

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**ÇOK KATMANLI ÇEKİRDEK YAPIYA SAHİP AHŞAP TABAKALI
SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZDA DARBE VE DARBE
SONRASI BASMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

TAYFUR KEREM DEMİRCİOĞLU

DOKTORA TEZİ

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. İrfan AY (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. Enver ATİK
Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU
Prof. Dr. Ali ORAL
Dr. Öğr. Üyesi İlker EREN

BALIKESİR, ŞUBAT - 2020

KABUL VE ONAY SAYFASI

Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU tarafından hazırlanan “ÇOK KATMANLI ÇEKİRDEK YAPIYA SAHİP AHŞAP TABAKALI SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZDA DARBE VE DARBE SONRASI BASMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 4 Şubat 2020 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Danışman

Prof. Dr. İrfan AY

Balıkesir Üniversitesi

Üye

Prof. Dr. Enver ATİK

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Üye

Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU

Dokuz Eylül Üniversitesi

Üye

Prof. Dr. Ali ORAL

Balıkesir Üniversitesi

Üye

Dr. Öğr. Üyesi İlker EREN

Balıkesir Üniversitesi

İmza

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Çok Katmanlı Çekirdek Yapıya Sahip Ahşap Tabakalı Sandviç Kompozitlerin Düşük Hızda Darbe Ve Darbe Sonrası Basma Davranışlarının İncelenmesi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU

Bu doktora tez çalışması, Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından (2010/40) nolu proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

**ÇOK KATMANLI ÇEKİRDEK YAPIYA SAHİP AHŞAP TABAKALI
SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZDA DARBE VE DARBE SONRASI
BASMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ
DOKTORA TEZİ
TAYFUR KEREM DEMİRCİOĞLU
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. İRFAN AY)
BALIKESİR, ŞUBAT - 2020**

Bu çalışma, ahşap tabakalı hibrit sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışı üzerine deneysel bir araştırma sunmaktadır. Geleneksel sandviç kompozitlerin darbe performansını arttırmak için, köpük çekirdek yapı arasına E-cam kompozit tabaka eklenmiş ve ahşap tabakalar ile çekirdek yapı arasında kauçuk mantar kullanılmış böylece çeşitli alternatif tasarımlar geliştirilmiştir. Düşük hızlarda darbe uygulayan bir ağırlık düşme test makinesi kullanılarak farklı enerjilerde 15J, 30J, 45J, 75J darbe testleri yapılmıştır. Darbe hasarlarını ve penetrasyon derinliklerini incelemek için numunelerin kesitleri alınmıştır. Enerji absorbe etme kapasitesi, maksimum kontak kuvveti ve penetrasyon derinliği açısından numunelerin darbe performansları değerlendirilmiştir. Çok tabakalı çekirdek yapı tasarımında darbenin yol açtığı hasarın azalmasıyla enerji absorbe etme kapasitesi önemli ölçüde iyileşmiştir. Geri dönüştürülebilir malzemelerin oranı ve birim maliyet başına enerji absorbe etme seviyeleri her bir tasarım için hesaplanmıştır. Dişbudak ve çam, sandviç kompozit yapıda, E-cam tabaka altında ara katman olarak kullanılmış ve darbe sonrası basma davranışları incelenmiştir. Sandviç tabakalar vakum destekli reçine kalıplama yöntemiyle üretilmişlerdir. Konik ve yarı-küresel uçlu impaktörler ile darbe testi 30J ve 60J enerji seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Ahşabın ara katman olarak kullanılması, darbe sonrası sonra basma dayanımında artışa neden olmuş, hasarın derinliğini de azaltmıştır. Ahşap ara katman kullanımı, E-cam kompozit tabaka ve köpük çekirdek kalınlıklarını azaltarak sandviç yapı içindeki geri dönüştürülebilir ahşap malzemenin oranını yükseltmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Ahşap tabaka, sandviç yapı, düşük hızda darbe davranışı, darbe sonrası basma, hasar.

ABSTRACT

**INVESTIGATION OF LOW VELOCITY IMPACT
AND COMPRESSION AFTER IMPACT BEHAVIOR OF SANDWICH
COMPOSITES WITH MULTILAYER CORE AND WOODEN LAYERS
PH.D THESIS
TAYFUR KEREM DEMIRCIOĞLU
BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: PROF. DR. İRFAN AY)
BALIKESİR, FEBRUARY - 2020**

In this study, an experimental investigation on the low-velocity impact behavior of wood skinned hybrid sandwich composites was presented. Several alternative design configurations were developed by using rubbercork and E-glass composite layers between the foam core and wood skin in order to improve the impact performance of conventional sandwich composites. Low-velocity impact testing was performed using a drop weight test machine at different impact energies 15J, 30J, 45J, 75J and destructive cross-sectioning was performed to examine the interior damage growth and penetration depth of the specimens. The impact performance of the specimens was evaluated in terms of energy absorption capacity, maximum contact force and penetration depth. The multi-core design concept significantly improved the energy absorption capacity with a reduced extent of impact induced damage. The proportion of recyclable materials in each configuration and the energy absorption level per unit cost were also presented for the interest of product designers. Ashwood and pinewood were used as an intermediate layer under E-glass in sandwich composite structure and their compression after impact behavior was investigated. Sandwich panels were manufactured by using vacuum assisted resin transfer molding method. Impact tests were performed under 30J and 60J energy levels with conical and hemispherical impactors. Using pinewood and ashwood intermediate layers increased the residual compression after impact strength and decreased the depth of the impact damage. The intermediate wooden layers have also a potential to reduce the thickness of the composite face sheets and foam core which may increase the proportion of the recyclable wooden materials within the sandwich structure.

KEYWORDS: Wood skin, sandwich structures, low velocity impact, compression after impact, damage.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
KISALTMALAR LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Kompozit Malzemenin Tarihçesi.....	1
1.2 Kompozit Malzeme Tanımı ve Sınıflandırılması	5
1.3 Kompozit Malzemelerin Karşılaştırılması	7
1.4 Fiber Takviyeli Polimer Matris Kompozit Malzemeler.....	13
1.4.1 Laminat Kompozitler	16
1.4.2 Sandviç Kompozitler.....	16
1.5 Deniz Taşıtlarında Fiber Takviyeli Polimer Matris Kompozitlerin Kullanımı	20
1.6 Denizel Sandviç Kompozit Malzemeler	23
1.6.1 Takviye Elemanları	25
1.6.2 Reçineler	27
1.6.3 Çekirdek Malzemeler	29
1.7 Ahşap Kompozitler	32
1.7.1 Ahşap Kompozitlerde Çekirdek Malzeme Kullanımı.....	34
1.8 Denizel Sandviç Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	42
1.8.1 El Yatırma Yöntemi (HLU)	44
1.8.2 Vakum Torbalama Yöntemi (VB)	47
1.8.3 Vakum destekli reçine transfer metodu (VARTM)	50
2. LİTERATÜR ÖZETİ	59
3. AHŞAP MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ	76
3.1 Ahşap Ürünler	77
3.2 Ahşabın Mekanik Davranışları	79
3.3 Ahşap Malzemenin Isıl İşlemi	80
3.4 Ahşabın Yangın Dayanımı.....	82
3.5 Kontrplak ile Masif Ahşabın Karşılaştırılması	83
4. SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZDA DARBE DAVRANIŞLARI VE HASAR MEKANİZMALARI	85
4.1 Düşük Hızda Darbe (DHD)	85
4.2 Sandviç Kompozitlerde Düşük Hızda Darbe	85
4.3 Darbe Sonrası Dayanım	87
4.3.1 Artık Çekme Dayanımı	88
4.3.2 Artık Basma Dayanımı.....	88
4.4 Darbe Hasar Toleransının Arttırılması.....	89
4.5 Düşük Hızda Darbe Etkisinde Hasar Mekanizmaları	89

4.6 Denizel Kompozitlerde Kullanılan Malzemelerin Darbe Performansları	91
4.6.1 PVC Köpük ve Sandviç Yapıların Darbe Özellikleri	92
4.6.2 Darbe Tasarım Hususları.....	94
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	97
5.1 Dişbudak, İroko ve Çam'ın Eğilme, Basma ve Darbe Testleri.....	97
5.2 TKS, TKSK, İKSK Tasarımlarında Kullanılan Malzemeler ve Üretim Yöntemi.....	99
5.3 TKS, TKSK, İKSK Tasarımlarının Ağırlık Düşme Testleri.....	102
5.4 KSY ve ÇSY Tasarımlarında Kullanılan Malzemeler ve Üretim Yöntemi.....	103
6. BULGULAR.....	105
6.1 TKS, TKSK, İKSK Tasarımlarının Darbe Testleri.....	105
6.1.1 Tek Köpük Çekirdekli (TKS), Dişbudak Dış Tabakalı Sandviç Yapı.....	106
6.1.2 Tek Köpük Çekirdekli, Dişbudak Dış Tabakalı ve Kauçuk-Mantar Ara Tabakalı Sandviç Yapı (TKSK).....	109
6.1.3 İki Köpük Çekirdekli, Dişbudak Dış Tabakalı ve Kauçuk-Mantar Ara Tabakalı Sandviç Yapı (İKSK).....	113
6.2 KSY, ÇSY Tasarımlarının Darbe ve Darbe Sonrası Basma Testleri.....	119
6.2.1 Kesit Alma	120
6.2.2 Darbe Sonrası Basma (DSB).....	122
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	128
7.1 TKS, TKSK, İKSK Tasarımlarının Darbe Sonuçları.....	128
7.2 KSY, ÇSY Tasarımlarının Darbe ve Darbe Sonrası Basma Sonuçları.....	129
8. KAYNAKLAR	130
ÖZGEÇMİŞ	146

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Kompozit bir malzemedeki fazlar arasındaki arayüzler a) birincil ve ikincil fazlar arasında doğrudan bağlanma, b) birincil fazları bağlamak için üçüncü bir bileşen eklenerek arafaz oluşturulması.	6
Şekil 1.2: Mühendislik malzemelerinin sınıflandırılması.	7
Şekil 1.3: Kompozitlerin mühendislik malzemeleriyle karşılaştırılması (Tech, 2013).	8
Şekil 1.4: Malzemelerin özgül mukavemetinin yıllara göre değişimi (Kaw, 2005).....	8
Şekil 1.5: Özgül elastik modülüne karşı özgül mukavemet grafiği (Daniels & Ishai, 2006).....	9
Şekil 1.6: Geleneksel tek parça olarak davranan (monolitik) malzemeler ile kompozit malzemeler arasında karşılaştırma (Chawla, 2012).....	10
Şekil 1.7: Mühendislik malzemelerinin karşılaştırılması a)yoğunluk, b)mukavemet, c)rijitlik, d) tokluk, e)uzama, f) maliyet (Material properties, 2019).	11
Şekil 1.8: Fiber takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi a)sürekli ve çekme doğrultusunda yönlendirilmiş, b)süreksiz ve çekme doğrultusunda yönlendirilmiş, c)süreksiz ve rastgele yönlendirilmiş.	14
Şekil 1.9: a)Gevrek fiber ve sünek matrise ait gerilme-gerinme eğrisinin şematik gösterimi, b) yükün fiber doğrultusunda uygulandığı boylaması durumu için gerilme-uzama eğrisinin şematik gösterimi (Callister & Rethwisch, 2007).....	15
Şekil 1.10: Sandviç kompozit malzeme bileşenleri.	17
Şekil 1.11: I profil ve sandviç yapı elamanlarının karşılaştırılması.....	18
Şekil 1.12: Denizel kompozit malzemelerde takviye elemanı kullanımı (%) (Associates, 1999).....	27
Şekil 1.13: Denizel kompozit malzemelerde reçine kullanımı (%) (Associates, 1999).....	29
Şekil 1.14: Denizel kompozit malzemelerde çekirdek kullanımı (%) (Associates, 1999)..	32
Şekil 1.15: Sandviç yapı etkisi.....	33
Şekil 1.16: Sandviç yapıyı oluşturan malzeme özelliklerinin değerlendirmesi (Associates, 1999).....	34
Şekil 1.17: Ticari olarak kullanılan ahşap tabakalı sandviç kompozitler.....	35
Şekil 1.18: Balsa çekirdek malzemeye sahip ahşap dış tabakalı sandviç yapı.....	35
Şekil 1.19: Mantar kauçuk çekirdek malzemeye sahip ahşap dış tabakalı sandviç yapı. ...	36
Şekil 1.20: Alüminyum balpeteği çekirdek malzemeye sahip ahşap dış tabakalı sandviç yapı.	38
Şekil 1.21: Polipropilen balpeteği çekirdek malzemeye sahip ahşap dış tabakalı sandviç yapı.	38
Şekil 1.22: Nomex balpeteği çekirdek malzemeye sahip ahşap dış tabakalı sandviç yapı.	39
Şekil 1.23: Kâğıt balpeteği çekirdek malzemeye sahip ahşap dış tabakalı sandviç yapı. ...	39
Şekil 1.24: Dendrolight hafif sandviç panelin üretim aşamaları.	40
Şekil 1.25: a) Ahşap petekli köpük çekirdek yapıya sahip okume dış tabakalı sandviç yapı, b) ahşap petekli köpük çekirdek yapıya sahip kauçuk mantar ara tabakalı, okume dış tabakalı, sandviç yapı.	41
Şekil 1.26: Deniz taşıt üretiminde tercih edilen üretim yöntemleri (Associates, 1999).	43
Şekil 1.27: Denizcilik endüstrisi için takviyeli termoset ve termoplastik reçinelerin kompozit üretimindeki gelişmelere bağlı yıllık taşınma miktarları (Associates, 1999).....	44

