

## YAT VE TEKNE İMALATINDA VAKUM İNFÜZYON (VARTM) İLE KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMİNİN UYGULANMASI

**Fatih BALIKOĞLU<sup>1</sup>, Akın ATAŞ<sup>2</sup>, Nurettin ARSLAN<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>[fatih@balikesir.edu.tr](mailto:fatih@balikesir.edu.tr) Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 10145 Balıkesir

<sup>2</sup>[a.atas@balikesir.edu.tr](mailto:a.atas@balikesir.edu.tr) Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 10145 Balıkesir

<sup>3</sup>[narslan@balikesir.edu.tr](mailto:narslan@balikesir.edu.tr) Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 10145 Balıkesir

### ÖZET

Bu çalışmada, öncelikle İzmir’de yat ve tekne imalatçıları ziyaret edilerek sanayide uygulanan kompozit üretim yöntemleri ile ilgili araştırma yürütülmüştür. Geleneksel kompozit üretim yöntemi olan elle yatırma yönteminin yanı sıra sandviç kompozit üretimine imkan veren vakum infüzyon (VARTM) ile tekne imalatı yapıldığı görülmüştür. Sanayide vakum infüzyon üretim tekniğinin tüm parametreleri incelenmiş, laboratuvar ortamında üretime geçilmiştir. Üretici firmalardan temin edilen ve laboratuvarda üretilen tekne gövdesine ait laminasyon planlarına sahip sandviç kompozit levhaların ASTM standartlarına uygun şekilde 3 nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Sandviç Kompozit Malzeme, Vakum İnfüzyon Metot, Eğme testi

### ABSTRACT

In this study, first the applied composite manufacturing methods in the visited yacht and boat manufacturers were researched. Besides hand-lay up being traditional method, sandwich composites produced with vacuum infusion technique (VARTM) was observed in the boat manufacturers. All parameters about VARTM were practiced in the industry, in this way production could be achieved in the laboratory. Three point bending tests based on the ASTM standards of sandwich composite plates with lamination plan used in the boat hull that were obtained by the manufacturers and produced in the laboratory were performed.

**Keywords:** Sandwich Composite Materials, Vacuum Infusion Method, Bending Test

## 1. GİRİŞ

Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler teknelerin gövde ve güvertelerinde oldukça sık kullanılmaktadır. Cam takviyeli polimer kompozitlerin yat ve tekne tasarımında kullanılması 1940-1950 yıllarında polyester reçinelerin gelişimiyle birlikte hız kazanmıştır. İlk CTP (cam takviyeli kompozit) yelkenli 42 feet (12.7 m) Arion 1951 de, ilk gezinti teknesi olan 25 feet (7.5 m) New Horizon 1957 de, V tipi kıçtan takma motorlu karina Bertram 31 motor yat 1960 da imal edilmişlerdir. 30 metrenin üzerindeki ilk seri üretim kompozit tekne olan Azimut 105 Failaka yı üretmiştir. CTP tekneler üzerindeki şüpheli dünyanın çevresini ilk dolaşan CTP yat olan Apogee (1969) ortadan kaldırmıştır [1]. Kompozit malzemelerin yat ve tekne imalatında diğer malzemelerin yerini almasının başlıca nedenleri hafif olmaları, korozyon dirençleri, yüksek yorulma ömürleri, düşük bakım ve onarım masrafları, kolay ve esnek tek parça (monocoque) imal edilmeleri, estetik görünüşleri olarak sıralanabilir [2,3]. Ana yapı içerisinde kompozit kullanmanın diğer bir avantajı ise anizotropik özelliği sayesinde katmanların dayanım özelliklerinin ayarlanabilmesidir. Tekne

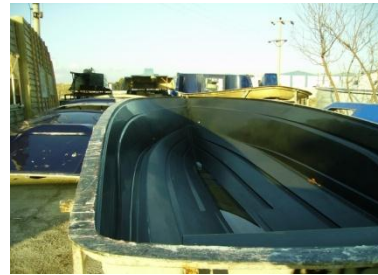
imalatında sıklıkla E-cam takviye ve keçe (toz ve sıvı bağlayıcı) takviye elemanları kullanılmaktadır. Dayanım yönünden daha iyi malzemeler bulunmasına rağmen, maliyet, dayanım ve kullanım birlikte düşünüldüğünde E-cam tercih edilmektedir [4]. Takviye elemanları birim alan başına düşen ağırlıkları ile  $gr/m^2$  üretilmektedir. Kompozit yapı içerisinde takviye elemanı dayanım ve sertlik sağlarken, matris görevi yapan reçine ise yapısal bütünlüğü ve yüklerin elyaflar arasında dağılmasını sağlamaktadır. Matris elemanı olarak termoset olan polyeşter ve vinileşter reçineler tercih edilmektedirler Tercih edilme nedenleri ise yeterli katalizör ve hızlandırıcı kimyasal katkılarının eklenmesiyle ile atmosfer ortamında küleşme sağlamalarıdır [1]. Kompozit malzemeler deniz taşıtlarında 3 farklı tasarım ile uygulanmaktadır. Tek parça (monocoque), yatay ve düşey takviyeli dış kaplama (framed single-skin) ve sandviç kompozit yapıya sahip olabilirler [5]. Sandviç yapılar alt ve üst olmak üzere iki adet ince ve sert laminasyon arasında daha kalın ve zayıf ara (çekirdek) malzemenin bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Sandviç kompozitler yapıya mükemmel eğilme direngenlik ve hafiflik sağlamaktadır. Çekirdek malzemeler özellikle köpükler iyi ısı ve ses yalıtımı özelliklerine de sahiptir. Tekne imalatında ara malzeme olarak balsa, doğrusal ve çapraz bağlantılı PVC, dokunmamış hacimli coremat (non-woven) malzemeler tercih edilmektedir [6]. Çekirdek malzemenin önemli bir görevi vardır. Yapı yüke maruz kaldığında yüzler arasında sabit mesafeyi korumak için yeterince katı olmalıdır. Yüksek kesme modül değerine sahip olması gerekir, böylece yüzlerin birbirleri üzerinde kaymasını engeller. Çekirdek malzemenin zayıf olması durumunda, alt ve üst laminasyon işbirliği yapmaz ve eğilme altında bağımsız hareket ederler [4].

Tekne gövdesi çok farklı yüklere maruz kalmaktadır. Genel yüklemeler ve bölgesel yüklemeler olmak üzere 2 ye ayrılmaktadır. Genel yüklemeler teknenin arma yükünden kaynaklanan sarkma ve çökmesine neden olan eğilme momenti değerleridir. Genel yükler tekneyi tamamen etkiler ve arma yükleri gövde girişini eğmeye çalışır. Bölgesel yükler ise, deniz ve dalgalardan tekneye etkileyen hidrostatik/hidrodinamik yükler, çarmıh ayağı, salma, dümen, vinç gibi benzeri elemanlardan gelen yükler olarak bilinmektedir. Kaba ve sert denizler aynı zamanda tekne sarkması durumuna da sebep olabilir bu durumda genel yüklemelerden (donanım kuvvetlerinden) kaynaklanan eğilme momenti işareti değişmeyecektir ama teknede tıreşimli bir basma ve çekme oluşacaktır ve bunun sonucu olarak uzun vadede malzemenin yorulmasına neden olacaktır [4]. Bu bilgilere dayanarak denizel kompozit malzemelerin eğilme davranışlarının araştırılmasının uygun olacağı düşünülmüştür.

