesinde açığa çıkan enerji miktarı değişimi



Şekil 5.10 50mm’lik Ön çatlak boyuna sahip olan SCB testi numunesinin uzunluğa bağlı Mod I yüklemesinde açığa çıkan enerji miktarı değişimi

Şekil 5.9 – 5.10’da görüldüğü gibi vakum infüzyon yöntemi ile üretilen numunelerden, 150mm ve 200mm boyundaki numuneler benzer karakteristiği göstermişlerdir. Ancak 250mm boyundaki 30mm’lik ön çatlak boyuna sahip

numunelerde düşüş olurken, 50mm'lik ön çatlak boyuna sahip numunelerde artış olmuştur. Bu farklılık MCSB testi 250mm'lik numunelerinde de gözlemlenmiştir.

Gerek MCSB testi gerekse SCB testindeki 250mm boyundaki numunelerde açığa çıkan enerji miktarındaki azalma vakum infüzyon yöntemi esnasında vakum miktarının numune boyu uzadıkça yeterli basınç oluşturamamasından kaynaklanabileceği ön görüşü olmuştur.



KAYNAKLAR

- Adams D.O., Nelson J., Bluth Z., & Hansen C., (2011) *Development and evaluation of fracture mechanics test methods for sandwich composites*. Paper presented at the Proceedings of the 2011 FAA JAMS Technical Reivew Meeting, Wichita, KS
- Adams, D. O., Kessler, J. A., Kuramoto, B., Bluth, J., Weaver, C., & Gill, A. (2010). *Development and evaluation of fracture mechanics test methods for sandwich composites*. Paper presented at the Proceedings of the 2010 FAA JAMS Technical Reivew Meeting, Wichita, KS
- Aktaş, M. (2016). *Kompozit malzeme üretim yöntemleri*, 8 Mart 2019, <https://docplayer.biz.tr/11781200-3-kompozit-malzeme-uretim-yontemleri.html>
- Allix O, Ladeveaze P, & Corigliano A. (1995) Damage analysis of inter-laminar fracture specimens. *Composite Structures* 3(1),61-74.
- ASTM, C. 297. (2004) Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions. *ASTM C*.
- ASTM, C. (1998). 365-94, Standard test method for flatwise compressive properties of sandwich cores. *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- ASTM C. (1999). 364-99, Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions. *ASTM International, West Conshohocken, PA*
- ASTM Standards, 15.Standard, A. (2006). D7250. Standard sractice for determining sandwich beam flexural and shear stiffness. *ASTM International*, 18-68.
- Balıkoğlu, F., ve Arslan, N., (2013) Denizel sandviç kompozitlerin üretim parametrelerinin mekanik özelliklerine etkilerinin araştırılması. *II.Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu*, İzmir, 501-517.

Balıkoğlu, F., Ataş, A., ve Arslan, N., (2012) Yat ve Tekne imalatında vakum infüzyon (VARTM) ile kompozit üretim yönteminin uygulanması. *III. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir

Docplayer, (2016). *Kompozit üretim yöntemleri* 8 Mart 2019
<https://docplayer.biz.tr/11873459-4-kompozit-uretim-yontemleri.html>

Genç, Ç., ve Arıcı, A.A., (2008), Yat imalatında kullanılan CTP malzeme ve imalat yöntemleri bölüm I: El yatırma yöntemi, *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 178, 16-21.

Genç, Ç., ve Arıcı, A.A., (2008), Yat imalatında kullanılan CTP malzeme ve imalat yöntemleri bölüm III: Infüzyon Yöntemi. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 178, 28-31.

Genç, Ç., ve Arıcı, A., A., (2008), *Yat İmalatında Kullanılan CTP Malzeme ve İmalat Yöntemleri*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli

Genç, Ç., ve Arıcı, A.A., (2008), Cam elyaf takviyeli plastiklerin üretim yöntemleri bölüm IV: Deneysel karşılaştırması. *Gemi ve Deniz Teknolojileri*, 178, 32-35.

Gorev, Y, A., & Rivkind, V, N., (2010) Polyester Composites for Shipbuilding. A. I. Rusanov, (Ed.). *Russian Journal General Chemistry*, (80) 1098-2114. Russia

Griffith, A.A., (1921). The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 221, 163-198.