Şekil 1.28: El yatırma yöntemi ile laminat üretimi.....	45
Şekil 1.29: El yatırma yöntemi ile tekne imalatı a) kalıp hazırlanması, b) jel kaplama uygulaması, c) cam elyaf yatırma, d) reçine emdirme,e) kalıptan çıkarma, f) son ürün.....	45
Şekil 1.30: Vakum torbalama yöntemi ile laminat üretimi.....	47
Şekil 1.31: VARTM elemanları ve üretim tesisatı (Calabrese vd., 2016).....	51
Şekil 1.32: VARTM reçine besleme yaklaşımları ve dolma zamanları (Pemberton vd., 2018).....	52
Şekil 1.33: Birleştirme basıncının etkisi (Pemberton vd., 2018).....	52
Şekil 1.34: Laminat içindeki basınç farkını gösteren reçine infüzyon işleminin şematik gösterimi a) tamamen ıslanmış takviye, b) kalınlık boyunca akış gradyanı, c) kuru takviye (Pemberton vd., 2018).....	53
Şekil 1.35: VARTM ile sandviç kompozit malzeme üretimi.....	54
Şekil 1.36: Sandviç kompozit malzemenin VARTM üretim aşamaları a) cam elyaf ve köpük çekirdek malzemelerin kalıba yerleşmesi, b) spiral hortumların çekilmesi, c) vakum torbasının yerleşmesi, reçine ve vakum hortumların takılması, d) VARTM işleminin yapılması.....	56
Şekil 3.1: Ağaç gövdesinin kısımları.....	77
Şekil 3.2: Kütükten kereste kesme yöntemleri a)rift kesim, b)çeyrek kesim, c)düz kesim.....	78
Şekil 3.3: Ahşap malzeme yüzleri.....	79
Şekil 3.4: Lif yönü ve büyüme halkalarına göre üç temel ahşap ekseni.....	80
Şekil 3.5: Isıl işlem görmüş ahşabın özellikleri.....	80
Şekil 3.6: Ahşap ısıtma işlem safhaları grafiği.....	82
Şekil 4.1: a)Düşük hızda darbe, b) orta hızda darbe, c) yüksek hızda darbe.....	85
Şekil 4.2: a)Mod-I açılma veya çekme (tension), b) Mod-II kayma (sliding/shear), c) Mod-III kesilme veya yırtılma (tearing) kırılma modları (Parton, 1992).....	86
Şekil 4.3: Yapısal Yalıtımlı Panel (SIP).....	87
Şekil 4.4: Darbe sonrası artık çekme dayanımı.....	88
Şekil 4.5: Düşük hızda darbe olayında tipik yük-deplasman eğrileri a)geri sekme, b)penetrasyon, c)perforasyon (Atas & Sevim, 2010).....	92
Şekil 4.6: Düşük hızda darbe olayında impaktör ile temas kuvveti-deplasman ilişkisi a)kalın bir levhada penetrasyon, b)ince bir levhada delinme başlangıcı ve c) ince bir levhada tamamen delinme (Atas & Sayman, 2008).....	93
Şekil 5.1: Darbe test cihazı ve impaktörlerin şematik çizimleri.....	98
Şekil 5.2: Dişbudak, iroko, çam ahşap numunelerin farklı enerji seviyelerindeki penetrasyon derinlikleri.....	98
Şekil 5.3: Üç farklı sandviç tasarımın patlatılmış şematik çizimleri.....	99
Şekil 5.4: Instron CEAST Fractovis Plus-7526 test cihazı numune sabitleme düzeneği..	102
Şekil 5.5: Instron CEAST Fractovis Plus-7526 test cihazı kısımları.....	103
Şekil 5.6: ÇSY numuneleri.....	104
Şekil 5.7: a) KSY, b) ÇSY, c) ÇSY+Kanallı köpük şematik çizimleri.....	104
Şekil 6.1: DHD test sonuçları; a) penetrasyon derinliği, b) penetrasyon derinliği/numune kalınlığı, c) absorbe edilen enerji, d) spesifik absorbe edilen enerji, e) maksimum temas kuvveti ve f) absorbe edilen enerji/maliyet.....	106
Şekil 6.2: a) Yük deplasman eğrileri ve b) Y25'in kesit hasar görüntüsü.....	107
Şekil 6.3: a) Yük deplasman eğrileri ve b) Y15'in kesit hasar görüntüsü.....	108
Şekil 6.4: a) Yük deplasman eğrileri ve b) Y25K2'in kesit hasar görüntüsü.....	110
Şekil 6.5: a) Yük deplasman eğrileri ve b) Y15K2'in kesit hasar görüntüsü.....	111

Şekil 6.6: a) Yük deplasman eğrileri ve b) Y15K5'nin kesit hasar görüntüsü.	112
Şekil 6.7: a) Yük deplasman eğrileri ve b) YYK2'nin kesit hasar görüntüsü.....	114
Şekil 6.8: a) Yük deplasman eğrileri ve b) DDK2'nin kesit hasar görüntüsü.....	115
Şekil 6.9: a) Yük deplasman eğrileri ve b) YDK2'nin kesit hasar görüntüsü.....	116
Şekil 6.10: a) Yük deplasman eğrileri ve b) DYK2'nin kesit hasar görüntüsü.....	117
Şekil 6.11: a) Enine dik basma testi öncesi sandviç kompozitin fotoğrafı, b) enine dik basma test aparatı şematik görünümü ve numune boyutları.....	120
Şekil 6.12: DAD ve ÇAD sandviç panellerinin YK ve KO impaktörlerin 30 J darbesinden sonraki kesit hasar görüntüleri.	121
Şekil 6.13: Sandviç panellerinin YK ve KO impaktörlerin 60 J darbesinden sonraki kesit hasar görüntüleri.....	122
Şekil 6.14: YK ve KO impaktörler ile uygulanan 60 J darbeden sonra kontrol ve KSY numunelerinin yük düzlem içi yer değiştirme eğrileri.....	124
Şekil 6.15: ÇAD ve DAD Kontrol numunelerinin yük düzlem içi yer değiştirme eğrileri.....	125
Şekil 6.16: Yarı küresel (YK) impaktör ile hasar görmüş ÇAD numunelerinin yük düzlem içi yer değiştirme eğrileri.	125
Şekil 6.17: Konik (KO) impaktör ile hasar görmüş ÇAD numunelerinin yük düzlem içi yer değiştirme eğrileri.....	126
Şekil 6.18: Hasarlı DAD ve DAK numunelerinin yük düzlem içi yer değiştirme eğrileri.....	126
Şekil 6.19: DSB testlerinden sonra hasarlı KSY, ÇAD, DAD ve DAK sandviç panellerinin fotoğrafları.	127

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 5.1: Isıl işlem görmüş ahşap malzemelerin mekanik özellikleri.	97
Tablo 5.2: PVC köpük çekirdek malzemelerin özellikleri.	100
Tablo 5.3: Kauçuk mantar ara tabakanın özellikleri.	100
Tablo 5.4: E-cam/vinil ester iç tabakanın düzlem içi özellikleri.	101
Tablo 5.5: Numunelerin üretim tasarımları.	101
Tablo 6.1: Sandviç panellerin kesit görünümünde darbe hasar boyutları.	119
Tablo 6.2: Kontrol ve darbe sonrası panellerin basma testi sonuçları.	122

SEMBOL LİSTESİ

A	: Kesit alanı (mm^2)
b	: Kiriş genişliği (mm)
c	: Nötr eksen den kirişin en dış fibere olan mesafesi (mm)
d	: Çekirdek kalınlığı (mm)
E	: Elastisite Modülü (N/mm^2)
ϵ_{akm}	: Matris akma gerinmesi
ϵ_f	: Fiber hasar gerinmesi
F_{max}	: Maksimum kuvvet (N)
GPa	: Giga paskal
I	: Atalet Momenti (mm^4)
J	: Jolue
K.E.	: Kinetik enerji
kg	: Kilogram
kN	: Kilonewton
L	: Destek aralığı (mm)
m	: Kütle (kg)
M	: Moment (N.mm)
MPa	: Mega paskal
N	: Newton
P	: Basma yükü (N)
r	: Kirişin derinliği (mm)
S	: Gerilme (N/mm^2)
σ_f	: Fiber çekme yönünde kırılma mukavemeti (N/mm^2)
σ_{fmax}	: Maksimum gerilme (N/mm^2)
σ_m	: Matris çekme yönünde kırılma mukavemeti (N/mm^2)
t	: Tabaka kalınlığı (mm)
t_f	: Yüzey levha kalınlığı (mm)
V	: Çarpışma hızı (m/s)

KISALTMALAR LİSTESİ

AEM/S	: Gelişmiş kapalı radar direği
AFRP	: Aramid (Kevlar) fiber takviyeli polimer kompozitler
BVID	: Açıkça görünür darbe hasarı
CCA	: Hücresel selüloz asetat
CFC	: Klorofloro karbon gazı
CFRP	: Karbon fiber takviyeli polimer kompozit
CMC	: Seramik matrisli kompozitler
CSIP	: Kompozit yapısal yalıtımlı panel
CTP	: Cam elyaf takviyeli polimer/plastik/polyester
DHD	: Düşük hızda darbe
DIC	: Dijital görüntü korelasyonu
DSB	: Darbe sonrası basma
EF	: Elastomerik köpük
EP	: Epoksi
EPP	: Genleştirilmiş polipropilen
EPS	: Genleştirilmiş polistren
FTP	: Fiber takviyeli polimer/plastik/polyester
GFRP	: Cam takviyeli polimer kompozit
HLU	: Elle yatırma yöntemi
LCC	: Yaşam döngüsü maliyeti
MDF	: Orta yoğunluklu fiber levha
MMC	: Metal matrisli kompozitler
MR	: Neme dayanıklı kontrplak
PA	: Poliamid
PE	: Polietilen
PEEK	: Polietereterketon
PEI	: Polieterimid
PET	: Polietilen tereftalat
PMC	: Polimer matrisli kompozitler
PMI	: Polimetakrilimid
PP	: Polipropilen
PS	: Polistiren
PU/PUR	: Poliüretan
PVC	: Polivinil klorür
RFIM	: Reçine film infüzyon kalıplama
RIF	: Reçine film infüzyon
RIFT	: Esnek kalıp altında reçine injeksiyon yöntemi
RTM	: Reçine transfer kalıplama
SAN	: Stiren akrilonitril
SCRIMP	: Seemann kompozit reçine infüzyon yöntemi
SIP	: Yapısal yalıtımlı panel
UHMWPE	: Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen
UV	: Ultraviyole
VAIM	: Vakum destekli injeksiyon kalıplama
VARI	: Vakum destekli reçine injeksiyon
VARIM	: Vakum destekli reçine injeksiyon kalıplama
VARTM	: Vakum destekli reçine transfer kalıplama

VB	: Vakum torbalama
VID	: Görünür darbe hasarı
VIM	: Vakum infüzyon kalıplama
VIMP	: Vakum infüzyon kalıplama prosesi
VOC	: Organik uçucu bileşenler
XPS	: Ekstüzyonla üretilen polistiren
ÇAD	: Çam ara tabakalı, Düz köpük çekirdekli, E-cam dış tabakalı sandviç
ÇSY	: Çok katmanlı sandviç yapı
D12	: 12 mm düşük yoğunluklu PVC Köpük
DA	: Dışbudak ağacı
DAD	: Dışbudak ara tabakalı, Düz köpük çekirdek, E-cam dış tabakalı sandviç
DAK	: Dışbudak ara tabakalı, Kanallı köpük çekirdek, E-cam dış tabakalı sandviç
DDK2	: DA+ K2+ D12+E-CAM +D12+ K2+DA sandviç
DYK2	: DA+ K2+ D12+E-CAM +Y12+ K2+DA sandviç
E-CAM	: 1 mm iç E-cam+vinil ester tabaka
İKSK	: İki köpük çekirdeğe sahip mantar kauçuk ara tabakalı sandviç
K2	: 2 mm Kauçuk-Mantar
K5	: 5 mm Kauçuk-Mantar
KO	: Konik impaktör
KSY	: Klasik sandviç yapı
TKS	: Tek köpüklü sandviç
TKSK	: Tek köpük çekirdeğe sahip mantar kauçuk ara tabakalı sandviç
Y12	: 12 mm yüksek yoğunluklu PVC Köpük
Y15	: DA+15 mm yüksek yoğunluklu PVC+DA sandviç
Y15K2	: DA+ K2+Y15+K2+ DA sandviç
Y15K5	: DA+ K5+Y15+K5+ DA sandviç
Y25	: DA+25 mm yüksek yoğunluklu PVC+DA sandviç
Y25K2	: DA+ K2+Y25+K2+ DA sandviç
YDK2	: DA+ K2+ Y12+E-CAM +D12+ K2+DA sandviç
YK	: Yarı küresel impaktör
YYK2	: DA+ K2+ Y12+E-CAM +Y12+ K2+DA sandviç

ÖNSÖZ

Tezimin beklenen yararı sağlaması dileğiyle, bu süreçte bana yol gösteren, zamanını ve bilgisini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. İrfan AY'a, çok değerli hocalarım Prof. Dr. Enver ATİK'e, Prof. Dr. Nurettin ARSLAN'a, Dr. Öğr. Üyesi İlker EREN'e, Dr. Öğr. Üyesi Akın ATAŞ'a ve tezde emeği geçen adını sayamadığım tüm arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Uzun laboratuvar çalışmalarında, makale yazımlarında ve tez çalışmamda benden yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Fatih BALIKOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Dokuz Eylül Üniversitesi'nde, düşme testlerinin yapılması esnasında yardımlarından dolayı Halis KANDAŞ ve Doç. Dr. Okan ÖZDEMİR'e, ahşap malzemeleri sağlayan Novawood firmasına teşekkür ederim.

Tez sürem boyunca beni sabırla bekleyen, en büyük destekçim olan bugünlere gelmemde büyük katkısı olan eşim Emine Hümeýra DEMİRCİOĞLU'na, aileme, tez çalışma aralarında beni neşelendiren kızıma sevgilerimi sunarım.

Balıkesir, 2020

Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU

1. GİRİŞ

Türkiye’de kompozitler, polyester su depoları ve “Anadol” marka otomobilin kaportası ile başlamıştır. Uzun yıllar boyunca, el yatırması ile açık kalıplama yöntemi kullanılarak yapılan kompozitlerden makinelerin kullanıldığı üretime geçiş epey bir zaman almıştır. Dünyada artık bir gelişmişlik ölçütü olarak kişi başına kompozit tüketimi kabul edilmektedir. Kişi başı düşen kompozit tüketim miktarlarına bakıldığında ülkemizin önünde önemli fırsatların ve olanakların olduğu ortaya çıkmaktadır. Dünya’da 4-10 kg (6,9€/kg) arasında bir dağılım izleyen bu miktar, ülkemizde 3,5 kg (5,3€/kg) düzeyindedir (Composites Turkey, 2018). Ülkemizin gelişmiş ülkelerin kompozit kullanım miktarını yakın bir gelecekte yakalaması mümkün olacaktır.