İzmir ve çevresinde yat ve tekne imalatçıları ziyaret ederek, uygulanan kompozit üretim yöntemleri, malzeme ve tasarımlar hakkında bilgi edinilmiştir. Küçük ve orta ölçekli işletmelerde elle yatırma yöntemi ile tek parça (monocoque) ve vakum infüzyon yöntemi (vartm) ile sandviç kompozit gezinti teknelerinin üretildiği görülmüştür. Tekne imalatı ilk olarak ahşap modellerin yapılması ile başlamaktadır. Genelde ahşaptan sık bir posta aralığıyla çıta kaplama olarak inşa edilen modele, macunlama, zımparalama, boyama ve cilalama yapılmaktadır. Erkek ahşap modellerden elde edilen polyeşter gövde kalıpları ömür ve kullanım olarak avantaj sağlamaktadır (Şekil 1.)



a. Ahşap erkek gövde model



b. Polyeşter dişi gövde kalıp

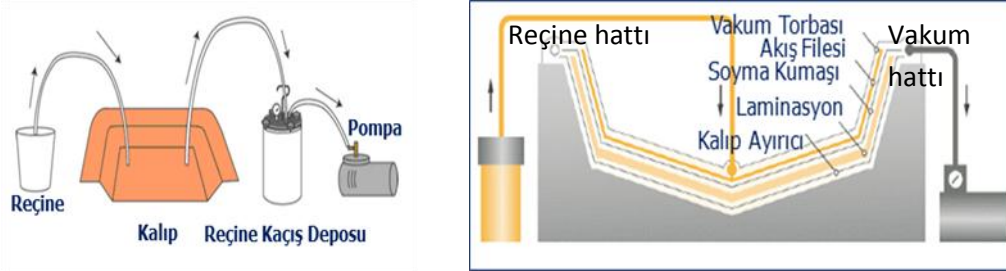
Şekil 1. Tekne gövde kalıpları (Mercan Tekne, Sasalı-İzmir)

Elle yatırma yöntemi yöntemi ile karşılaştırıldığında vakum infüzyon yöntemi reçine küleşmesi sırasında havaya karışan styrene buharının emisyonunu azalmakta, yapıda fazla reçinenin çıkmasına izin vermekte ve dolayısıyla fiber oranının artmasına böylece dayanımı daha yüksek tekne gövdesi yapılmasına zemin oluşturmaktadır. Sandviç kompozit tekne imalatında ahşap modellerden

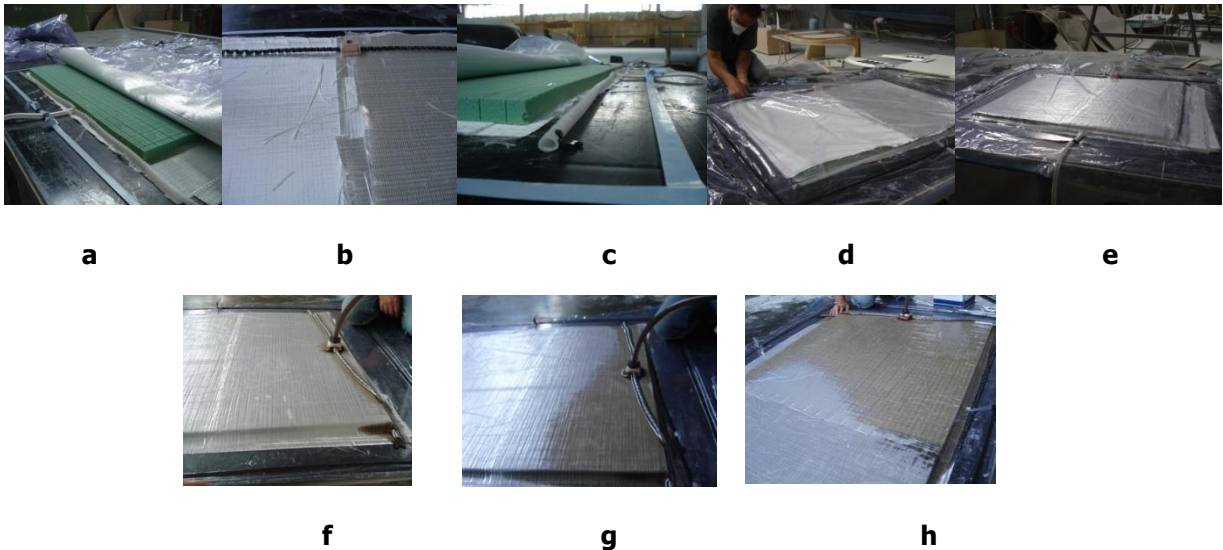
elde edilen tek veya iki parça polyester kalıpların kullanıldığı görülmüştür. Vakum infüzyon ile sandviç kompozit üretiminde, geleneksel elle yatırma yöntemi ile karşılaştırıldığında tekne gövdelerinin ebatlarının arttığı görülmüştür.

### 1.1. Vakum İnfüzyon ile Kompozit Üretim Yöntemi

Bu yöntem seri üretime benzer bir kalıp gerektirmektedir. RTM (reçine enjeksiyon) yönteminden türetilmiş ve tek taraflı esnek veya rijit bir kalıp ile maliyetler düşürülmüştür. Kalıbın içine ayırıcı ve jekot sürüldükten sonra gövdeyi oluşturacak tüm elyaf katları kuru olarak yerleştirilmektedir (Şekil 3. a). Elyafaların üzerine düzgün yüzey elde etmek amacıyla soyma kumaşı (peel-ply) ve en üste ise reçine akışını sağlayacak akış filesi yerleştirilmektedir. Reçine ve hava akışını sağlayacak spiral hortumlar laminasyon üzerine yerleştirilir (Şekil 3.b,c ). Kalıbın kenarları hava sızdırmaz bantları ile çevrenmekte ve kalıbın üzeri vakum torbası ile hava geçirmez şekilde kapatılmaktadır (Şekil 3. d ). Bir pompa ile kalıp içinde vakum yaratılmakta, bu şekilde vakum torbası ve kalıp arasında kalan hava emilmektedir (Şekil 3.e). Elle yatırma yöntemi ile karşılaştırıldığında vakum işlemi hava laminasyonda hava kabarcık oluşumunu ve styrene buharı emisyonunu engellemektedir. Vakumlama işlemi yapıldıktan sonra reçine hattı açılır ve reçinenin de her yere işlemesi ve fazla reçinenin emilerek dışarı atılması sağlanmaktadır (Şekil 3.f,g,h). Fazla reçine vakum hattına ulaştığında vakum pompasına gitmesi engellenerek reçine kaçış deposuna akması sağlanmaktadır [3,7,8]. Şekil 2 de vakum infüzyon üretim tekniği şematik olarak gösterilmiştir.