Gülmez T., (2018) *Kırılma Ders Notları*. İstanbul Teknik Üniversitesi ,İstanbul.

Instron, (2017). *Test çözümleri*. 8 Mart 2019, <https://www.instron.com.tr/tr-tr>

Karlsson, K., F., & Astrom, B, T., (1997). Manufacturing and applications structural sandwich components. *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 28(2), 97-111.

- Korkut, S. (2017). *Kompozit Malzemelerde Delaminasyon*. 3 Mart 2019, <http://www.serdarkorkut.com/2017/05/03/kompozit-malzemelerde-delaminasyon/>
- Koruvatan, A., Koruvatan, T., Arslan, N., ve Şen, F., (2008). Kür Sürecinin Tabakalı Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *XVI. Ulusal Mekanik Kongresi*, Kayseri, 833-837
- Larsson, L., & Eliasson, R., (2006) *Yat Tasarımı Genel İlkeleri*. (T. Yılmaz Çev.). İstanbul: Birsen Yayınevi. (Orijinal Çalışma basım tarihi 2000).
- Li, X. and Carlsson, L.A., (2000) Elastic foundation analysis of tilted sandwich debond (TSD) specimen. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2(1), 3-32.
- Li, X. and Carlsson, L.A., (2001) Fracture mechanics analysis of tilted sandwich debond (TSD) specimen. *Journal of Composite Materials*, 35(23), 2145 – 2168.
- Li, X., and Carlsson, L. A. (1999) The tilted sandwich debond (TSD) specimen for face/core interface fracture characterization. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 1(1), 60-75.
- Mangino, E. (2004) The research requirements of the transport sectors to facilitate an increased usage of composite materials. *Centro Ricerche Fiat*, 5-7.
- Megep, (2014). *Kompozit tekne ve yat kalıp imalat yöntemleri*. 24 Şubat 2019, http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Kompozit%20Tekne%20Ve%20Yat%20Kalıp%20İmalat%20Yöntemleri.pdf.
- Miracle D. B. & Donaldson S. L. (Ed). (2001). *ASM Handbook Composites*, 21, Ohio: ASM International.
- Mouritz, A. P., Gellert, E., Burchill P., Challis K. (2001) Review of advanced composite structures for naval ships and submarines, *Composite Structures*, 53, 21-41.

- Pan, S. D., Wu, L. Z., Sun, Y. G., & Zhou, Z. G. (2008). Fracture test for double cantilever beam of honeycomb sandwich panels. *Materials Letters*, 62(3), 523-526.
- Poliya (2012). *Reçine İnfüzyon Ekipmanları*. 24 Şubat, 2019, <https://www.poliya.com/tr/recine-infuzyon-ekipmanlari>
- Poliya (2017). *El Yatırma Uygulamaları*. 24 Şubat, 2019, <https://www.poliya.com/tr/el-yatirmasi-ve-elyaf-puskurtme>
- Pradeep, K. R., Rao, B. N., Srinivasan, S. M., & Balasubramaniam, K. (2012). Interface fracture assessment on honeycomb sandwich composite DCB specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 93, 108-118.
- Spur, D. (1999) The birth of fiberglass boats. *Good Old Boot Magazine*, 2(6).
- Standard, A. (1995). Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. *ASTM D3039/D 3039M*.
- Standard, A. (2001). Standard test method for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by tensile test of a±45 laminate. *ASTM D 3518/D 3518*, 94.
- Standard, A. (2002). D5528. Test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. *Annual Book of ASTM Standards*, 15.
- Toygar, M. E., & Maleki, F. K. (2018) *The Fracture Toughness Of Sandwich And Laminated Composites At Different Mode And Temperatures*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Toygar, M. E., ve İzdar B. (2012) *Cam/epoksi Malzemenin Ara Yüzey Kırılma Tokluğunun DCB Testi Ve Ansys İle Hesaplanması*. Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Viana, G. M., and Carlsson, L.A. (2003). Influences of Foam Density and Core Thickness on Debond Toughness of Sandwich Specimens with PVC Foam Core. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 5(2), 103-118.

Viana, G. M., and Carlsson, L.A. (2002). Mode Mixity and Crack Tip Yield Zones in TSD Sandwich Specimens with PVC Foam Core. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 4(2), 141-155.