Kompozit malzemeler, çok hızlı bir gelişme göstermiş ve bunu sürdürmeye devam eden bir malzeme niteliğine sahip olup, çağdaş bir malzeme olmayı aşarak ve geleceğin malzemesi olmuştur. Teoride sonsuz ömürlü ve neredeyse sonsuz kullanım alanı olan kompozit malzemelerin bu özellikler sayesinde çok büyük bir potansiyele de sahip olduğu görülmektedir (Moment Expo, 2016).

1.1 Kompozit Malzemenin Tarihçesi

Bakalit, ilk fiber takviyeli plastik olmuştur. Leo Baekeland başlangıçta şellak (gomalak böceklerinin salgılarından yapılmış) yerine geçen malzeme için yola çıkmıştır. Kimyacılar birçok doğal reçine ve elyafın polimer olduğunu anlamaya başlamış ve Baekeland fenol ve formaldehitin reaksiyonlarını araştırmıştır. Fenol ve formaldehit üzerine uygulanan basıncı ve sıcaklığı kontrol ederek 1905 yılında hayalini kurduğu sert kalıplanabilir malzemeyi bakaliti (dünyanın ilk sentetik plastiği) üretmiştir (Amato, 1999; Trueman, 17 March 2015).

1930'larda yoğun bir şekilde ticari kullanım için fiber takviyeli plastik gelişimi araştırılmıştır. İngiltere’de, Norman de Bruyne 1936’da, de Havilland Aircraft ile pervane üretiminde kullanılmak üzere güçlendirilmiş fenol-formaldehit reçineleri araştırması için bir danışmanlık almıştır. De Bruyne, ahşabı ahşaba, ahşaba metale ve metali metale yapıştırırmada çok daha etkili olan yeni bir sentetik yapıştırıcı türü icat etmiştir (De Bruyne, 1965).

1931'de Owens-Illinois'de danışmanlık yapan mühendis Games Slayter, evlere üflemlerli mineral yün yalıtım yöntemini icat etmiştir. 1932'de Slayter için çalışan genç bir araştırmacı olan Dale Kleist, cam blokları birbirine kaynaklayarak vakumlu bir conta oluşturmaya çalışırken, sıkıştırılmış hava jeti erimiş cam akışına çarptığında ummadığı ince cam elyaflar üretmiştir. Kleist, cam elyafı yoğunlaştırmak için basınçlı hava yerine, buhar kullanarak ticari yalıtım olarak kullanılabilir kadar ince bir malzemeyle sonuçlanan bu kazara keşfedilmiş işlemi geliştirmiş, böylelikle cam fiberlerin seri üretimi başlamıştır.

Bu cam yünü üretme yöntemi için patent ilk kez 1933 yılında uygulanmıştır (Games, 1938). Owens firması, 1935'te Corning şirketine katılmış ve yöntem, 1936'da patentli "Fiberglas" (sadece tek "s") üretmek için Owens Corning tarafından uyarlanmıştır. "Fiberglas" aslında, çok miktarda gazı hapseden, özellikle yüksek sıcaklıklarda yalıtkan olan elyaflı bir cam yünüdür. Kompozit bir malzeme üretmek için plastik ile "fiberglas" birleştirilmesi için uygun reçine, 1936'da Du Pont firması tarafından geliştirilmiştir. 1942 de American Cyanamid firmasının reçinesi şimdiki polyester reçinelerin ilk atası olmuştur (Kropa & Bradley, 1942). O zamana kadar peroksit kütleme sistemleri kullanılmıştır (Marsh, 2006). "Fiberglas" ve reçine kombinasyonu ile malzemenin gaz içeriği plastik ile değiştirilmiştir. Bu, plastiğin yalıtım özelliklerini özgün değerlerine düşürmüştür, kompozit yapı büyük mukavemet gösterdiğinden ilk defa yapısal ve inşaat malzemesi olarak umut vermiştir. Şaşırtıcı bir şekilde, birçok cam elyaf kompozite "fiberglass" (genel bir isim olarak) denilmeye devam edilmiş ve bu isim plastik yerine gaz içeren düşük yoğunluklu cam yünü ürünü için de kullanılmıştır.

Amerikan mucit Carleton (1940), doymamış polyester reçineyi bulmasının ardından ilk nesil kompozit malzemeler: cam elyaf takviyeli polimerler (CTP) üretilebilmiştir. Cam fiber kompozitler üzerinde Owens Corning ile çalışan Ray Greene, 1942'de yeni güçlendirilmiş American Cyanamid polyester reçinesi ile fiberglas kompozit daysailer (küçük yelkenli) üretmiştir (Murphy, 1998).

Henry Ford, ilk olarak kompozit plastik benzeri bileşenler üretmek için sıkıştırılmış soya fasulyesi kullanarak, 1940'larda otomobiller için kompozitler plastik parça üretim denemelerine başlamıştır. Çelik borudan yapılmış şase üzerinde 14 plastik panel, hafiflemiş ağırlığı 900 kg olan (geleneksel çelik arabalardan 450 kg daha az), "Soybean"

parçalandığı için müze koleksiyonlarına girememiştir (Powers, 2000). Michigan, Detroit'teki Stout Motorcar Şirketi, 1946'da tamamen cam fiberden oluşan bir gövdeye sahip olan Proje Y olarak da bilinen “Stout Scarab Experimental” adlı prototip minibüs seri üretime geçememiştir. Cam fiber gövdeye sahip prototipi 1952 de yapılmış Kaiser Darrin spor araba Ocak 1954'e kadar üretim gecikmelerinden dolayı galerilere ulaşmamış ve bu da Chevrolet Corvette'i ilk seri üretilen cam elyaf gövdeli arabası haline getirmiştir (Sanderson, 2017).

Kontrplak kullanılan ve sentetik bir reçinenin bir kombinasyonu olan ilk elyaf takviyeli plastik uçak, 12 Mayıs 1937'de uçan Fairchild F-46 olmuştur. Bu kalıplama yöntemi, “Plymold” Haskelite Manufacturing Corporation ve “Duramold” Fairchild Engine and Aircraft Corporation tarafından geliştirilmiştir. Karmaşık yapıları, alüminyum konstrüksiyon ile yapılabileceğinden daha kısa sürede yapmak için ısı ve basınç altında ahşap ve plastik kalıplama yöntemi (Duramold) kullanılmıştır. Bu yöntem uçak gövdelerinde perçin kullanımındaki işçilik maliyetini ortadan kaldırmak için tasarlanmıştır. (Frank Woodring, 2007). Haskelite şirketi bu kontrplağı demiryolu vagonları, otobüsler, otomobiller ve tekneler, Fairchild ise kendi teknolojisini uçak yapmak için kullanmıştır. Bennett Aircraft şirketi, fenol-formaldehit bakalit bağlı bir kontrplak olan Duraloid'in kullanıldığı uçakları üretmiştir (Hightower & Brenner, 1984). 1942'nin sonlarında Wright Field'da bulunan XBT-16 model uçağın (Vultee BT-13A'nın modifiye edilmiş hali) üzerinde fiberglas bir gövde kullanılmıştır (Donald, 1995). 1943'te, kompozit malzemelerden yapısal uçak parçaları inşa etmek için başka deneyler yapılmış, ilk 1944'te uçan ve XBT-19 olarak adlandırılan, CTP gövdeli Vultee BT-15 uçağı ile sonuçlanmıştır (Conrardy, 1971; Murphy, 1998; Rheinfrank & Norman, 1944; Varriale, 1968). 1943'te CTP bileşenleri için kalıp oluşturmada önemli bir gelişme Republic Aviation Corporation tarafından yapılmıştır (Palucka & Bensaude-Vincent, 2002). II. Dünya Savaşı (1939-1945) kompozit endüstrisini laboratuvarından gerçek üretime getirmiştir (Bhatt, Gohil, & Chaudhary, 2018).

CTP teknolojisi 1950'lerde hızla yayılmıştır. Fransa'da 1950 yılında cam elyaf üretimi için Chambéry'de yeni Saint-Gobain fabrikası açılmış, 1958'de Alouette II için kompozit helikopter pervanesi üretmişlerdir. Corvette spor otomobilinin şık gövdesini üretmek için fiberglas-polyester kompozitler, baskılı devre kartlarından Winchester av tüfeği namlusuna

(Hartley, Day, & Wilson, 1958) kadar değişen uygulamalarda fiberglass-epoksi kompozitler kullanılmıştır.

Uzay yarışı, son zamanlarda keşfedilen karbon ve bor liflerinin gelişmesi için bir itici güç sağlamıştır. Karbon fiber üretimi 1950'lerin sonlarında başlamış ve 1960'ların başında başlayan İngiliz endüstrisinde yaygın olmasa da kullanılmıştır. Laboratuvardaki gelişmeler, yeni güçlü takviye liflerinin kullanımını hızlandırmış, başlangıç bileşiği olarak suni ipek (rayon) kullanılarak grafit (karbon) lifler üretilmiş ve Texaco, geliştirdikleri bor liflerinin yüksek rijitliğini ve mukavemetini açıklamıştır. Karbon ve bor lifleri aynı zamanda gelişirken, 1960'lı yıllarda üstün işleme kabiliyetleri ve düşük maliyeti nedeniyle karbon öncülük etmiştir. Japonya'da A. Shindo, daha önce kullanılan suni ipek ve ziftin yerini alan 1961'de ilk olarak poliakrionitril kullanarak yüksek mukavemetli grafit lifleri geliştirmiştir (Shindo, 2000). Karbonun alüminyum ve magnezyum ile reaktivitesi nedeniyle, metal matrisler için takviye olarak grafit kullanımı o zaman için mümkün olmadığından grafit fiberler sadece polimer matrislerinde kullanılmıştır. Grafit alüminyum ve grafit-magnezyum kompozitleri gerçeğe dönüştürmek için karbon ve metal arasındaki reaksiyonu önleyen karbon fiberler için havaya dayanıklı kaplamalar icat edilmiştir (Katzman, 1987). Mukavemeti karbonu açan bor lifleri, yüksek maliyetlerinin endişe duyulmadığı askeri uygulamalarda uygun bir yer bulmuş, ancak diğer pazarlara girmemiştir. 1969'da General Dynamics tarafından yapılan bir F-4 jetine bor-epoksi dümenler yerleştirilmiştir (Hadcock, 1998). Bor ayrıca yaklaşık 600 ° C'nin üzerindeki metal matrisle reaksiyona girdiğinden, bor takviyeli metal matrisli kompozitlerde kaplamaların tekrar tasarlanması gerekmiştir.

1971'de DuPont, Stephanie Kwolek tarafından 1964'te geliştirilen aramid bileşiğine dayanan bir elyaf olan Kevlar'a dünyayı tanıtmıştır. Aramidler naylon polimer ailesine aittir. Temel yapısal özellikleri amid grupları ile bağlanmış aromatik halkalardır (temel olarak benzen halkaları). Kwolek, daha güçlü, daha rijit fiberler geliştirmek için petrol bazlı yoğuşma polimerleri üzerinde çalışmıştır. Enerji sıkıntısının yaklaşma olasılığı Dupont'u, radyal lastikler için hafif, polimer esaslı fiberlerin daha sonra kullanımda olan elik kuşakların yerini alabileceği ve otomobilin toplam ağırlığını azaltacağı ve yakıt tasarrufu sağlayabileceğine ikna etmişti. Kwolek 1964'te erimeyen bir polimer yapmış, bu yüzden malzemeyi çözmek için bir çözücü arayışına girmiştir. Birçok denemeden sonra polimeri çözdüğünde, ortaya çıkan çözelti, uğraşmaya alıştığı kalın pekmez benzeri özellilerden farklı olarak bulutlu su gibi görünmüştür. Yine de, ne tür lifler alacağını

görmek için onu eğirmek istemiştir. Eğirme işleminden sorumlu meslektaşı ilk başta, karışımın dönmeyecek kadar ince olduğunu ve çözültideki parçacıkların makinesini tıkayacağını iddia ederek reddetmiştir. Ancak Kwolek ısrar etmiş ve sonunda aramid çözültisinden üretilen lifler çelikten beş kat daha güçlü olmuştur (Kwolek, 1974). Kolluk kuvvetleri için kurşungeçirmez yelek ve kask gibi uygulamalarda kullanılmıştır. Aromatik halkalar arasındaki amid gruplarının pozisyonlarında hafif bir varyasyon, itfaiyeciler için koruyucu donanım üretmek için Kevlar ile harmanlanmış ateşe dayanıklı bir elyaf olan Nomex'in çıkmasına sebep olmuştur.

Uzay ve uçak talepleri 1960'larda yeni yüksek modüllü elyaf arayışına yol açarken, pahalı elyaflarla yapılan kompozitler, uzay ve askeri taleplerin azaldığı 1970'lerde sivil uygulamalar bulmak zorunda kalmıştır. Spor ve otomobil endüstrileri daha önemli pazarlar haline gelmiştir (Palucka & Bensaude-Vincent, 2002). Yüksek performansa sahip karbon, boron ve aramid fiberlerin üretim teknikleri ve mekanik özellikleri üzerine yoğunlaşan araştırma ve geliştirme faaliyetleri kompozit malzemelerin kullanım alanlarını hızla genişlemiştir (Adams & Eby, 1987).

1.2 Kompozit Malzeme Tanımı ve Sınıflandırılması

İki veya daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki bileşenlerin en iyi özelliklerinin (dayanım, hafiflik, esneklik, maliyet, vb.) tek bir yapı altında toplandığı makro seviyede ve birbiri içinde çözünemeyen malzemelerin bir araya getirilmesine kompozit malzeme denir (Barbero, 2017; Kaw, 2005; Mazumdar, 2001).

Kompozitler heterojen yapılarından dolayı malzemenin her tarafında aynı özellik görülmez. Ayrıca anizotropik davranışa sahip olduklarından fiziksel özellikleri kompozit içindeki bileşenlerin farklı yönelmesine göre değişir. Takviye fazı ve matris fazlarından oluşmaktadır (Şekil 1.1).