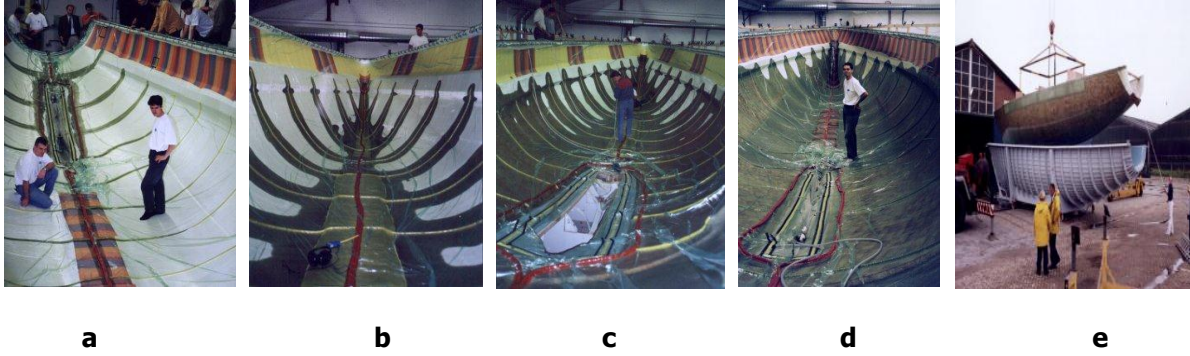
Şekil 2. Vakum infüzyon yönteminin şematik gösterimi



Şekil 3. Vakum infüzyon üretim yönteminin aşamaları

## 1.2 Vakum İnfüzyon ile Tekne İmalatı

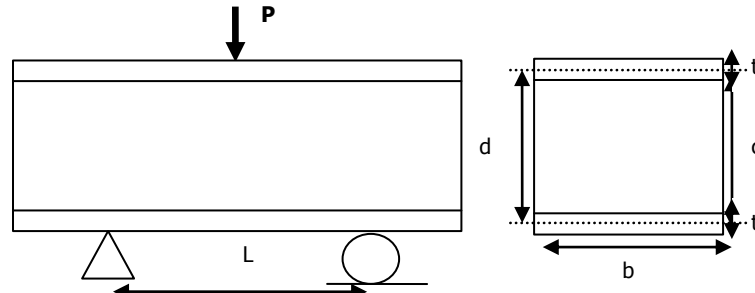
Şekil 4 de vakum infüzyon yöntemi ile tekne imalatı aşamaları sırasıyla verilmiştir. İlk olarak tekne gövdesinin boyutlarına sahip dişi polyester kalıba elyaflar, akış hatları ve vakum torbası yerleştirilmiştir (Şekil 4.a). Reçine hatları kalıbın alt kısmında yer alırken, vakum hatları yukarıda bırakılmıştır. Böylece reçine tabana yayıldıktan sonra yukarı vakum hatlarına doğru ilerlemiştir (Şekil 4. b,c,d). Sonra olarak ta kürtleme işlemi tamamlandıktan sonra gövde kalıptan çıkarılmıştır (Şekil 4.e).



Şekil 4. Vakum infüzyon yöntemi ile tekne gövde imalatı  
(Kaynak: <http://www.polyworx.com/apz/cnplx/>)

## 2. Sandviç Kompozit Kiriş Teorisi

Bu bölümde sandviç kompozit kirişlerin elastik analizlerini içeren 3 nokta eğilme durumunda ara malzemede ve yüzeylerde oluşan gerilmeler verilmiştir. Sandviç kompozit kirişin destek mesafesi L, genişliği b ve orta noktadan P yükü etki etmiştir. Kalınlığı t olan alt ve üst yüzeyler, kalınlığı c olan ara (çekirdek) malzeme ile birbirlerinden ayrılmıştır. 3 tabakanın birbirlerine mükemmel şekilde bağlı olduklarını ve yüzey malzemelerinin, ara (çekirdek) malzemeye göre daha rijit olduğunu kabul edelim [9-11].



Şekil 5. Basit mesnetlenmiş sandviç kompozit kiriş ve kesiti

Eğilme direngenliği her iki laminasyonun ve ara malzemenin ataletlerinin kesitin ağırlık merkezine göre toplanmasıyla bulunur.

$$D = E_f \cdot \frac{b t d^2}{2} + E_f \cdot \frac{b t^3}{6} + E_c \cdot \frac{b c^3}{12} \quad (1)$$

$E_c$ : Ara malzeme elastisite modülü (N/mm<sup>2</sup>)

$E_f$ : Yüzey malzeme elastisite modülü (N/mm<sup>2</sup>)

b: numune genişliği (mm)

t: yüzey kalınlığı (mm)

c: ara malzeme kalınlığı (mm)

d: üst ve alt yüzey eksenleri arası mesafe (mm)

$E_f$  ve  $E_c$  yüzey ve ara malzemenin elastisite modülleridir. D değeri ise üst ve alt tabaka merkez eksenleri arasındaki mesafedir.

$d=c+t$  (mm)

Denklem 1 de birinci terim olan  $E_f \cdot \frac{btd^2}{2}$  diğer iki terime göre daha etkili ve 2. ve 3. terimler aşağıdaki şartlar sağlandığında ilk terimin %1 den daha az değer almaktadırlar.

$$\frac{d}{t} > 5.77 \quad (2)$$

$$6 \frac{E_f}{E_c} \cdot \frac{t}{c} \left(\frac{d}{c}\right)^2 \geq 100$$

ise denklem 1:

$$E_f \cdot \frac{btd^2}{2} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (3)$$

Basit mesnetli merkezden yüklenen kirişte maksimum moment M kirişin orta noktasında oluşmakta, yüzeylerde oluşan maksimum gerilme  $\sigma_f$  :

$$\sigma_f = \pm \frac{M}{D} E_f \frac{d}{2} = \frac{PL}{4bdt} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (4)$$

Ara (çekirdek) malzemede kayma gerilmesi çekirdek malzeme boyunca sabit kaldığı kabul edilir ve aşağıda verilen formül ile hesaplanır:

$$\tau_c = \frac{Q}{bd} = \frac{Q}{(d+c)b} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (5)$$

$\tau_c$ : kayma gerilmesi

Sandviç kirişin 3 nokta eğilme durumunda orta noktasının toplam deplasmanı ise yüzey laminasyonların eğilmeden dolayı oluşan deplasman ile ara malzemenin kaymadan dolayı oluşan deplasman değerlerinin toplamı:

$$\delta_{maks} = \frac{PL^3}{48D} + \frac{PL}{4AG} \quad (\text{mm}) \quad (6)$$

$\delta$ : deplasman

### 3. DENEYSEL METOT VE MATERYAL

#### 3.1 Malzeme Özellikleri

Elyaf malzeme olarak Metyx iki eksenli (biaxial wovnen fabric) 800 gr/m<sup>2</sup> 0-90 (LT), 850 gr/m<sup>2</sup> örgü malzeme, Camelyaf toz bağlayıcı 300-450 gr/m<sup>2</sup> keçe (CSM-Mat 8) malzeme kullanılmıştır. Poliya Polives 702 infüzyon tipi Bisfenol-A Epoksi vinilester reçine vakum infüzyon ile sandviç kompozit plaka üretiminde tercih edilmiştir. Üretim sırasında, reçine katalizörü MEKP (Metiletilketonperoksit), hızlandırıcı olarak kobalt naftanat kimyasal maddeleri kullanılmıştır. Ara (çekirdek) malzeme Airex C.70.75 PVC köpük malzeme kullanılmıştır. Vinilester reçine ve PVC köpük malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri aşağıda tablo 1. ve 2. de verilmiştir.