Williams, J. G. (1988) On the Calculation of Energy Release Rates for Cracked Laminates. *International Journal of Fracture*, 36, 101–119.

Yurttaş, Ç., ve Afşar, E. (2000) CTP Teknolojisi. *Cam elyaf sanayi yayınları*, 8-44

EKLER

EK 1: MCSB testi sonuçlarının 150 mm boyundaki numunelerin farklı çatlak boylarındaki kırılma enerjilerinin karşılaştırılması

Tablo 1. MCSB testi numunelerin kırılma esnasındaki maximum kuvvetleri ve değişim

Numune Boyu (150 mm)			
	Max. Kuvvet		
Çatlak Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	N	N	%
30	585	1.005	72
50	777	896	15

Tablo 2. MCSB testi numunelerin kırılma anında açığa çıkan enerjileri ve değişim

Numune Boyu (150 mm)			
	Açığa Çıkan Enerji Miktarı		
Çatlak Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	J/mm ²	J/mm ²	%
30	31	88	184
50	146	225	54

EK 2: MCSB testi sonuçlarının 200 mm boyundaki numunelerin farklı çatlak boylarındaki kırılma enerjilerinin karşılaştırılması

Tablo 3. MCSB testi numunelerin kırılma esnasındaki maximum kuvvetleri ve değişim

Numune Boyu (200 mm)			
	Max. Kuvvet		
Çatlak Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	N	N	%
30	616	1.016	65
50	620	1.053	70
70	491	1.036	111

Tablo 4. MCSB testi numunelerin kırılma anında açığa çıkan enerjileri ve değişim

Numune Boyu (200 mm)			
	Açığa Çıkan Enerji Miktarı		
Çatlak Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	J/mm ²	J/mm ²	%
30	33	92	178
50	93	271	191
70	120	509	324

EK 3: MCSB testi sonuçlarının 250 mm boyundaki numunelerin farklı çatlak boylarındaki kırılma enerjilerinin karşılaştırılması

Tablo 5. MCSB testi numunelerin kırılma esnasındaki maximum kuvvetleri ve değişim

Numune Boyu (250 mm)			
	Max. Kuvvet		
Çatlak Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	N	N	%
30	764	908	19
50	718	922	28
70	489	1.018	108

Tablo 6. MCSB testi numunelerin kırılma anında açığa çıkan enerjileri ve değişim

Numune Boyu (250 mm)			
	Açığa Çıkan Enerji Miktarı		
Çatlak Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	J/mm ²	J/mm ²	%
30	52	72	38
50	126	207	65
70	115	497	334

EK 4: MCSB testi sonuçlarının 30 mm çatlak boyuna sahip farklı boylardaki numunelerinin kırılma enerjilerinin karşılaştırılması

Tablo 7. MCSB testi numunelerin kırılma esnasındaki maximum kuvvetleri ve değişim

Çatlak Boyu (30 mm)			
	Max. Kuvvet		
Numune Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	N	N	%
150	585	1.005	72
200	616	1.016	65
250	620	1.053	70

Tablo 8. MCSB testi numunelerin kırılma anında açığa çıkan enerjileri ve değişim

Çatlak Boyu (30 mm)			
	Açığa Çıkan Enerji Miktarı		
Numune Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	J/mm ²	J/mm ²	%
150	31	88	184
200	33	92	178
250	52	72	38

EK 5: MCSB testi sonuçlarının 50 mm çatlak boyuna sahip farklı boylardaki numunelerinin kırılma enerjilerinin karşılaştırılması

Tablo 9. MCSB testi numunelerin kırılma esnasındaki maximum kuvvetleri ve değişim

Çatlak Boyu (50 mm)			
	Max. Kuvvet		
Numune Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	N	N	%
150	777	896	15
200	620	1.053	70
250	718	922	28

Tablo 10. MCSB testi numunelerin kırılma anında açığa çıkan enerjileri ve değişim

Çatlak Boyu (50 mm)			
	Açığa Çıkan Enerji Miktarı		
Numune Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	J/mm ²	J/mm ²	%
150	146	225	54
200	93	271	191
250	126	207	65

EK 6: MCSB testi sonuçlarının 70 mm çatlak boyuna sahip farklı boylardaki numunelerinin kırılma enerjilerinin karşılaştırılması