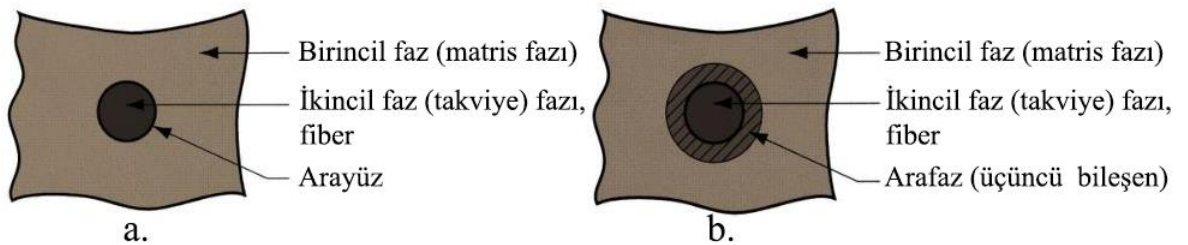
Matris fazı: (ilk faz) sürekli ve esnektir, takviye elemanlarını aşınma, darbe, korozyon, çeşitli kimyasal ve fiziksel etkilere karşı korur, yapıya rijitlik, şekil vererek bir arada tutar, takviye elemanına yük ve kuvvet aktarımında köprü görevi görür. Matris takviye elemanlarını birbirlerinden izole ederek bir yönü ile bağımsız davranmalarını ve böylece çatlak ilerlemesi gibi hasarların yavaşlamasını ve durmasını sağlar. Seçilen matris

malzemesinin özelliklerine bağlı olarak kompozit malzemenin süneklik, darbe direnci, basınç dayanımı gibi özellikleri değiştirilebilir.

Takviye fazı: (ikinci faz); genellikle matrise göre daha rijit ve dayanıklıdır. Takviye elemanının temel amacı matris yapıya destek, gelen yükün %70-90 oranında taşımak ve malzeme hacmini arttırmaktır. Matris içinde sürekli veya rastgele düzenlemelerde bulunabilen takviyenin yapı içerisindeki formu, cinsi, oranı, parça içindeki dağılımı ve yönü kompozitin mukavemetini önemli ölçüde etkilemektedir. Kompozit malzemeler kullanılan takviye elemanların şekilleriyle anılırlar.

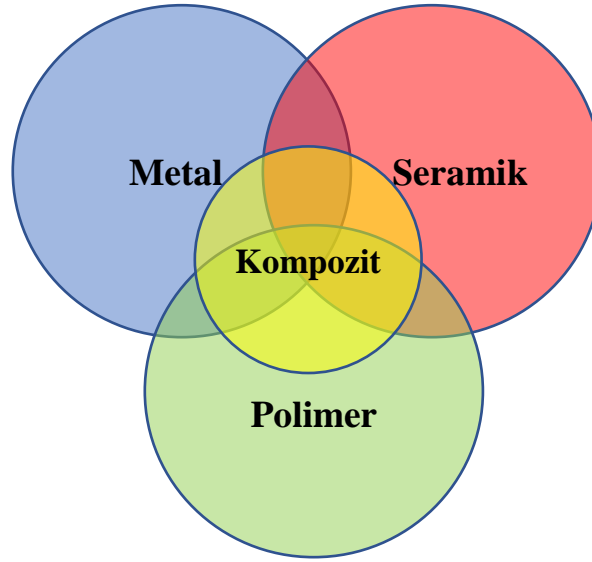
Arayüz: Kompozit malzemedeki birincil ve ikincil fazlar arasındaki sınırdır (Şekil1.1a). Takviye ve matris fazlarının arayüzlerinde fiziksel, kimyasal ve mekanik etkileşimler vardır. Bu yüzden arayüz kimyasallara ve çevre etkisine dirençli olmalıdır. Kompozitin etkin biçimde çalışması için, fazların birleştiği arayüzde iyi bağlanması gerekir. Lifler, matrise uygulanan gerilmeyi arayüz boyunca aktarır ve güçlendirir. Arayüzdeki yapışma, gerilmenin ne kadar etkili transfer edileceğini belirler.

Arafaz: (üçüncü bileşen); birincil ve ikincil fazlar arasına eklenen yapıştırıcı bir tabakaya benzer (Şekil1.1b). Matris ve fiber arasında yük transferini sağlarken, yükün verimli şekilde iletebilmesi için ara faz adezyonunun kuvvetli olması şarttır. Yük altında ara faz bölgesi matristen daha az dayanım gösterirse fiber ve matris ara yüz ayrılması ve delaminasyon hasarları oluşur. (Karger-Kocsis, Mahmood, & Pegoretti, 2015). Genellikle kırılma özelliği göstermesine rağmen oluşan herhangi bir kuvveti çözülmeye ve kırılmaya uğramadan takviye fazına iletmektedir. Malzemenin elastikiyet modülünü etkileyen en önemli bölgedir. Ara faz, çekme, uzama, kesme, eğilme, darbe, yorulma, kırılma tokluğu ve hasar mekanizmaları gibi kompozitlerin mekanik özellikleri açısından önemlidir.



Şekil 1.1: Kompozit bir malzemedeki fazlar arasındaki arayüzler
a) birincil ve ikincil fazlar arasında doğrudan bağlanma,
b) birincil fazları bağlamak için üçüncü bir bileşen eklenerek arafaz oluşturulması.

Kompozit malzemeler; takviye geometrisinde; fiber, parçacık, pul, matris malzemesinde; polimer, metal, seramik ve karbon olarak sınıflandırılmaktadır. Kompozitler içinde en geniş kullanım alanı olan malzeme ise fiber takviyeli polimer (FRP) dir (Clyne & Hull, 2019; Mazumdar, 2001; Strong, 2008).



Şekil 1.2: Mühendislik malzemelerinin sınıflandırılması.

Mühendislik malzemeleri, ana özelliklerine (örneğin, sertlik, mukavemet, yoğunluk ve erime sıcaklığı) bağlı olarak geniş bir şekilde dört ana kategoriye ayrılabilir: (1) metaller, (2) polimerler, (3) seramikler ve (4) kompozitler (Mazumdar, 2001) (Şekil 1.2).

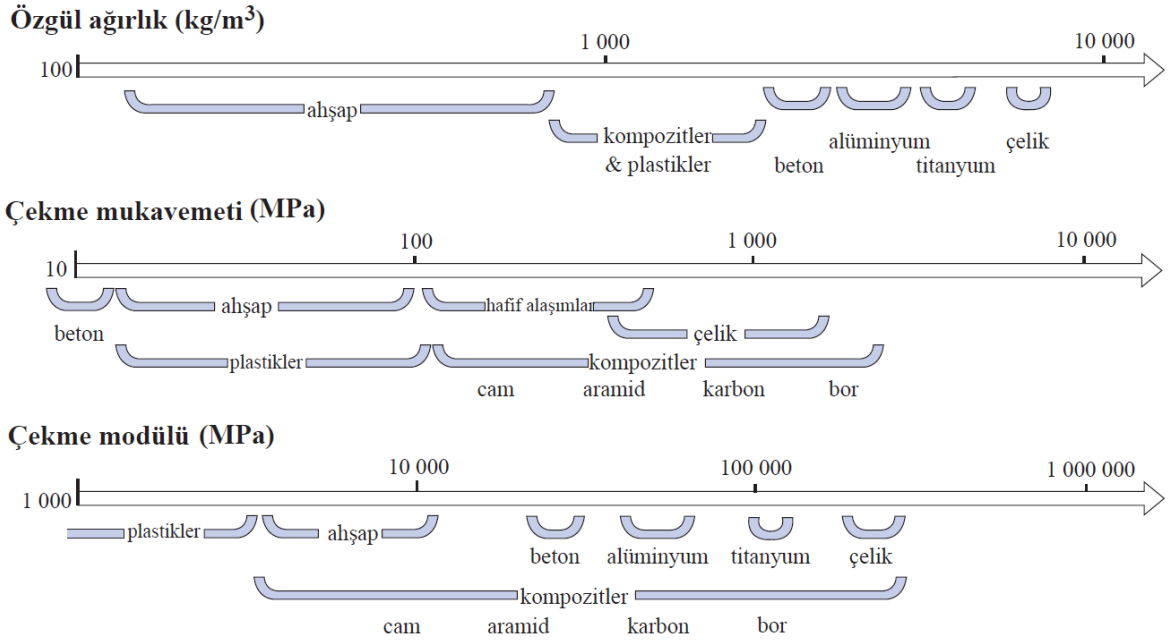
Kompozit malzemeler matris malzemesine göre üçe ayrılır;

- Polimer matrisli kompozitler (PMC)
- Metal matrisli kompozitler (MMC)
- Seramik matrisli kompozitler (CMC)

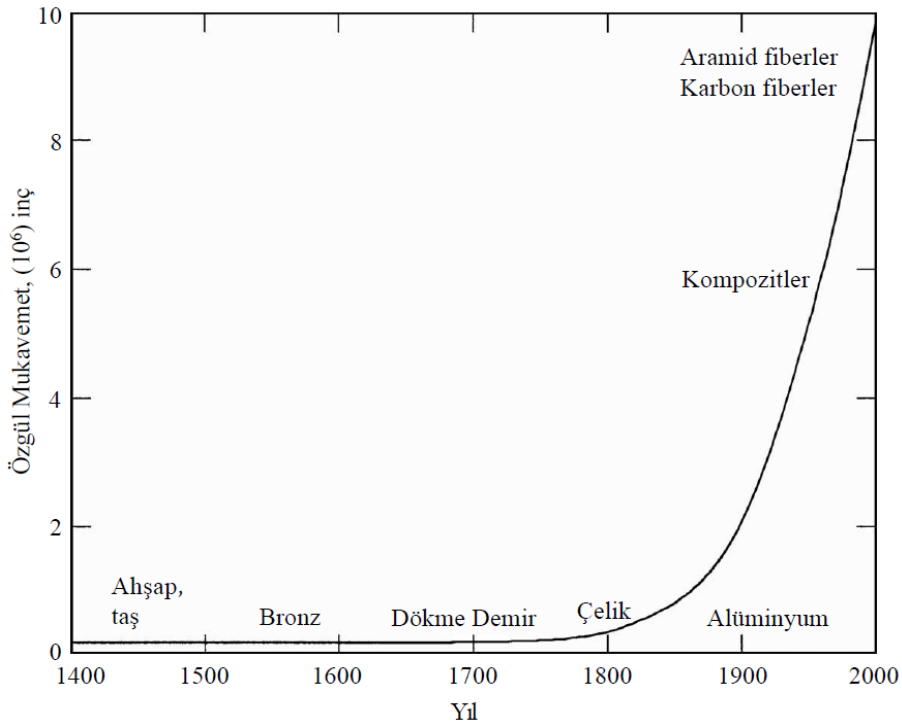
1.3 Kompozit Malzemelerin Karşılaştırılması

Göze çarpan bir başka gelişme de malzeme bilimi ve mühendislik girdilerinin, bir ürünün tasarımından işletmeye alınmasına, ömrü boyunca kontrol ve hasar analizine kadar her düzeyde üretim ve tasarım girdileriyle entegrasyonu olmuştur. Bununla birlikte toplumun enerji bilincine sahip olması gerekmektedir. Bu, hayatın her alanında hafif ancak güçlü ve rijit yapılara olan talebin artmasına neden olmuştur. Bu duruma kompozit malzemeler giderek daha fazla cevap vermektedir (Chawla, 2012).

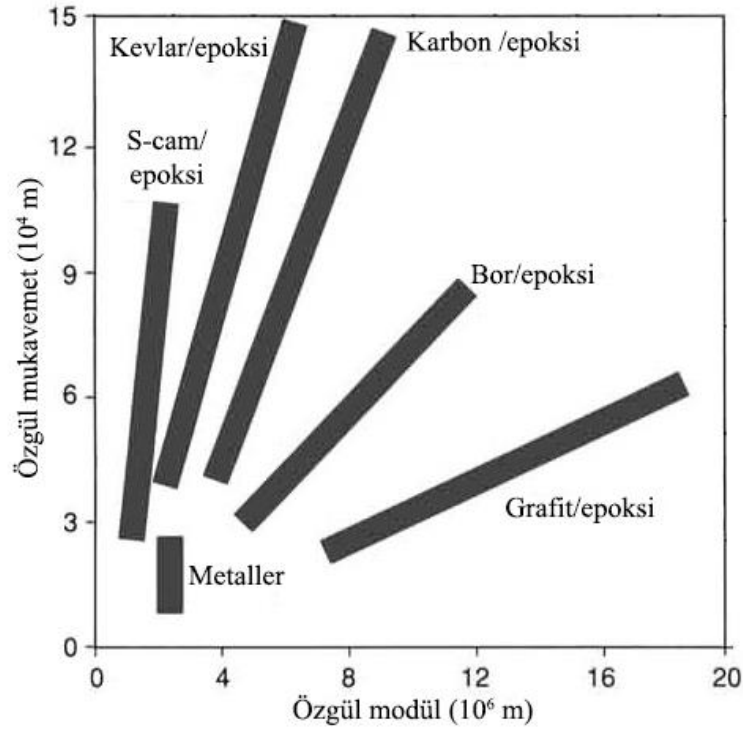
Şekil 1.3'te kompozitlerin özgül ağırlık bakımından beton, alüminyum, titanyum ve çelikten çok daha hafif oldukları, çekme mukavemetlerinin ve modülünün çelik malzemelerle neredeyse başa baş olduğu görülmektedir.



Şekil 1.3: Kompozitlerin mühendislik malzemeleriyle karşılaştırılması (Tech, 2013).



Şekil 1.4: Malzemelerin özgül mukavemetinin yıllara göre değişimi (Kaw, 2005)



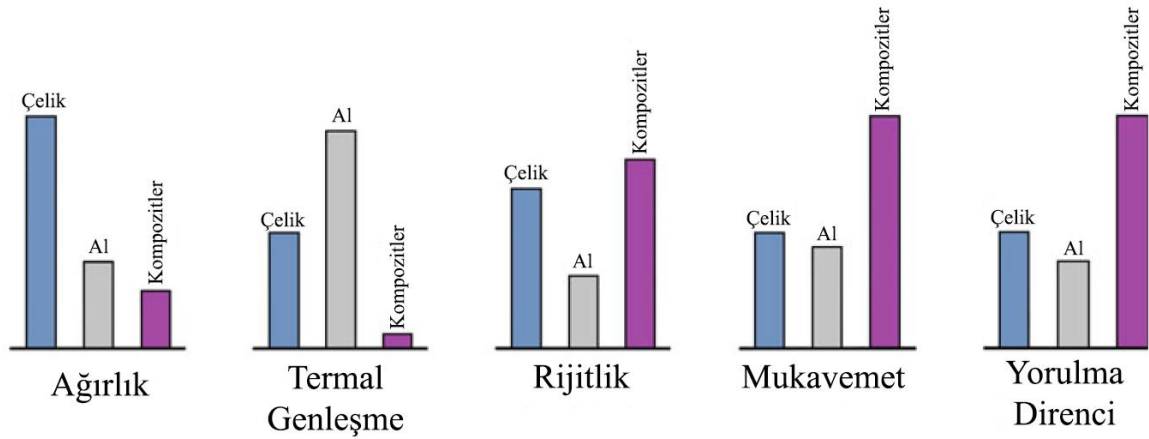
Şekil 1.5: Özgül elastik modülüne karşı özgül mukavemet grafiği (Daniels & Ishai, 2006).