Tablo 1 . İnfüzyon tipi Bisfenol-A Epoksi vinilester fiziksel ve mekanik özellikleri

Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	1,004 gr/cm <sup>3</sup>
Eğilme Dayanımı	155 MPa
Elastiklik Modülü (Eğilme)	3500 MPa
Kopma uzaması (Eğilme)	6 %
Çekme Dayanımı	76 MPa
Elastiklik modülü (Çekme)	3000 MPa
Kopma Uzaması (Çekme)	5 %
İzod Darbe Dayanımı	16 kJ/m <sup>2</sup>

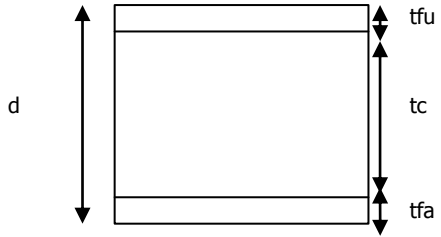
Tablo 2. PVC köpük malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri

Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	0.08 gr/cm <sup>3</sup>
Basma Dayanımı	1.45 MPa
Basma Modülü	104 MPa
Çekme Dayanımı	2 MPa
Çekme Modülü	66 MPa
Kayma Dayanımı	1.2 MPa
Kayma Modülü	30 MPa
Kayma Kopma Uzaması	23 %

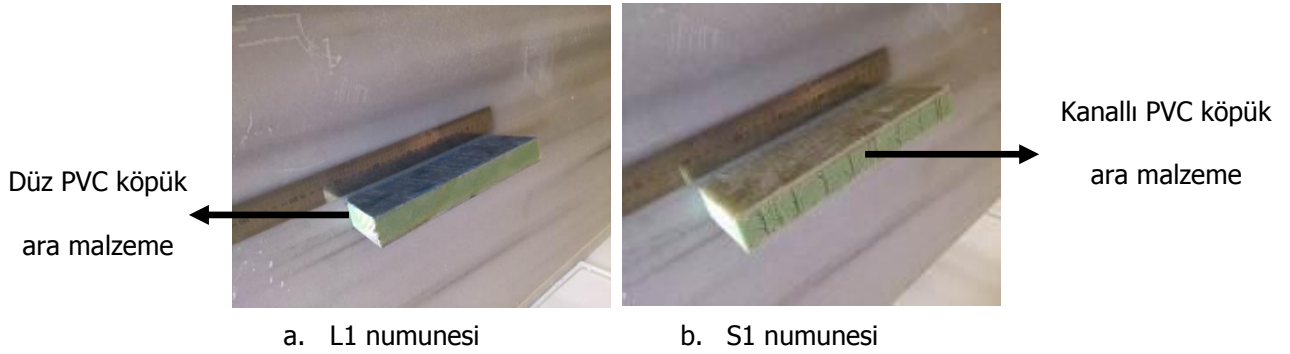
#### 3.2. Test Numuneleri ve Laminasyon Planları

Tekne borda kısmına ait 3 fark laminasyon planı aşağıda tablo da verilmiştir. L1 ve L2 laminasyonlarına sahip sandviç plakalar mekanik laboratuvarında üretildi. S1 numunesi plaka olarak sandviç kompozit yat ve tekne imalatı yapan bir firmadan hazır olarak temin edilmiştir. Laboratuvarda üretilen kompozit plakalardan ASTM C393/C393M-11 standartlarına uygun olarak 250 mm x 80 mm ebatlarında test numuneleri dairesel laminasyon testeresi ile kesilmiştir. Üretim sonunda L1, L2 ve S1 kompozit numunelerin üst, alt laminasyon ve ara (çekirdek) malzeme kalınlıkları aşağıda tablo 3. de verilmiştir.

Tablo 3. Kompozit plakaların laminasyon kalınlıkları (tfu: üst laminasyon, tfa: alt laminasyon, tc: ara malzeme kalınlığı, d: toplam kalınlık)



Numune	tfu (mm)	tfa (mm)	tc (mm)	d (mm)
L1	3	3.5	25	31.5
L2	3	4	25	32
S1	2	4	25	31



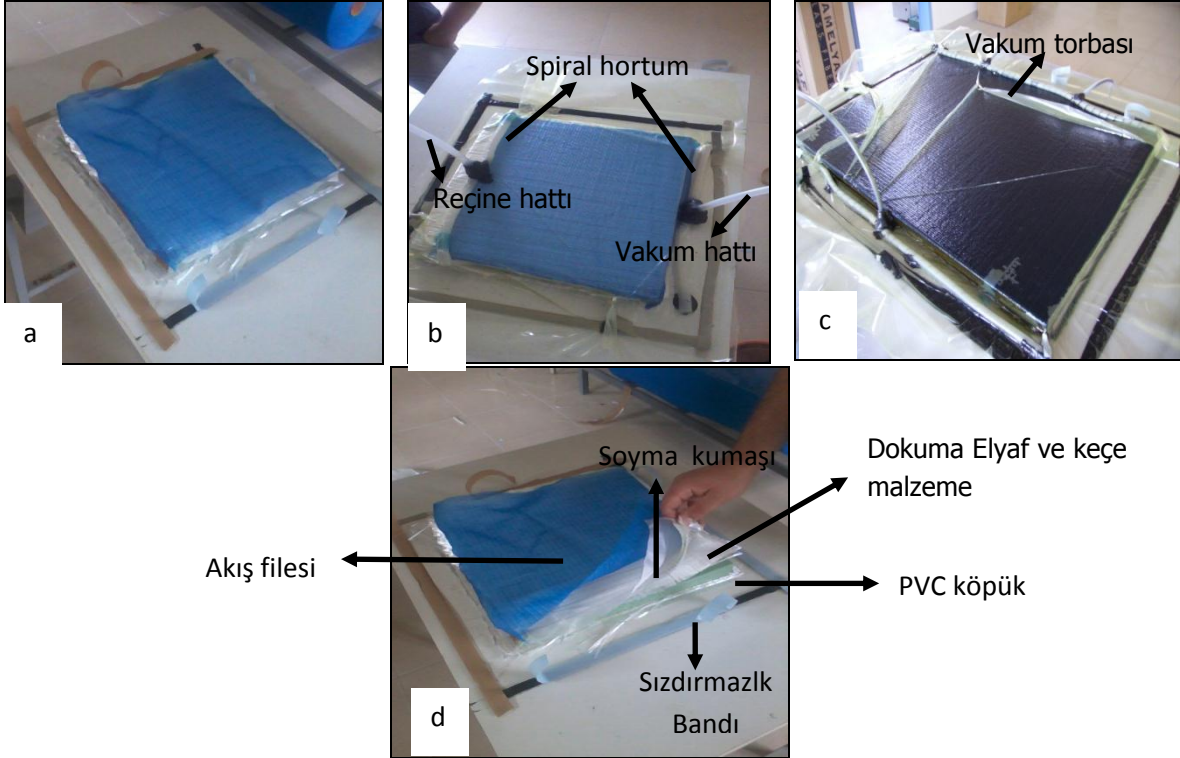
Şekil 6. 250 mm x 80 mm test numuneleri

Tablo 4. L1, L2 ve S1 numunelerine ait laminasyon planları

L1 Laminasyon Planı	L2 Laminasyon Planı	S1 Laminasyon Planı
300 gr/m2 Keçe	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)
450 gr/m2 Keçe	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)
450 gr/m2 Keçe	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)
800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)
850 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (X-+/-45°)	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)
800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)	<b>25 mm PVC Köpük Malzeme</b>	<b>25 mm Kanallı PVC Köpük Malzeme</b>
<b>25 mm PVC Köpük Malzeme</b>	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)
800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)
850 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (X-+/-45°)	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)
800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)	800 gr/m2 E-Cam Dokuma Elyaf (LT-0-90°)
	450 gr/m2 Keçe	450 gr/m2 Keçe
	450 gr/m2 Keçe	450 gr /m2 Keçe