Tablo 11. MCSB testi numunelerin kırılma esnasındaki maximum kuvvetleri ve değişim

Çatlak Boyu (70 mm)			
	Max. Kuvvet		
Numune Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	N	N	%
200	491	1.036	111
250	489	1.018	108

Tablo 12. MCSB testi numunelerin kırılma anında açığa çıkan enerjileri ve değişim

Çatlak Boyu (70 mm)			
	Açığa Çıkan Enerji Miktarı		
Numune Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	J/mm ²	J/mm ²	%
200	120	509	324
250	115	497	334

EK 7: SCB testi sonuçlarının 150 mm boyundaki numunelerin farklı çatlak boylarındaki kırılma enerjilerinin karşılaştırılması

Tablo 13. SCB testi numunelerin kırılma esnasındaki maximum kuvvetleri ve değişim

Numune Boyu (150 mm)			
	Max. Kuvvet		
Çatlak Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	N	N	%
30	145	252	74
50	100	161	62

Tablo 14. SCB testi numunelerin kırılma anında açığa çıkan enerjileri ve değişim

Numune Boyu (150 mm)			
	Açığa Çıkan Enerji Miktarı		
Çatlak Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	J/mm ²	J/mm ²	%
30	549	961	75
50	413	1.100	166

EK 8: SCB testi sonuçlarının 200 mm boyundaki numunelerin farklı çatlak boylarındaki kırılma enerjilerinin karşılaştırılması

Tablo 15. SCB testi numunelerin kırılma esnasındaki maximum kuvvetleri ve değişim

Numune Boyu (200 mm)			
	Max. Kuvvet		
Çatlak Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	N	N	%
30	165	219	33
50	91	129	42

Tablo 16. SCB testi numunelerin kırılma anında açığa çıkan enerjileri ve değişim

Numune Boyu (200 mm)			
	Açığa Çıkan Enerji Miktarı		
Çatlak Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	J/mm ²	J/mm ²	%
30	420	748	78
50	346	714	106

EK 9: SCB testi sonuçlarının 250 mm boyundaki numunelerin farklı çatlak boylarındaki kırılma enerjilerinin karşılaştırılması

Tablo 17. SCB testi numunelerin kırılma esnasındaki maximum kuvvetleri ve değişim

Numune Boyu (250 mm)			
	Max. Kuvvet		
Çatlak Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	N	N	%
30	155	205	32
50	114	248	117

Tablo 18. SCB testi numunelerin kırılma anında açığa çıkan enerjileri ve değişim

Numune Boyu (250 mm)			
	Açığa Çıkan Enerji Miktarı		
Çatlak Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	J/mm ²	J/mm ²	%
30	446	643	44
50	544	2.632	384

EK 10: SCB testi sonuçlarının 30 mm çatlak boyuna sahip farklı boylardaki numunelerinin kırılma enerjilerinin karşılaştırılması

Tablo 19. SCB testi numunelerin kırılma esnasındaki maximum kuvvetleri ve değişim

Çatlak Boyu (30 mm)			
	Max. Kuvvet		
Numune Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	N	N	%
160	145	252	74
200	165	219	33
250	155	205	32

Tablo 20. SCB testi numunelerin kırılma anında açığa çıkan enerjileri ve değişim

Çatlak Boyu (30 mm)			
	Açığa Çıkan Enerji Miktarı		
Numune Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	J/mm ²	J/mm ²	%
160	549	961	75
200	420	748	78
250	446	643	44

EK 11: SCB testi sonuçlarının 50 mm çatlak boyuna sahip farklı boylardaki numunelerinin kırılma enerjilerinin karşılaştırılması

Tablo 21. SCB testi numunelerin kırılma esnasındaki maximum kuvvetleri ve değişim

Çatlak Boyu (50 mm)			
	Max. Kuvvet		
Numune Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	N	N	%
150	100	161	162
200	91	129	142
250	114	248	217

Tablo 22. SCB testi numunelerin kırılma anında açığa çıkan enerjileri ve değişim

Çatlak Boyu (50 mm)			
	Açığa Çıkan Enerji Miktarı		
Numune Boyu	El Yatırma	Vakum İnfüzyon	Değişim Oranı
mm	J/mm ²	J/mm ²	%
150	413	1.100	166
200	346	714	106
250	544	2.632	384