Örneğin, bir grafit/epoksi tek yönlü kompozitin mukavemeti çelikte aynı olabilir, ancak özgül mukavemeti çeliğin üç katıdır. Sabit bir aksenal yük taşımak üzere tasarlanmış basit bir çubuk için düşünersek, grafit/epoksinin çubuk kesiti çelikte aynı, ancak grafit/epoksi çubuğun kütlesi çelik çubuğun üçte biri olacaktır. Kütle azalması, malzeme ve enerji maliyetlerinin azalması anlamına gelir. Kompozitlerin ve fiberlerin özgül mukavemet açısından diğer geleneksel malzemelerle karşılaştırılması gösterilmektedir (Kaw, 2005) (Şekil 1.4). Kompozit malzemelerin günümüzde rüzgâr enerjisi, havacılık, uzay, havacılık, savunma, denizcilik ve otomotiv endüstrisi, biyomedikal alanlar gibi teknolojik gelişimin hızlı ve rekabetin önemli olduğu sektörlerde konvansiyonel malzemelerin yerine geçtiği uygulamalara gün geçtikçe daha fazla rastlanmaktadır.

Kompozit malzemelerin performans kalitesi, özgül mukavemet (kopma dayanımı/yoğunluk) ve özgül modül (elastisite modülü/yoğunluk) temelinde sıralanabilir. Bu özellikler açısından tipik yapısal kompozitlerin performansının karşılaştırmalı bir temsili Şekil 1.5'te gösterilmektedir. Kompozitler için gösterilen aralık, yarı izotropik ve tek yönlü laminatlar arasındaki değişime karşılık gelir. Şekilde görülebileceği gibi, çoğu kompozit, metallere göre daha yüksek özgül modül ve mukavemete sahiptir. Çeşitli

kompozitler arasında, tek yönlü karbon/epoksi, yüksek özgül modül ve mukavemetin en iyi kombinasyonunu sağlamaktadır (Daniels & Ishai, 2006).

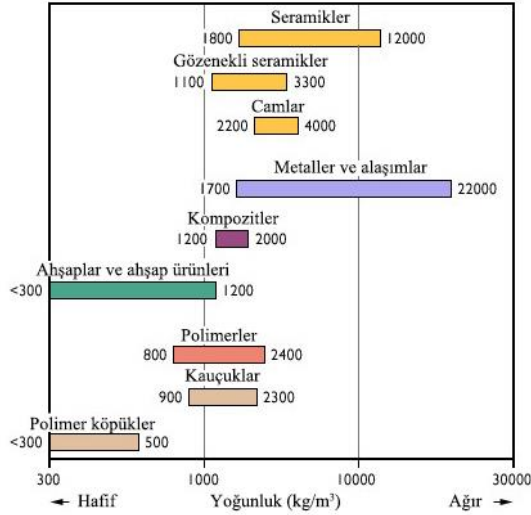
İlk bakışta, grafit, aramid ve cam gibi fiberler, çelik ve alüminyum gibi metallerin birkaç katı özgül modüle sahiptir. Bu, kompozitlerin mekanik avantajları hakkında yanlış bir izlenim verir, çünkü yapıları sadece fiberlerden değil, fiber ve matris bileşiminden oluşur; matrisler genellikle fiberlerden daha düşük bir modüle ve mukavemete sahiptir. Tek yönlü kompozit yapılar sadece tek eksenli çekme veya saf eğilme gibi basit yükleri taşımak için uygundur. Fiberlere dik yöndeki mukavemet ve elastik modül çok daha düşüktür (Kaw, 2005).



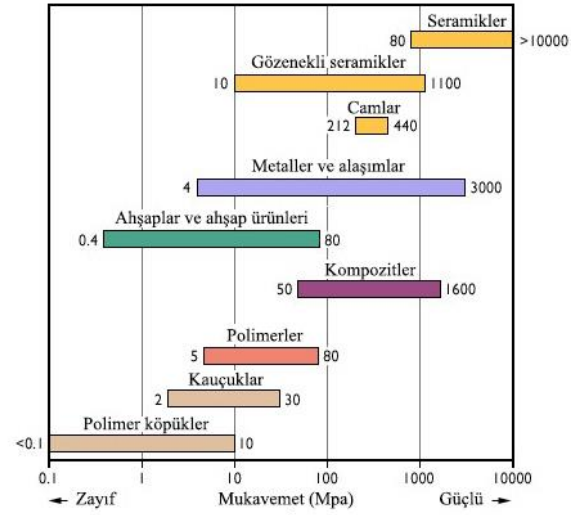
Şekil 1.6: Geleneksel tek parça olarak davranan (monolitik) malzemeler ile kompozit malzemeler arasında karşılaştırma (Chawla, 2012).

Şekil 1.6, alüminyum ve çelik gibi geleneksel monolitik malzemeler ile kompozit malzemeler arasında bir karşılaştırma yapmaktadır. Bu şekil, kompozit malzemeler kullanılarak geleneksel malzemeler üzerinde elde edilebilecek iyileştirme olasılıklarını göstermektedir. Kompozitlerin çelik ve alüminyuma göre düşük ağırlığı, düşük termal genleşmesi, yüksek rijitliği, yüksek mukavemeti ve yüksek yorulma direnci görülmektedir. Bu grafikler tüm kompozitleri bir grupta, tüm çelik ve alüminyum türlerini diğer iki grupta birleştirir, ancak veriler genel eğilimleri doğru bir şekilde yansıtmaktadır (Strong, 2008).

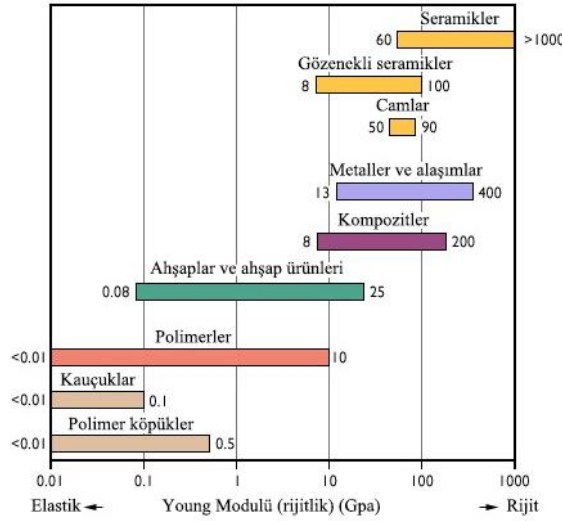
Kompozitler, seramikler, metaller, polimerler, ahşaplar ve kauçukların mühendislik özellikleri Şekil 1.7'de karşılaştırılmıştır.



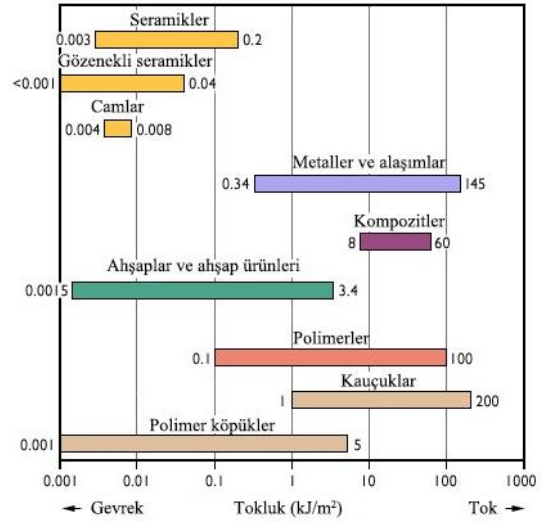
a.



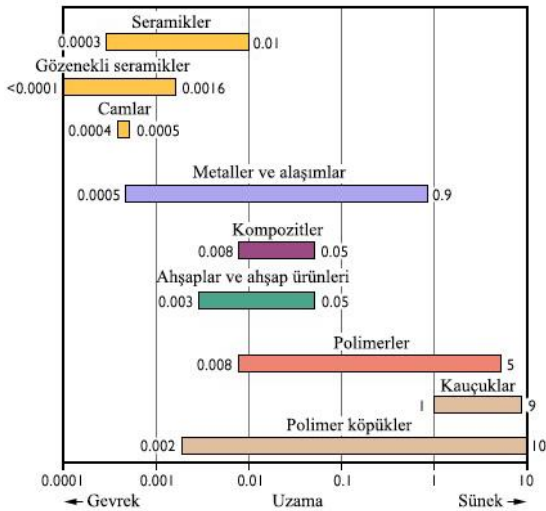
b.



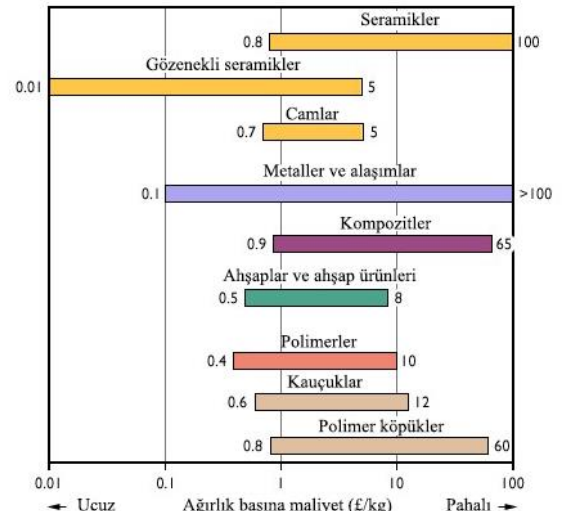
c.



d.



e.



f.

Şekil 1.7: Mühendislik malzemelerinin karşılaştırılması a)yoğunluk, b)mukavemet, c)rijitlik, d) tokluk, e)uzama, f) maliyet (Material properties, 2019).

Kompozitler, metaller, seramikler ve polimerler kategorilerinden gelen iki (veya daha fazla) ayrı malzemeden oluşur. Bir kompozitin tasarım amacı, herhangi bir malzeme tarafından gösterilmeyen özelliklerin bir kombinasyonunu elde etmek ve ayrıca bileşen malzemelerin her birinin en iyi özelliklerini dâhil etmektir. Farklı metal, seramik ve polimer kombinasyonları ile temsil edilen çok sayıda kompozit türü mevcuttur. Ayrıca, doğal olarak oluşan bazı malzemelerin (ahşap ve kemik vb.) kompozit olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, ele aldığımız kompozitlerin çoğu sentetiktir. En yaygın ve tanıdık kompozitlerden biri, küçük cam elyaflarının polimerik bir malzemeye (epoksi, polyester vb.) gömüldüğü fiberglastır. Düşük bir yoğunluğa (Şekil 1.7a) sahip cam elyaflar nispeten güçlü ve rijittir (ayrıca gevrekler), oysa polimer sünektir (Şekil 1.7c ve 1.7e) (ayrıca zayıf ve elastiktir). Böylece, elde edilen fiberglas nispeten rijit, güçlü, (Şekil 1.7b ve 1.7c) esnek ve sünektir (Callister & Rethwisch, 2007).

Metallerin çoğu yüksek yoğunluklara sahiptir, çünkü atomlar ağır ve dizilimleri yakındır. Polimerler çok daha az yoğunlardır çünkü yapıldıkları atomlar (C, H, O) hafiftir ve genellikle dizilimleri yakın olmayan yapıları benimserler. Atomların yakın dizildiği seramikler bile ortalama olarak metallerden biraz daha az yoğun, çünkü çoğunda O, N ve C gibi hafif atomlar bulunur. Kompozitlerin yoğunlukları, sadece yapıldıkları malzemelerin ortalamasıdır (Şekil 1.7a).

Çoğu seramik muazzam akma mukavemetine sahiptir. Saf metaller gerçekten çok yumuşaktır ve sünekliği yüksektir. Alaşımlama ile metallerin mukavemeti daha da artırılabilir, ancak en güçlü metallerin akma mukavemeti bile hala çoğu seramikten daha azdır. Polimerler genel olarak metallerden daha düşük akma dayanımına sahiptir. En güçlüleri bile (sadece küçük miktarlarda üretilmektedir ve pahalıdır), alüminyum alaşımlarının gücüne zar zor ulaşmaktadır. Bununla birlikte, bunlardan kompozitler yaparak güçlendirilebilirler: GFRP, alüminyumdan biraz daha düşük bir güce sahiptir ve CFRP önemli ölçüde daha güçlüdür (Şekil 1.7b).

Young malzeme modülleri karşılaştırıldığında elmas en üstte, yumuşak kauçuklar ve polimerler köpükler en alttadır. Seramik ve metallerden kurşun gibi en yumuşakları bile bu aralığın en üstünde yer alır. Polimerler ve elastomerler, polietilen, PVC ve polipropilen daha düşüktür. Kompozitler, polimerler ve seramikler arasındaki aralığı kapsar (Şekil 1.7c).