### 3.3 Test Numunelerinin İmalatı

Test numuneleri kesilmeleri için kompozit plakalar halinde laboratuvarında vakum infüzyon (vartm) yöntemi ile üretilmiştir. Üretim laminasyon planına uygun olarak dokuma elyaf ve keçe malzemelerin laminasyon planlarına göre kalıp ayırıcı uygulanmış tezgaha yerleştirilmesi ile başlar (Şekil a). Vakum ve reçine hatları belirlenir spiral hortumlar laminasyon üzerine yerleştirilir (Şekil b). Sızdırmazlık bandı ile çevrelenen laminasyon son olarak vakum torbasıyla kaplanır. Vakum sırasında yırtılma dolayısıyla kaçak olmasını engellemek amacıyla vakum torbasına bolluk bırakılması gerekmektedir (Şekil c). Vakum infüzyon üretimini ile sandviç kompozit üretimi için gerekli materyaller aşağıda Şekil de gösterilmiştir.



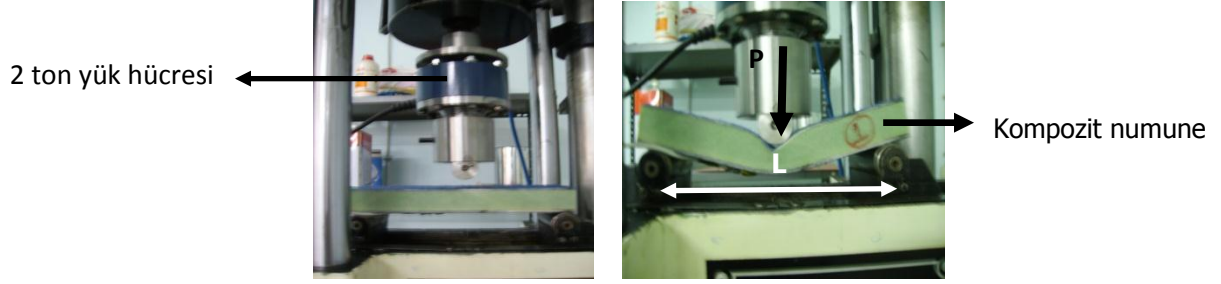
Şekil 7. Vakum infüzyon ile sandviç kompozit plakaların üretilmesi

Vakum infüzyon üretimi sırasında vakum pompası negatif 760 mm hg basınç oluşturulması sağlar. Vakum sağlandıktan sonra reçine hattı kapalı iken vakum torbasında kaçak olup olmadığı kontrol edilir. Vinilester reçine içerisine %1-2 oranında hızlandırıcı kobalt naftanat eklenir homojen bir şekilde dağılması sağlandıktan sonra, %1-2 oranında katalizör MEKP kimyasal eklenir ve reçine hattı açılır. Reçine vakum hattına doğru ilerler. Vakum hattına ulaşan reçine kaçış deposuna vardıktan sonra reçine hattı kapatılır ve fazla reçinenin çekilmesi sağlanır. Son olarak vakum hattı ve pompası kapatılır ve kütleme işlemi için kompozit tabaka bırakılır.

### 3.4 Deneysel Metot

Vakum infüzyon ile üretilen sandviç kompozit numunelerin ASTM C393/C393M-11 standartlarına uygun olarak 3 nokta eğilme testleri yapılmıştır [12]. Eğilme testleri 20 ton hidrolik çekme-basma cihazında 6 mm/dak yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Deplasman değerleri potansiyometrik cetvel ile cihaz üzerinden alınmıştır. Kuvvet değerleri ise 2 ton kapasiteye sahip yük hücresi vasıtasıyla indikatöre aktarılmıştır. Test edilen numunelerin yük, deplasman değerleri indikatörler vasıtasıyla bilgisayara aktarılmıştır.



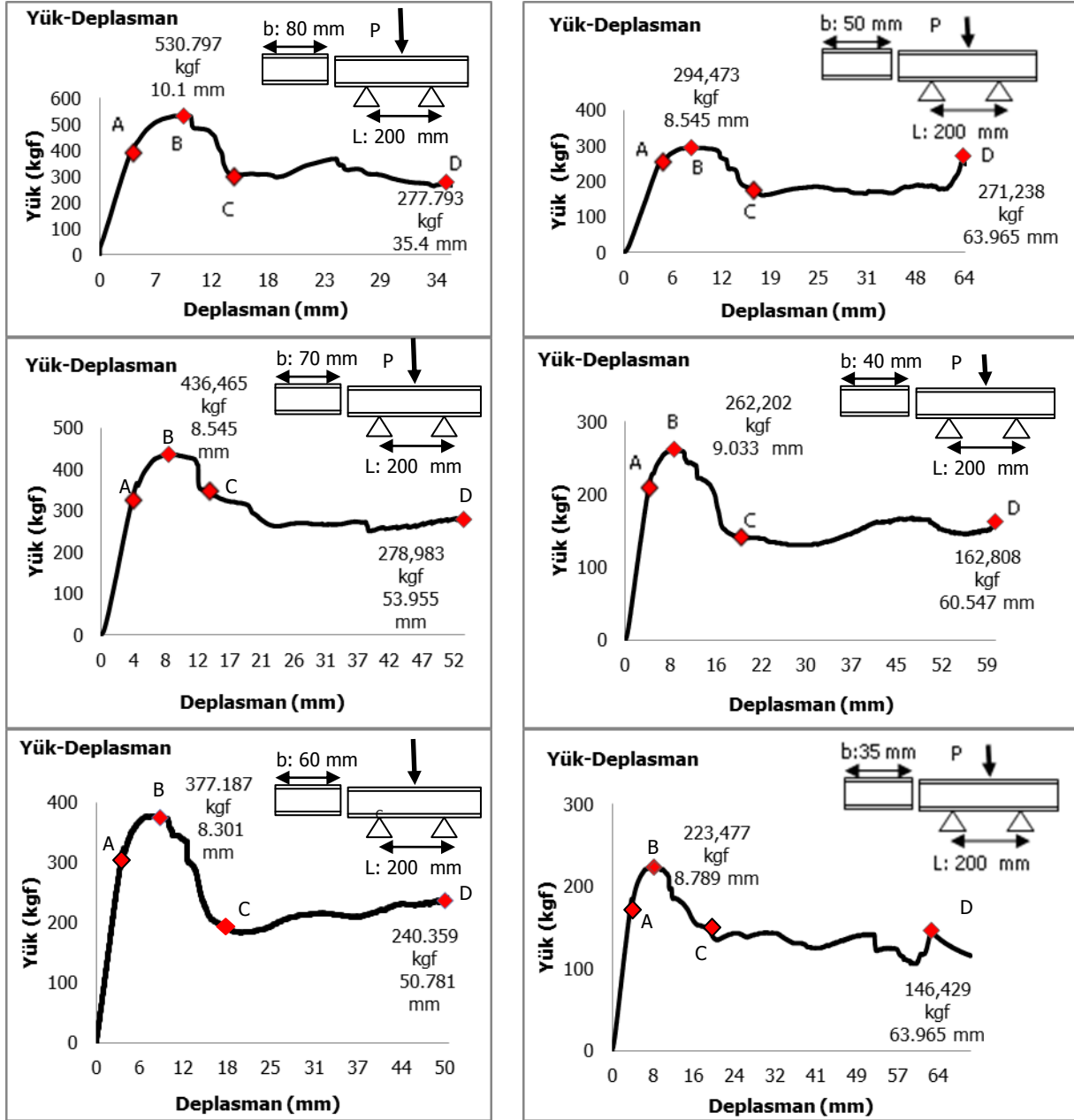


Şekil 8. 3 nokta eğilme testi (L: Destek mesafesi)