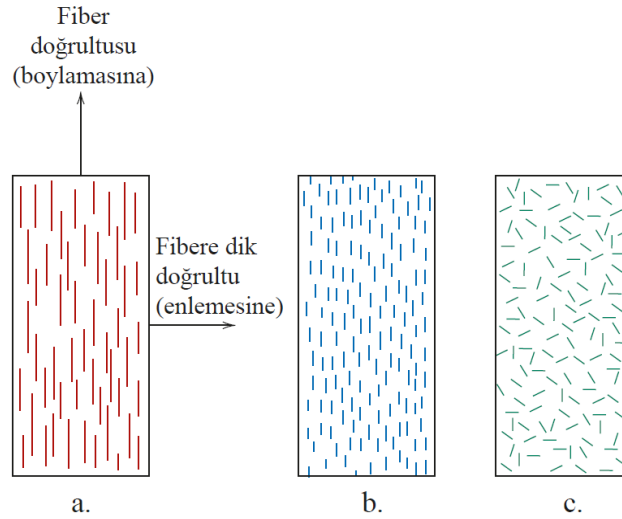
Seramikler düşük tokluğa, sünek metaller en yüksek tokluğa; polimerler ara tokluğa, ancak düşük kırılma tokluğuna sahiptir (çünkü modülleri düşüktür). Bununla birlikte, takviye elemanı polimerlerden yapılan kompozitler, iyi kırılma tokluklarına sahiptir. Son olarak, çoğu metal oda sıcaklığında veya üstünde tok olmasına rağmen, birçoğu (örneğin çelikler veya yüzey merkezli kübik metaller gibi veya hacim merkezli kübik metaller) yeterince soğutulduğunda, oldukça kırılma hale gelir (Şekil 1.7d) (Ashby & Jones, 2012).

1.4 Fiber Takviyeli Polimer Matris Kompozit Malzemeler

Fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler (PMC) içerdikleri takviye malzemelerine göre dört grup altında toplanırlar;

- Cam Fiber-Takviyeli Polimer Kompozitler (GFRP)
- Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler (CFRP)
- Aramid (Kevlar) Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler (AFRP)
- Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE), metalik, boron, seramik, basalt, silika ve kuvars fiberler

Fiberlerin birbirine göre düzenlenmesi veya yönlendirilmesi, fiber konsantrasyonu ve dağılımı, fiber takviyeli kompozitlerin mukavemeti ve diğer özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yönelim ile ilgili olarak, iki tür hizalama mümkündür: (1) fiberlerin uzunlamasına ekseninin tek bir yönde paralel hizalanması ve (2) tamamen rastgele bir hizalama. Sürekli fiberler çekme doğrultusunda hizalanır (Şekil 1.8a), süreksiz fiberler de çekme doğrultusunda hizalanabilir (Şekil 1.8b) rastgele yönlendirilebilir (Şekil 1.8c) veya kısmen yönlendirilebilir. Fiber dağılımı tek biçimli olduğunda daha iyi kompozit özellikler elde edildiği anlaşılmıştır. Fiberler kısa (kesik fiber) veya uzun (sürekli) geometrilere sahip olabilirler. Fiberler anizotropik özellikleri sayesinde boylamasına doğrultuda yüksek mekanik performansa sahipken, enlemesine yönde zayıftırlar. Farklı yönlerde yük taşıma kabiliyetlerini artırmak için sürekli ve kesik fiberlerin kullanıldığı iki ve üç boyutlu kumaşlar (preform) üretilmektedir. Kumaşlar tek yönlü, keçe (rastgele kesik kısa veya sürekli fiber takviyeli), dokuma, şeritli, örgü, dikişli (atkı ve çözgü) ve dokuma olmayan (coremat) formlara sahip olabilirler.



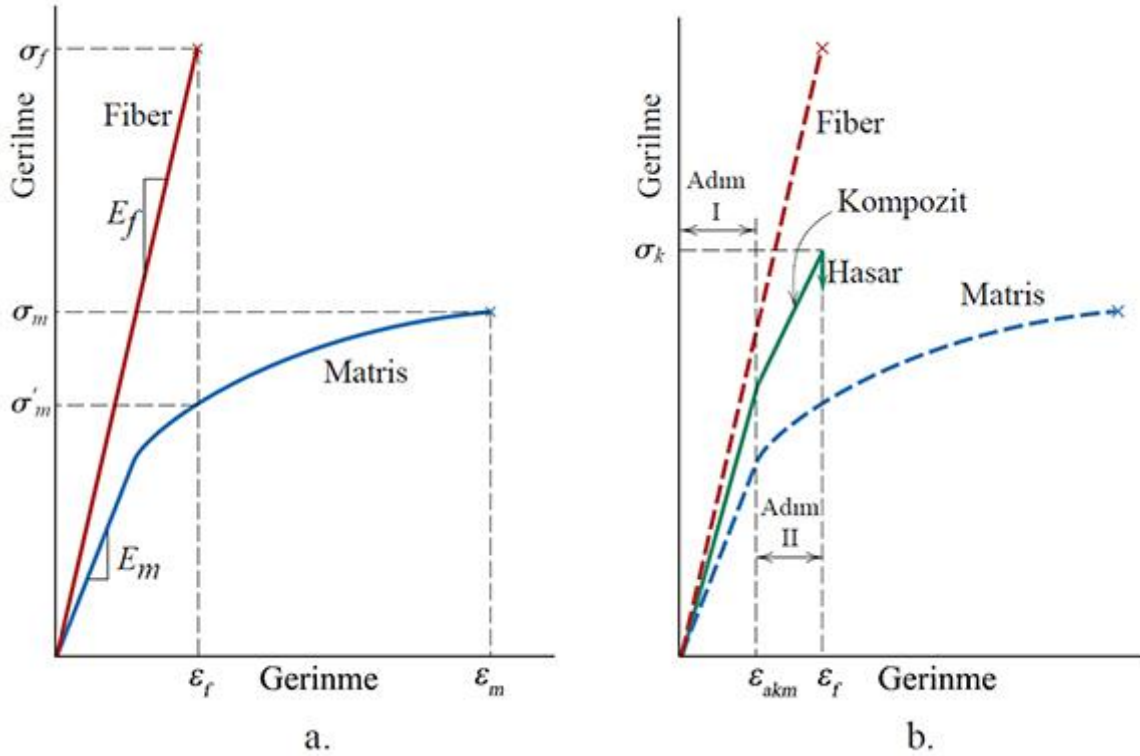
Şekil 1.8: Fiber takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi
a) sürekli ve çekme doğrultusunda yönlendirilmiş, b) süreksiz ve çekme doğrultusunda yönlendirilmiş, c) süreksiz ve rastgele yönlendirilmiş.

Fiber takviyeli polimer matris kompozitin mekanik davranışları, fiber ve matris fazlarının gerilme-gerinim davranışlarını, fazların hacimsel oranı ve ek olarak gerilme veya yükün uygulanma yönünü içeren çeşitli faktörlere bağlıdır. Ayrıca, fiberleri hizalanmış bir kompozitin özellikleri yüksek derecede anizotropiktir, ölçülen özellikler yöne bağlıdır.

Gerilmenin fiber doğrultusunda uygulandığı boyuna durum (Şekil 1.8) dikkate alındığında, şekil 1.9 (a)'da şematik olarak verilen fiber ve matris fazları için gerilme ve gerinim davranışlarında fiberin tamamen gevrek ve matris fazının makul derecede sünek olduğu kabul edilmiştir. Bu grafikte kırılma mukavemetleri fiber ve matris çekme yönünde σ_f , σ_m , uzamaları ϵ_f , ϵ_m sırasıyla verilmiş ve $\epsilon_m > \epsilon_f$ normalde böyle olduğunu varsayılmıştır.

Bu fiber ve matris malzemelerinden oluşan elyaf takviyeli kompozit, Şekil 1.9 (b)'de gösterilen tek eksenli gerilim-gerinim davranışını sergileyecektir. Şekil 1.9 (a)'daki fiber ve matris davranışları perspektif sağlamak için dâhil edilmiştir. I. Adımda, hem fiberler hem de matris elastik olarak deforme olur; normalde eğrinin bu kısmı doğrusaldır. Bu tip bir kompozit için, fiberlerin çekme mukavemeti matrisin akma mukavemetinden önemli ölçüde yüksek olduğu sürece, fiberler elastik olarak gerilmeye devam ederken, matris akar ve plastik olarak deforme olur (ϵ_{akm} noktasında, Şekil 1.9b). Bu süreç, şekilde görüldüğü gibi Adım II'yi oluşturur; bu aşama genelde doğrusala yakındır, ancak Adım I'e göre azalan eğimdedir. Ayrıca Adım I'den Adım II'ye geçerken, fiberlerin taşıdığı yükün oranı artar. Kompozitte hasar başlangıcı, fiberler kırılmaya başladığında oluşur, bu da Şekil 1.9 (b)'de

yaklaşık olarak belirtildiği gibi ε_f ye karşılık gelir. Kompozit hasarı bir kaç nedenden dolayı çok ciddi değildir. Birincisi, gevrek fiber malzemelerin kırılma mukavemetinde her zaman önemli farklılıklar olacağından, tüm fiberler aynı anda kırılmaz. Ek olarak, fiber hasarından sonra bile, matris hala $\varepsilon_f < \varepsilon_m$ kadar sağlamdır (Şekil 1.9a). Bu nedenle, orijinal olanlardan daha kısa olan bu kırılmış fiberler hala sağlam matris içine gömülüdür ve sonuç olarak matris plastik olarak deforme olmaya devam ettikçe azaltılmış bir yükü destekleyebilir (Callister & Rethwisch, 2007).



Şekil 1.9: a)Gevrek fiber ve sünek matrise ait gerilme-gerinme eğrisinin şematik gösterimi, b) yükün fiber doğrultusunda uygulandığı boylaması durumu için gerilme-uzama eğrisinin şematik gösterimi (Callister & Rethwisch, 2007).

FRP kompozitlerin üretiminde polimerler, kumaşlara kolaylıkla emdirilebildiği için sıklıkla kullanılan matrislerdir. Termosetlerden; epoksi (EP), doymamış polyester, vinil ester, poliüretan (PUR), fenolik ve amino (üre ve melamin-formaldehit), termoplastiklerden: poliamid (PA), polieterimid (PEI), polipropilen (PP), polistiren (PS), polietilen (PE), polietereterketon (PEEK) ve elastomer tip reçineler matris fazı olarak en çok tercih edilen polimerlerdir (Edwards, 1998; John Summerscales, 2018).

FRP malzemelerde kullanılan çok sayıda matris ve fiber elemanlarının yoğunluk, viskozite, termal direnci ve genişmesi, mekanik özellikleri ve darbe dayanımı, korozyon direnci ve fiyat vs. gibi kendilerine has karakteristikleri bulunmaktadır. Bu malzemelerin performansı matris ve fiberlerin özellikleri ile sınırlı kalmayarak üretim parametrelerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Laminat ve sandviç yapılarda çok tabakalı formlar şeklinde yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır (Clyne & Hull, 2019; Mazumdar, 2001).

1.4.1 Laminat Kompozitler

Bir laminat, iki veya daha fazla tek yönlü lamina veya çeşitli yönlerde birlikte istiflenen katlardan oluşur. Lamina (veya katlar (plies) veya katmanlar (layers)) çeşitli kalınlıklarda olabilir ve farklı malzemelerden oluşabilir. Ana malzeme eksenlerinin yönü kattan kata değiştiği için, ortak bir sabit sistem veya koordinatlar (x, y, z) kullanarak laminatları analiz etmek daha uygundur. Belirli bir katın oryantasyonu, x-y düzleminde saat yönünün tersine ölçülen, katmanın referans x eksenine ile ana asal malzeme eksenine (elyaf oryantasyonu veya çözgü yönü) arasındaki açı ile verilir. Tabaka sayısının artırılması ve tabakaların kuvvet yönünde düzenlenmesi sağlanarak; x-y düzleminde etki eden kuvvetlere karşı daha mukavemetli laminat yapılar üretilmektedir (Daniels & Ishai, 2006). Düzlemde fiber yönleri birbirine dik olan ahşap katların yapıştırılmasıyla kontrplak elde edilmektedir (Clyne & Hull, 2019; I. M. Daniel, Ishai, Daniel, & Daniel, 1994).

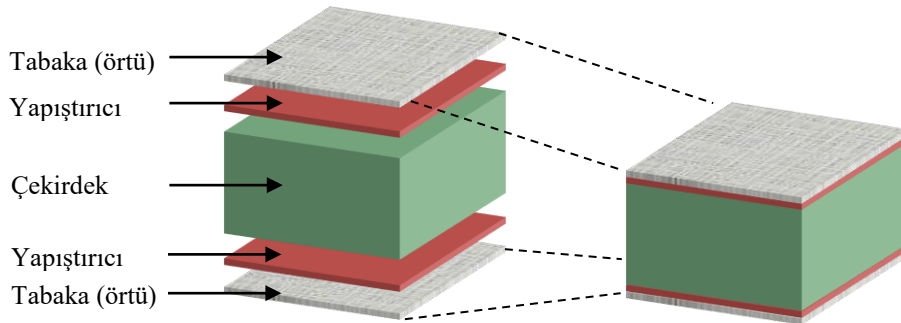
Laminat yapılarda, eğer kuvvet liflerin yönüne dik ise, liflerin buna karşı koyma kabiliyeti çok azdır. Laminer kompozitin z-yönü mukavemeti ve rijitliği, matrisin mukavemeti ve rijitliği ile belirlenir. Kompozit yapının avantajları (lif ve matris arasındaki birliktelik) z yönünde büyük ölçüde kaybolur. Bu z-yönü problemini ele almanın en yaygın yöntemi sandviç yapılardır (Strong, 2008).

1.4.2 Sandviç Kompozitler

Yapısal bir sandviç, her bir ayrı bileşenin özelliklerini bütün birleşimin yapısal avantajına göre kullanmak üzere birbirine bağlanmış farklı malzemelerin bir kombinasyonundan oluşan lamine bir kompozitin özel bir şeklidir (ASTM, 1999). İki ince, rijit ve güçlü dış tabaka kalın, hafif ve daha zayıf bir çekirdek ile ayrılır (Şekil 1.10). Dış tabakalar, dış eğilme momentine karşı etkili bir gerilme çifti oluşturmak için birlikte hareket eder ve düzlem içi gerilmelere maruz kalır. Çekirdek yapı kaymaya karşı dayanıklı olduğundan ve dış tabakaları burkulmaya veya kırılmaya karşı stabilize eder. Ayrıca, çekirdek yapı kesme

ve basma gibi düzlem dışı kuvvetlere karşı rijit olmalı ve tabakalar arası sabit mesafeyi koruyabilmelidir. Aksi takdirde özellikle eğilme yükü altında alt ve üst tabakalar bağımsız hareket eder, sandviç etki azalır ve yapı hasara uğrayabilmektedir. Dış tabakalar ve çekirdek malzeme arasındaki yapışma, arayüzeyde oluşan kesme ve çekme gerilmelerine dayanacak kadar güçlü olmalıdır. Dış tabakaları çekirdek malzemeye bağlayan yapıştırıcı bu nedenle kritik öneme sahiptir, arayüzeyin yük transferini sağlaması gerekmektedir (Carlsson & Kardomateas, 2011; Vinson, 1999; Zenkert, 1995). İki katman arasındaki yapışkan bağ çok zayıfsa, en olası sonuç delaminasyon olacaktır.