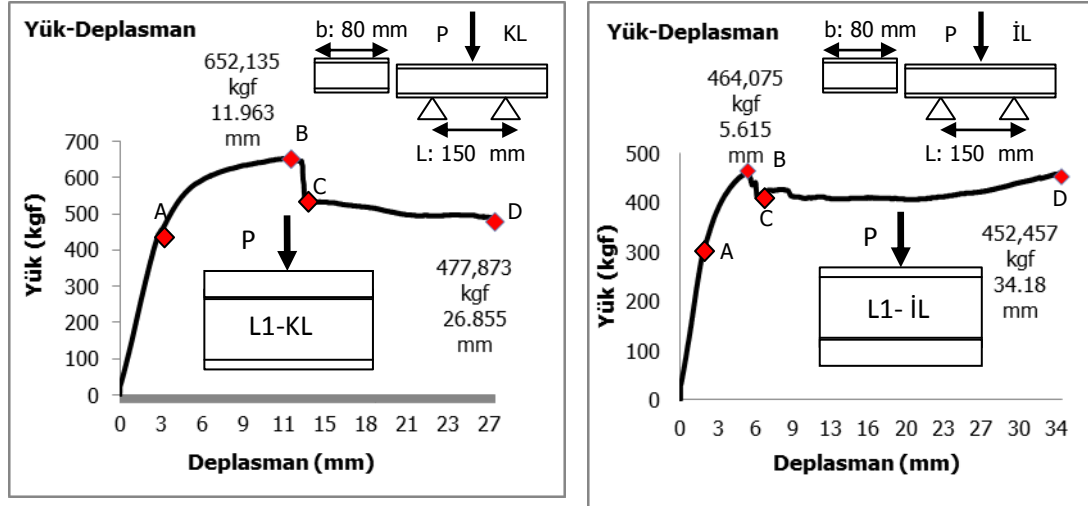
#### 4. SONUÇLAR

Farklı 3 tip tekne borda kısmına ait laminasyonlara sahip denizel sandviç kompozit numunelere ASTM C393/C393M-11 standardı referans alınarak 3 nokta eğilme testleri yapılmıştır. Sandviç kompozit numunelerin farklı destek mesafelerinde ve numune genişliklerinde, kuvvet-deplasman grafikleri çıkartılmış, maksimum kuvvet ve deplasman değerleri, elastik bölgedeki ve maksimum kuvvet değerlerindeki direngenlikleri bulunmuştur.

Sekil 9. da L1 numunesinin farklı genişlik ( $b=80, 70, 60, 50, 40, 35$  mm) değerlerinde elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri sunulmuştur. Grafikler üzerinde A noktası olarak verilen noktalar lineer-elastik bölgenin sonlandığı, B noktası maksimum kuvvet değerlerinin görüldüğü, B-C noktaları arası fiber kırılması sonucu kuvvet değerinin düştüğü ve C-D noktaları arası ise çekirdek malzemenin ezilme gösterdiği düzlük bölgeyi göstermektedir. L1 numunesinin, genişlik ( $b$ ) değerinin düşmesi ile birlikte lineer-elastik bölgenin son bulunduğu kuvvet değerlerinde azalma görülmüştür. A noktası geçildikten sonra basma noktası altında, üst laminasyon tabakasında oluşan çatlak başlangıcı sonucu kuvvet değerinde az miktarda düşme olmaktadır. A-B noktaları arasında eğim azalarak, lineer olmayan davranış ile birlikte kuvvet artışı devam etmiştir. A-B noktaları arasındaki lineer olmayan davranışın nedeni üst laminasyonun hasar görmesine rağmen yük taşımaya devam etmesi ve ara (çekirdek) malzemenin ezilmesi ile toplam kalınlığın azalması sonucu eğilme direngenlik değerindeki düşme olarak düşünülmektedir. B noktası maksimum kuvvet değerleri de numunenin genişlik ( $b$ ) değerlerinin azalması ile azalma göstermiştir. B-C noktaları arasındaki ani düşme ise üst laminasyondaki fiber kırılmasından kaynaklanmaktadır. C-D arasındaki düzlük bölge ara (çekirdek) malzemede ezilmenin devam ettiği alandır.

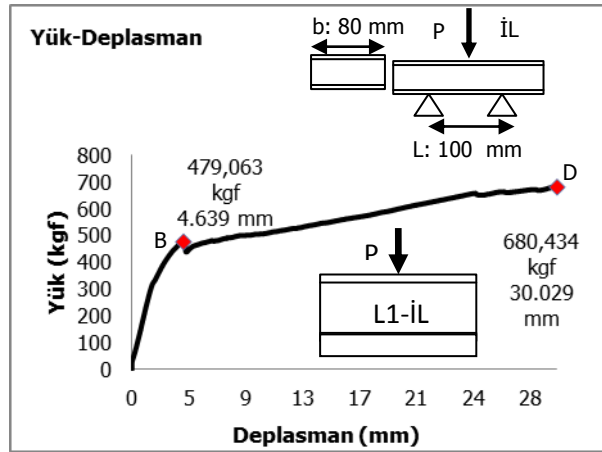


Şekil 9. Farklı genişliklere (b) sahip L1 numunelerinin kuvvet-deplasman grafikleri



a. L1-KL , L:150 mm

b. L1-İL, L: 150 mm



c. L1-İL , L:100 mm

Şekil 10. Farklı basma yönü (eğme yönü) uygulanmış L1 numunelerin kuvvet-deplasman diyagramları (KL: kalın laminasyon üstte, İL: ince laminasyon üstte, L: Destekler arası mesafe)

Şekil 10.a ve b de genişlik değeri (b) 80 mm olan L1 numunesinin L:150 mm destek mesafesi aralığında kalın ve ince laminasyonun basma yönü değiştirilerek yapılan eğme testlerinin sonuçları verilmiştir. Şekil 2.a da, A-B aralığının L1-KL durumunda geniş olma nedeni üst laminasyonun daha fazla yük taşıma kapasitesi dolayısıyla hasarı geciktirmesidir. Şekil 10. a ve b de laminasyonların yer değiştirmesi ile birlikte deplasman değerleri L1-İL numunesinde daha yüksek değerlere ulaşmış ve düzlük bölgenin genişliği artmıştır. L1-KL numunesinde elastik bölge daha yüksek değerlere çıktığı görüldü. Şekil 2.c de ise genişlik değeri (b) 80 mm olan L1-İL numunesinin destek mesafesi L:100 mm olarak eğme testi yapılmıştır. Destek mesafeleri arası mesafesinin azalması ile birlikte kesitte meydana gelen eğilme momenti ve gerilme değerleri azalmakta ve hasara neden olan gerekli kuvvet değerleri artış göstermiştir. Şekil 10. de L1-İL numunelerinde maksimum kuvvet değerindeki ani düşmeden sonra kuvvet değerleri artış eğilimine sahiptir.

Tablo 5. de L1 numunesinin, elastik bölge içinde 150 kgf ve maksimum kuvvet değerlerine karşılık gelen deplasman ve esneklik sabiti (kgf/mm) sonuçları verilmiştir. L1 numunesinde genişlik değerlerinin azalması ile maksimum kuvvet değerlerine karşılık gelen kuvvet/deplasman (esneklik sabiti) sonuçları azalmıştır. Sonuç olarak, aynı yük altında genişliği (b) fazla olan L1 numunesinde daha az çökme olacağı ve rijit olduğu açıktır.

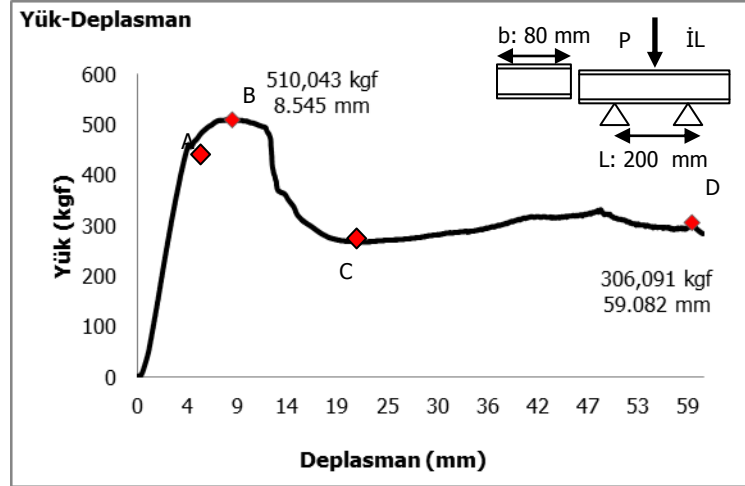
Tablo 5. L1 numunesi için farklı genişliklerde (b) kuvvet-deplasman değerleri

No	Genişlik (b)	Kuvvet (Kgf)	Deplasman (mm)	Kgf/mm
1	80	150	2.441	61.450
		530.797	10.1	52.554
2	70	150	1.953	76.923
		436.465	8.545	51.078
3	60	150	1.953	76.804
		377.187	8.301	45.438
4	50	150	2.93	51.194
		294.473	8.545	34.461
5	40	150	3.906	38.402
		262.202	9.033	29.027
6	35	150	3.418	43.885
		223.477	8.789	25.426

Tablo 6. Farklı basma yönü ve destek mesafelerinde L1 numunesinin kuvvet-deplasman değerleri

No	Destek Genişlik (L)	Kuvvet Uygulama tarafı	Kuvvet (Kgf)	Deplasman (mm)	Kgf/mm
1	150	L1-KL	300	1.953	153.609
			652.135	11.963	54.512
2	150	L1-İL	300	1.953	153.609
			464.075	5.615	82.649
3	100	L1-İL	300	2.686	111.690
			479.063	4.639	103.268

Tablo 6 de ise farklı basma yönü ve destek mesafeleri için L1 numunesinin elastik bölgede 300 kgf ve maksimum kuvvet değerlerinde elde edilen deplasman ve esneklik sabiti (kgf/mm) değerleri verilmiştir. Destek mesafesinin L:150 mm olan L1-İL numunesinin esneklik sabiti yüksek ve rijit olduğu görülmektedir. L: 100 mm olan L1-İL numunesinde ise destek mesafesinin azalması ile esneklik sabiti (kgf/mm) artmıştır.



Şekil 11. L2 numunesine ait kuvvet-deplasman grafiği  
(İL: ince laminasyon üstte, L:destekler arası mesafe)

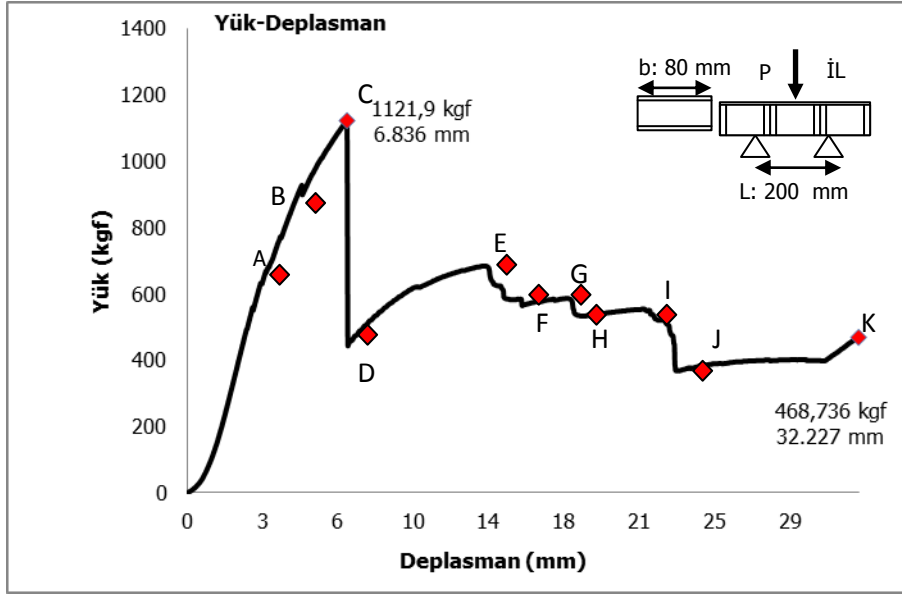
Şekil 3. de L2 numunesine ait kuvvet-deplasman grafiği L1 numunesine ait diyagramla benzer davranış göstermiştir. Yük ince laminasyon tarafından uygulanmış ve destekler arası mesafe L:200 mm olarak belirlenmiştir. A noktasına kadar elastik-lineer davranış, sonrasında basma yükü altında fiber laminasyonundaki çatlak başlangıcı oluşmuştur. Fiber laminasyon ve ara (çekirdek) malzemenin ezilmesi yükün B noktasına maksimum kuvvet değerine ulaşmasını sağlamıştır. B-C noktaları arasında fiber kırılması gerçekleşmiş ve C-D noktaları arası ara (çekirdek) malzeme ezilmesi ile devam etmiştir.

Tablo 7. L2 numunesine ait kuvvet-deplasman değerleri

Destek Genişlik (L)	Kuvvet (kgf)	Deplasman (mm)	Kgf/mm
200	300.928	2.93	102,706
	510.043	8.545	59.689

Tablo 7. de L2 numunesinin elastik bölge sınırları içerisinde 300 kgf yük ve maksimum kuvvet değerlerine karşılık gelen deplasman ve esneklik katsayıları verilmiştir.

Şekil 12 de S1 numunesine ait kuvvet-deplasman diyagramı verilmiştir. Kuvvet ince laminasyon (İL) üzerinden uygulanmış ve destekler arası L:200 mm olarak eğme testi gerçekleştirilmiştir. S1 numunesi, 25 mm kalınlığında düz PVC köpük içeren L1 ve L2 numunelerinden farklı olarak, reçine akışına yardımcı olan 25 mm kalınlığa sahip kanallı PVC köpük ara (çekirdek) malzemeye sahiptir. L2 numunesi ile aynı laminasyon planına sahiptir. L1 ve L2 numunesi göre farklı bir kuvvet-deplasman davranışı göstermiştir. Kuvvet deplasman diyagramı üzerinde belirtilen her bir nokta (A, B, C...) bir hasarın ilerlemesini açıkça göstermektedir.