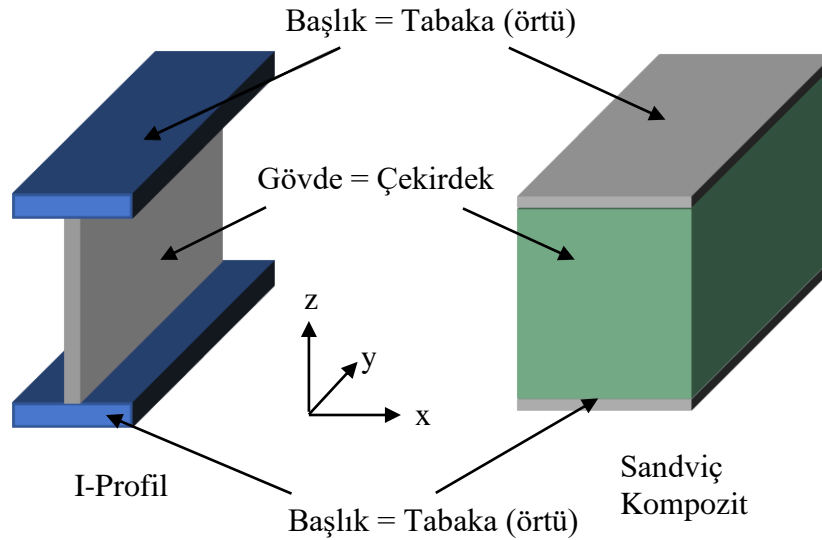
Dış tabakalar (örtüler), çelik gibi yüksek mukavemetli malzemeden, alüminyum alaşımları, kontrplak ve fiber takviyeli plastik kompozitlerden (tek yönlü veya dokuma grafit/epoksi, cam/epoksi vb.), çekirdek malzemeleri balsa ağacı, kontrplak, balpeteği (alüminyum, plastik, kâğıt, karton, polipropilen, Nomex, Kevlar), köpük (poliüretan, fenolik ve polistiren) vb. gibi kalın ve hafif malzemelerden oluşur. Yapıştırıcılar dış tabaka ve çekirdek malzemeleri birleştirir ve bu nedenle sandviç panelin bütünlüğü açısından kritik öneme sahiptir. Yapıştırıcılar film, macun ve sıvı formlarında gelir. Yaygın örnekler arasında epoksi, polyester, silikon, fenolik, akrilik, üretan ve poliamid bulunur (Kaw, 2005).



Şekil 1.10: Sandviç kompozit malzeme bileşenleri.

I- kirişlerinde olduğu gibi kalınlıktaki artmanın mukavemet ve eğilme rijitliğini çok arttıracığı uzun zamandır bilinen bir gerçektir. Şekil 1.11’de gösterildiği gibi, I kirişinin üst ve alt başlıkları, reçine-elyaf tabakalara, kirişin gövde kısmı da sandviç kompozitin çekirdek malzemesine karşılık gelir. I-kirişin gövde kısmı nispeten daha ince olduğundan hafiftir. Benzer şekilde, çekirdek malzemeler de genellikle reçine-fiber laminatlardan çok

daha hafiftir. I-kirişinin ve sandviç kompozitin rijitliğindeki artış, bazı genel parametrelerin korunması şartıyla, temel olarak gövdenin/çekirdeğin yapısına bağlı olmayan, başlıklar/dış tabakalar arasındaki mesafenin fonksiyonudur. Sandviç kompozitlerde dış tabakaların tarafsız eksenden uzağa yerleştirilmesiyle yüksek eğilme rijitliği elde edilmiştir. Bununla birlikte, I-kirişleri ve sandviç yapılar arasında önemli bir fark vardır. Sandviç z-yönünde kuvvete maruz kaldığında, kuvvet çekirdeğin tüm yüzeyine yayılma eğilimindedir, böylece kuvvetin tek bir yere yoğunlaşmasını önler. I-kirişleri kuvveti çok daha az yaymaktadırlar. Dahası, kuvvetin bir kompozit içinde yayılması nedeniyle, çekirdek malzemenin bir I-kirişinde gerektiği kadar rijit veya güçlü olması gerekmez. Başka bir deyişle, dış tabaka ve çekirdek malzemenin kombinasyonu, eğer doğru bir şekilde birleştirilirse, her iki malzemeden daha rijit ve mukavemetli olacaktır. (Strong, 2008).



Şekil 1.11: I profil ve sandviç yapı elamanlarının karşılaştırılması.

Tasarım Kriterleri:

Bir sandviç elemanın tasarımı sadece uygulanabilir bir tasarım elde etmek için değil, aynı zamanda ağırlık, güç veya rijitlik gibi bir amaca göre optimum bir tasarım elde etmek için boyutlandırma ve malzeme seçiminin entegre bir sürecidir. Lifli kompozitlerin çeşitliliği ile dış tabaka malzemelerinin seçimi mekanik özellikler açısından neredeyse sonsuz hale gelmiştir. Çekirdek malzemeler, özellikle köpükler, çok çeşitli yoğunluk ve özelliklerde mevcuttur. Tüm malzeme sistemlerinin bazı avantajları ve dezavantajları, malzeme seçiminin genel olarak değil spesifik uygulamanın hedefleri tarafından belirlendiğini ima

eder. Bu hedefler genellikle; kimyasal veya ısı direnci, yüzey aşınma direnci, ısı yalıtımı veya üretim süreciyle ilgilidir. Bu nedenle, malzemeler genellikle, pratikte, yapının hizmet veya imalat gereksinimleri tarafından zaten tanımlanır. Bununla birlikte, malzemenin kendisi, örneğin belirli bir çekirdek malzemenin yoğunluğu tanımlanmış olsa bile, malzemeyle ilgili bazı özellikler yine de değişken olarak kabul edilebilir. Bununla birlikte, çoğu malzeme özelliği kalınlık gibi sürekli olmayıp, örneğin bir kompozit laminatın kat sayısı, sac metal veya çekirdek malzemelerin mevcut kalınlıkları gibi farklı adımlarda değişebilir. Uygulamaya bağlı olarak farklı olabilen bazı ortak kısıtlamalar aşağıda belirtilmiştir:

- Isı yalıtımı için minimum çekirdek kalınlığı ve özel çekirdek malzemeleri.
- Minimum dış tabaka kalınlığı ve verilen darbe direncine yönelik dış tabaka ve çekirdek malzemelerinin bir kombinasyonu.
- Yüzey aşınma direnci için spesifik dış tabaka malzemesi ve kalınlığı.
- Yüzey kalitesi için spesifik dış tabaka malzemesi.
- Çevresel direnç için spesifik dış tabaka malzemesi.
- Hacim gereksinimi için maksimum toplam kalınlık (Zenkert, 1995).

Uygun malzemelerin seçimi başarılı bir yapısal tasarıma doğru kritik bir adımdır. Bunu etkili bir şekilde yapabilmek için tasarımcı çalışma yüklerini ve çevresel faktörleri anlamalıdır. Yüksek performanslı deniz yapıları için, yüksek yüklerin ve sert çevrenin birleşimi, olağanüstü mekanik performans ve uzun vadeli dayanıklılık sunan malzemeler gerektirir.

Sabit kalınlığa sahip sandviç yapının çekirdeğinde kalınlık artışı ve dış tabakalarda kalınlığın azalması yapının hafiflemesini ve üretim maliyetinin düşmesini sağlarken, düzlem içi mukavemet ve rijitlik değerlerinin azalmasına sebep olur. Bu yüzden geometrik boyutlandırma ve malzeme seçimi aşamalarında; tasarımcı statik ve dinamik yükleme koşulları, ağırlık, üretim yöntemleri ve maliyet gibi etmenleri dikkate almalıdır. Çekirdek malzemeye, laminasyon planı; tabakaların fiber veya kumaş çeşidi, yönelimi ve istiflenmesi gibi parametreler belirlendikten sonra karar verilir.

Yangın ve yüksek servis sıcaklıkları gibi diğer çevresel konular da tasarımcıyı ilgilendirebilir. Sandviç yapının çalışma koşullarında uzun süre işlevlerini sürdürebilmesi

için; nem, sıcaklık, yanıcılık ve yorulma gibi çevresel etmenler tasarım sürecine dâhil edilir. Su altındaki tüm deniz yapıları için ortak çevresel endişe, nem emilimi ve mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkisidir. Deniz suyunda, uzun yıllar boyunca nemli bir ortama maruz kalan kompozit malzemelerde görünür bir bozulma olmamasına rağmen, mekanik özellikleri önemli ölçüde azalır. Sandviç kompozit yapıların bileşenleri, çok farklı ve birbirlerinden farklı nem genleşme ve emme kapasitesi özellikleri sergiler.

Bütün bu değişkenler ayrıntılı bir mühendislik yaklaşımı ve araştırma yöntemiyle incelenerek optimum sandviç tasarımının elde edilmesi için tüm girdi ve çıktılar belirlenir ve geri besleme yöntemi ile izlenir.

Yüksek performanslı kompozit ticari projelerin gelecekteki maliyetini ve süresini azaltmak için mevcut test prosedürlerinin yanında veya potansiyel olarak yerine sayısal yöntemler kullanılmalıdır. Tasarım süreçlerinin tüm basamaklarında, sandviç kompozitlerin sonlu elemanlar yöntemleri ile yapısal analizleri yapılmalıdır. Alternatif olarak, kritik askeri gemi yapıların gövdeleri, önemli patlama ve darbe yüklerine dayanacak şekilde tasarlanmalı, aynı zamanda ağırlığa göre yüksek mukavemet ve rijitlik sağlamalıdır (Pemberton, Summerscales, & Graham-Jones, 2018).

1.5 Deniz Taşıtlarında Fiber Takviyeli Polimer Matris Kompozitlerin Kullanımı

Ahşap ve çelik gibi geleneksel malzemeler uzun yıllardır deniz yapıları için inşaat malzemeleri olarak kullanılmaktadır. Deniz yapıları hizmet ömürleri boyunca, nem, sıcaklık, farklı mekanik yüklerin birleşik etkilerini içeren zorlu çalışma şartlarına maruz kalır, kaza sonucu oluşabilecek darbeler veya patlamalardan, agresif ortamlara bağlı yangın aşınması ve yıpranmasından kaynaklanan hasarlara karşı korunmasızdır. Kompozit yapılar, geleneksel çelik yapılarla karşılaştırıldığında önemli avantajları vardır, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, iyi darbe özellikleri, düşük kızılötesi, manyetik ve radar özellikleri, mükemmel dayanıklılık ve aşırı yüklere karşı yüksek rezilyans sunarlar. Deniz uygulamaları için elyaf takviyeli polimerlerin (FRP) kullanımı, 1950'lerden bu yana istikrarlı bir büyüme göstermiştir (Shenoi ve Wellicome, 1993). FRP uygulamaları başlangıçta can kütaran filikaları gibi küçük deniz araçları ile sınırlı kalsa da, gemi gövdeleri ve üst yapıları, denizaltılar ve açık deniz yapıları gibi büyük ölçekli yapılarda uygulama alanı bulmuştur. Açık deniz inşaatları, genellikle elektrik, petrol, gaz ve diğer kaynakların üretimi ve iletimi için deniz ortamında yapıların ve tesislerin kurulmasıdır.

Çeliğin açık deniz yapısında kullanılmasındaki dezavantajı deniz suyu ve hidrojen klorüre karşı zayıf korozyon direncidir. Her yıl petrol endüstrisinin, korozyona uğramış çelik yapıların bakım, onarım ve değiştirilmesinde birkaç milyar dolar harcadığı tahmin edilmektedir. Kompozitlerin, çoğu kimyasala karşı yüksek korozyon direncinin olması bu maliyetleri azaltma potansiyeli sunmaktadır. Malzemelerdeki gelişmeler, üretim yöntemleri ve tasarım prosedürleri göz önüne alındığında, metallere göre daha iyi performans gösteren hafif, yüksek mukavemetli ve düşük maliyetli kompozit yapılar üretmek artık mümkündür. Üretim yöntemlerinde ve tasarım aşamalarındaki ilerlemeler yüksek performansa sahip reçine ve fiber malzemelerin geliştirilmesini sağlamıştır (Pemberton vd., 2018).

Fiber takviyeli polimer esaslı kompozitler (FRP) dayanıklılık, işlenebilirlik ve maliyet açısından optimum seçim olması nedeniyle yıllardır tekne yapımı ve deniz inşaat endüstrilerinde geniş bir aralıkta önemli kullanıma sahiptir. Bu malzemeler hem malzeme korozyonuna hem de UV, deniz suyu, organizma gibi deniz çevre etkilerine karşı ve yorulma yüklerine daha iyi direnç sağlar, ayrıca geleneksel malzemelere kıyasla mukavemet/ağırlık oranı (spesifik çekme mukavemeti) avantajlarına sahiptir.

Yaygın olarak kullanılan bu malzemelerin belirli bir süre boyunca (yaşlanma) çevresel etkiler altındaki davranışlarını anlamak, deniz yapılarının maliyet etkin bir şekilde inşa edilmesi ve bu yapıların yaşam döngüsünün değerlendirilmesi için bir gereklilik haline gelmiştir. Parça güçlendirmenin mümkün olması böylece parçaların, bağlantıların ve bağlantı elemanlarının sayılarının ve üretim aşamalarının azaltılması; ağırlık merkezini düşürmeye yardımcı olarak hafifletme ve dengede iyileştirmeler sağlamak; karışık şekillere ve çok eğrili kompozitlere daha kolay uygulama yapılmasını mümkün kılmak, büyük boyutların “örtülebilirliği (drapable)” gibi FRP’lerin ek avantajları vardır, bu nedenle gövdeler, güverteler, denizaltı kaplamaları kompozit üretim için ideal adaylardır (Guillermin, 2010; A. Mouritz, Gellert, Burchill, & Challis, 2001; Neşer, 2017).