Şekil 12. S1 numunesine ait kuvvet-deplasman grafiği  
(İL: ince laminasyon üstte, L:destekler arası mesafe)

Şekil 12 de S1 numunesi A noktasına kadar elastik-lineer davranış göstermiştir. A-B noktaları arası fiber laminasyonda çatlak başlangıcı ve ilerlemesi oluşmuştur. B noktasında ise basma kuvvetinin altında ara (çekirdek) malzemede çatlak başlangıcı sonucu ilk yük düşmesine sebep olmuştur. B-C noktaları arası, çatlağın ara (çekirdek) malzemede 45° ilerlemesi eğimin azalmasının nedenidir. C noktasında maksimum kuvvetin 1121.9 kgf ulaşması ile birlikte kayma gerilmesi hasarı oluşmuştur. C-D noktaları arası kuvvet değerinde ani düşme çekirdek malzemenin tamamen hasara uğradığını göstermektedir. D noktasında çatlak alt fiber laminasyon-ara (çekirdek) malzeme ara yüzeyine ulaşmıştır. D-E noktaları arası ise alt laminasyon yükü taşımış ve kuvvet değerlerinde artışa neden olmuştur. E-F, G-H noktaları aralarında yük düşmelerinde alt fiber laminasyon-ara (çekirdek) malzemede çatlak oluşumu görülmektedir. Son olarak I-J noktaları arasında ise alt fiber tabakası ve çekirdek malzemenin tamamen ayrılması delaminasyon ile sonuçlanmıştır.

Tablo 8. de S1 numunesinin elastik bölge sınırları içerisinde 300 kgf kuvvet ve maksimum kuvvet değerlerine karşılık gelen deplasman değerleri ve esneklik katsayıları verilmiştir.

Tablo 8. S1 numunesinin kuvvet-deplasman değerleri

Destek Genişlik (l)	Kuvvet (kgf)	Deplasman (mm)	Kgf/mm
200	303.509	1.953	155.406
	1121.9	6.836	164.116

## 5. YORUMLAR

3 farklı L1, L2 ve S1 numunelerine yapılan 3 nokta eğme testleri sonucu farklı hasar tipleri orta çıkmıştır. Düz PVC köpük içeren L1 ve L2 numunelerinde fiber kırılması ve ara (çekirdek) malzeme ezilmesi ile karşılaşmış, fakat delaminasyon ile fiber tabaka-ara malzeme ayrılması olmamıştır. S1 numunesi ise kayma gerilmesi sonucu çekirdek malzeme kırılması ve delaminasyona uğramıştır.

L1 numunesinde yükün uygulandığı üst tabakada kalın laminasyon seçimi (KL), maksimum kuvvet ve deplasman değerlerinde artışa neden olurken, ince laminasyonun üst tabakada kullanılması (İL) malzemenin hasara uğrayana kadar olan deformasyonun artışını ve esneklik sabitinin (maks. kuvvet/deplasman) yükselmesini sağlamıştır (Şekil 2. a, b).

Tablo 9. L1 numunesinin sabit L= 150 mm değerinde L1-İL ve L1-KL numunelerinin kuvvet-deplasman değerleri (L1-İL:ince laminasyon üstte L1 numunesi, L1-KL:kalın laminasyon üstte L1 numunesi)

	Destek mesafesi (L) mm	Genişlik (b) mm	Maksimum kuvvet (kgf)	Deplasman (mm)	Kgf/mm
L1-KL	150	80	652.135	11.963	54.512
L1-İL	150	80	464.075	5.615	82.649

Sabit genişlikte b: 80 mm olan L1 numunesinin destekler arası mesafe değiştirilerek elde edilen değerler Tablo 6 da karşılaştırılmıştır. L uzunluğunun azalması maksimum kuvvete karşılık gelen deplasman değerlerinin azalmasına ve esneklik sabitinin artışını sağlamıştır.

Tablo 10. L1 numunesinin sabit L= 100,150,200 mm değerlerinde kuvvet-deplasman sonuçları

No	Destek mesafesi (L) mm	Genişlik (b) mm	Maksimum kuvvet (kgf)	Deplasman (mm)	Kgf/mm
1	100	80	479.063	4.639	103.268
2	150	80	464.075	5.615	82.649
3	200	80	530.797	10.1	52.554

L1, L2 ve S1 numunelerinin Tablo 7 de destek mesafeleri (L) ve genişlikleri (b) sabit tutularak kuvvet- deplasman değerleri karşılaştırılmıştır. S1 numunesi 1121 kgf maksimum kuvvet değeri ile en yüksek değere ulaşmıştır. Ayrıca S1 numunesinin deplasman değerleri diğer iki numune ile karşılaştırıldığında, hem elastik bölgede hem de maksimum kuvvete değerine ulaştığı anda en yüksek rijitliğe sahip kompozit plaka olduğu görülmektedir.

Tablo 11. L1, L2, S1 numunelerinin L: 200 mm, b:80 mm değerlerinde kuvvet-deplasman değerlerinin karşılaştırılması

Numune	Destek mesafesi (L) mm	Genişlik (b) mm	Kuvvet (kgf)	Deplasman (mm)	Kgf/mm
L1	200	80	530.797	10.1	52.554
			300	3.662	81.922
L2	200	80	510.043	8.545	59.689
			300	2.93	102.706
S1	200	80	1121.9	6.836	164.116
			300	1.953	155.406

## 6. KAYNAKÇA

- [1] SPUR, D., The Birth of Fiberglass Boats, Good Old Boot Magazine, 2, 6, (1999).
- [2] GOREV, Y, A., RIVKIND, V, N., Polyester Composites for Shipbuilding, Russian Journal General Chemistry, 80,10,1098-2114,(2010).

- [3] ASM Handbook Composites, 21, Custom Sailing and Yacht Design, Vacuum Infusion, 1091-1109, 1185-1221,(2001).
- [4] LARSSON, L., ELIASSON, R., Yat Tasarımı Genel İlkeleri, 263-281, Birsen Yayınevi, 2006.
- [5] MOURITZ,A, P., GELLERT, E., BURCHILL P., CHALLIS K., Review of advanced composite structures for naval ships and submarines, Composite Structures, 53, 21-41, (2001).
- [6] KARLSSON, K, F., ASTROM, B, T., Manufacturing and applications structural sandwich components, Composites Part A, 28A, 97-111, (1997).
- [7] SANJAY, K, M., Compsites Manufacturing, Materials, Product and Process Engineering, 175, CRC Press, (2002).
- [8] STRONG, A. B., Fundamentals of Composites Manufacturing, Materials, Methods, and Applications
- [9] BELLA, G, D., CALABRESSE, L., BORSELLINO C., Mechanical Chracterization of a glass/polyester sandwich structure form arine applications, Materials and Design, 42, 486-494, (2012).
- [10] MANALO, A,C., ARAVINTHAN T., KARUNASENA W., ISLAM, M, M., Flexural behaviour of structural fibre composite sandwich beams in flatwise and edgewise positions, Composite Structure, 92, 984-995, (2010).
- [11] ZINNO, A., BAKIS, C.E., PROTA, A., Mechanical chracterization and structural behaviour of composite sandwich structures for train applications, 8th International Conference on Sandwich Structures, Porto, (2008).
- [12] ASTM C393/C393M-11, Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Construction by Beam Flexure, ASTM.