Çelik ve alüminyum gemiler, 15 yıllık hizmet ömrü boyunca oldukça sabit bakım maliyetleri olurken, daha sonra çelikte korozyon ve alüminyumda yorulma çatlağının başlamasıyla bakım maliyetleri hızla yükselmeye başlar. Nispeten hafif tekne gövdelerine sahip küçük deniz gemileri için, çelik gövde kaplamasının %20'sinin tipik olarak 15 yılda değiştirilmesi gerekir. Karşılaştırıldığında, günümüzün kompozit teknolojisi ozmoz ortadan kaldırmıştır, bu nedenle kompozit tekneler estetiklerini korur, yapısal bir bozulma

göstermez ve 20 yıllık bir yaşam döngüsü boyunca ve ötesinde bakım maliyetlerinde artış olmaz (Russell, 2005).

Deniz taşıtlarında kompozitler, üstyapılarda, güvertelerde, perdelerde, gelişmiş direk sistemlerinde, pervanelerde, sevk şaftlarında, dümenlerde, pompalarda, valflerde, makinelerde ve diğer ekipmanlarda mevcut ve potansiyel olmak üzere çok çeşitli yeni uygulamalarda kullanılmaktadır. Donanma gemilerindeki ikincil yapılar, bağlantı parçaları (fittings) ve ekipmanları için kompozit kullanımına ilgi artmaktadır. Uygulamalar arasında bacalar, gemi bölmeleri (perdeler), dümenler, su geçirmez kapı, ambar kapakları, motor temeli, borular ve havalandırma sistemleri bulunmaktadır. Dizel motorlar, pompalar ve ısı değiştiriciler için mekanik bileşenler de dâhildir. Tasarımcılar, gövde ağırlığının azaltılmasının asgari yükte bir artışa izin vermesini, daha fazla menzil ve/veya yakıt tüketiminin azalmasını beklemektedir (A. Mouritz vd., 2001). Goubalt ve Mayes (1996), daha az bakım (daha az korozyon nedeniyle) ve daha düşük yakıt tüketimi nedeniyle kompozit bir teknenin işletme maliyetinin çelik bir tasarımdan daha düşük olacağını öngörmektedir.

Atık kaynağı ne kadar az karışırsa, geri dönüşüm işlemi o kadar kolay olur, ancak kompozitlerde bu, malzemenin heterojen doğası ve polimer ve lifli elemanlar arasındaki geri dönüşüm tekniklerindeki değişim ile karmaşıklaşır. Kürlenmemiş hurdaların çeşitli malzeme elemanlarına bakıldığında, lif geri kazanımı için en yüksek değerli "reçine" malzemesi çıkarıldığı için geri dönüşüm ekonomik görünmemektedir. Reçineyi kürlenmemiş hurdada tutmak ve malzemeyi yeniden kullanmak daha iyidir. Bu işlemde hurda hala yapışmaya sahip olacağı düşünüldüğünde, kalıp, kabin içi gibi kullanılabilir yapılar oluşturmak için özellikle avantajlıdır (Singh, Summerscales, & Wittamore, 2010; John Summerscales, Singh, & Wittamore, 2016).

Tutuşabilirlik veya niceliksel olarak kompozitlerin tutuşma süresi, malzemelerin yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında sürdürülebilir alevle yanmaya karşı direnme kabiliyetini yansıtır. Tutuşma süresi, yüksek ısıya maruz kalmanın başlamasından kompozit yanma noktasına kadar geçen süre olarak hesaplanır. Egglestone ve Turley (1994), gemi üst yapılarında kullanılan cam elyaf takviyeli kompozitlerin tutuşması üzerine testler yapmıştır. A. P. Mouritz ve Mathys (1999), çalışmalarında ilk kez deniz sınıfı cam takviyeli polyster, vinil ester ve fenolik kompozitlerin çekme ve eğilme özelliklerinin

artan ısı akısı veya ısıya maruz kalma süresi ile hızla azaldığını göstermiştir. A. P. Mouritz, Mathys, Z (2001), yoğun ısıya maruz kaldıktan sonra cam takviyeli polyester kompozitlerin mekanik özelliklerindeki değişiklikleri araştırmışlardır. Çekme, basma, eğilme ve tabaka içi kesme özellikleri, esas olarak, kompozitin yanmasından kaynaklanan kömürleşme ve delaminasyon çatlama nedeniyle artan ısı akısı ve ısıya maruz kalma süresi ile hızla düşmüştür.

FRP'ler organik içerikleri nedeniyle doğal yanıcılığa sahip olsa da, mevcut malzemeler yangın koruma sistemleri gibi son 30 yılda önemli ölçüde iyileşmiştir. Tutuşma ve alev yayılmasına karşı koymak için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bununla birlikte, kompozitler çelikten daha düşük sıcaklıkta mukavemet kaybederler, ancak yanıcı olmamaları nedeniyle kabul edilen alüminyum yapıları geride bırakabilirler. Yangındaki yapısal kompozitler için kritik faktör genellikle polimerin ısı sehim sıcaklığı yapının kalınlığı boyunca kademeli olarak aşıldıkça ortaya çıkan çökmeye direnmektir (Job, 2015). İtalya'da yapılan testler, reçine transfer kalıplaması (RTM) ve vakum infüzyonu için amaçlanan düşük viskoziteli güçlendirilmiş epoksi reçinesinde katkı maddesi olarak kullanılan çinko borat, çinko stannat ve çinko hidroksistannatın alev geciktiriciler olarak etkili olduğunu göstermiştir (Marsh, 2010).

1.6 Denizel Sandviç Kompozit Malzemeler

Günümüzde, sandviç yapılar ve dış tabakaları için malzeme seçimi, elyaf takviyeli polimerin (FRP) kullanılmasından bu yana, neredeyse sonsuz sayıda farklı malzemeye yükselmiştir. Daha rekabetçi hücre polimerlerin piyasaya sürülmesiyle mevcut çekirdek sayısı son yıllarda belirgin şekilde artmıştır. Bu nedenlerden dolayı, sandviç yapıların tasarımındaki geometrik boyutlandırma problemi kadar malzeme seçimi de çok önemlidir. Mevcut malzemelerin sayısının çok olması ek bir karmaşıklık olarak görünebilir, ancak deniz alanında sandviç yapıların kullanılmasını sağlayan ana özellik olarak dikkate alınmalıdır. Belirli bir uygulamadaki en uygun olan malzeme için geometrik boyutlandırma yoluyla bazı eksikliklerin üstesinden gelinebilir: örneğin, bazı sandviç yapılar metallere göre daha az rijitlik gösterir, ancak çekirdek kalınlığının artırılmasıyla uygulanabilir bir rijitlik elde edilebilir. Sandviç yapılar için malzemeler, sadece mekanik performanslarına göre değil aynı zamanda çevre şartlarına direnci, yüzey kalitesi, üretim yöntemi, maliyet, aşınma direnci vb. nedenlerle de seçilir. Özel olarak, dış tabakalar için ihtiyaç duyulan temel özellikler, yüksek eğilme rijitliği, yüksek çekme ve basma dayanımı,

yüzey kalitesi, darbe dayanımı, çevre ve aşınma direncidir. Çekirdek malzemeyi ilgilendiren özellikler ise düşük yoğunluk, yüksek kayma rijitliği ve mukavemeti, yüksek basma rijitliği (dış tabakalara dik), yüksek ısı ve ses yalıtımıdır (Calabrese, Di Bella, & Fiore, 2016).

Sandviç kompozitlerin deniz inşaat sektörü uygulamalarında tercih edilme nedenleri:

- Deniz taşıtlarında parça değişimleri genellikle (alüminyum uygun bir seçenek değilse) çelik olup gemiyi ağırlatacaktır ve kompozit malzemeler buna makul bir alternatif sunar (Chalmers, 1994).
- Ağırlıktan tasarruf, daha büyük bir kargo kapasitesi, yakıt tasarrufu, daha yüksek ivme, arttırılmış denge, yüksek özgül mukavemet ve rijitlik ve yüzdürme sağlar, hem yakıt tüketimini hem de çevresel emisyonu düşürür (Crupi, Epasto, & Guglielmino, 2013).
- Deniz inşaat sektörü için özellikle önemli olan yapısal yüzdürme kabiliyeti arttırmak, kompozitin yoğunluğu ile kolayca ayarlanabilir (Craugh & Kwon, 2013).
- Daha fazla malzeme mukavemeti, esneklik, çevresel direnç ve hasar toleransının yanı sıra ağırlık, boyut ve maliyette azalma avantajları vardır (Kimpara, 1991).
- Isı ve ses yalıtımı, yangın geciktirme, düşük duman emisyonu, uyum, işleme kolaylığı, şekillendirme kolaylığı gibi avantajları olmakla birlikte çok çeşitli uygulama alanı, tasarım ve üretim esnekliği vardır (Karlsson & TomasÅström, 1997).
- Düşük bakım masrafları (Cassis & Talbot, 1998; A. Mouritz vd., 2001; Selvaraju & Ilaiyavel, 2011; Zenkert, Shipsha, Bull, & Hayman, 2005). Çelik bir gövdeye kıyasla CFRP gövde üzerinde korozyon olmadığından, gemi için Yaşam Döngüsü Maliyetini (LCC) azaltan küçük bir bakım ihtiyacı vardır (Mäkinen, Hellbratt, & Olsson, 1998) .
- Yüzey tabakalarının yönelimli özellikleri, karmaşık ve pürüzsüz hidrodinamik yüzeylerin tasarım optimizasyonunu ve üretimini sağlar (Cassis & Talbot, 1998; Herranen vd., 2012; Kumar & R, 2015; Mitra, 2010).
- Mükemmel korozyon direnci (Kootsookos & Burchill, 2004; Kootsookos & Mouritz, 2004), yüksek darbe ve su altı şoklarına karşı iyi hasar direnci (Sutherland, 2018a, 2018b, 2018c) düşük termal, radar, manyetik ve gürültü

azaltma gibi bir dizi gizli özellik sunarlar (Lonno & Hellbratt, 1996; A. Mouritz vd., 2001).

- Uygulanabilir bir maliyetle yüksek dayanıklılık ve iyi şok direnci olması, daha yüksek taşıma kapasitesi, daha yüksek hız veya daha uzun menzil sağlar (Hellbratt & Vallbo, 1998).
- Yüksek mukavemet-ağırlık ve rijitlik-ağırlık oranları sağlar (Yang, Das, Blake, Sobey, & Shenoi, 2013).
- Geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında, CFRP (carbon fiber reinforced polymer) gövde, diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında toplam maliyeti etkilemeyen çok iyi bir ağırlık / güç / fiyat oranına sahiptir.
- Karbon esaslı (veya camla birleştirilen) kompozitlerden yapılmış, boyuna ve enine (takviye ve kirişlerle) rijitleştirilmiş tasarım, "büyük" gemi inşaatları için uygulanabilir ve fiyatı makul bir çözümdür (Galanis, 2002)

Kompozit sandviç yapıların en büyük dezavantajı, geleneksel malzemeler (örneğin çelik veya ahşap) ile karşılaştırıldığında üretimlerinde yoğun bir işçilik olduğundan daha yüksek üretim maliyetleridir. Tasarım ve imalat mühendisleri, hammadde, laminat istifleme sırası ve üretim metotları için çok fazla seçeneğe sahip olduklarından, her parça için en iyi yöntemi seçmek önemlidir. Dış tabakalar için yaygın olarak kullanılan metalik malzemeler (çelik, paslanmaz çelik ve alüminyum alaşımları) veya metal olmayan malzemeler (kontrplak, çimento ve FRP'ler) olarak sınıflandırılabilirken, yük taşıyan sandviç yapılarda kullanılan çekirdek yapılar oluklu, bal peteği, balsa ağacı ve polimer köpükler olabilir (Atkinson, 1997; Shahdin, Mezeix, Bouvet, Morlier, & Gourinat, 2009; Zenkert, 1997). Deniz sandviç yapılarında FRP'lerde dış tabaka malzemeleri (karbon, aramid ve başlıca cam elyaflar), reçineler (epoksi, vinil ester ve polyester) ve çekirdek malzemeler olarak polimer köpükler (başlıca polistiren veya PVC köpük), bal peteği, balsa ağacı kullanılır (Calabrese vd., 2016; Di Bella, Calabrese, & Borsellino, 2012; Kolat, Neşer, & Özes, 2007; Mitra, 2010; A. Mouritz vd., 2001).

1.6.1 Takviye Elemanları

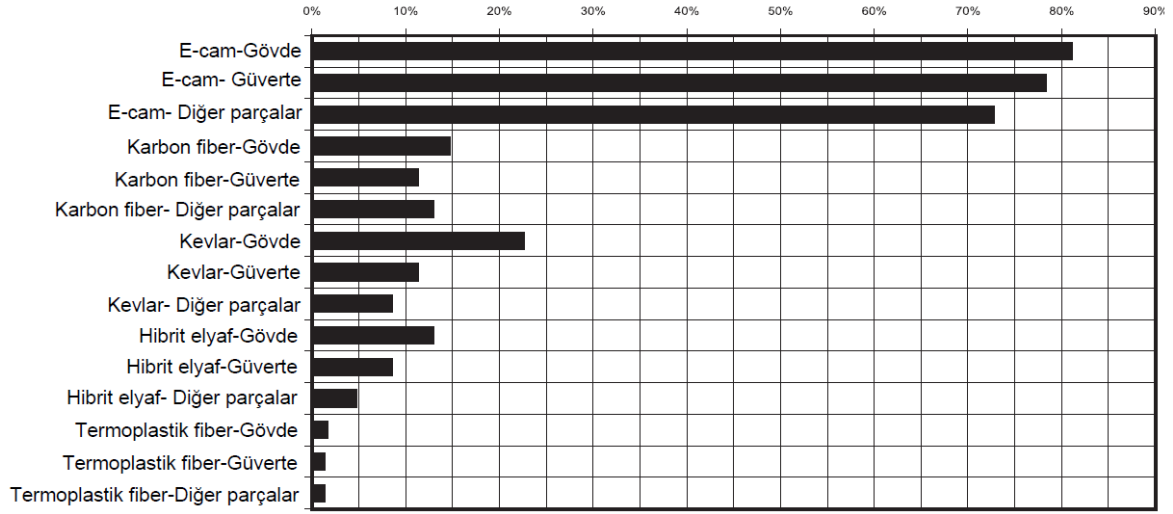
Deniz kompozit yapıları için takviyeler, mukavemet ve işlenebilirlik özelliklerine karşılık maliyeti nedeniyle E-cam dır. Yüksek mühendislikle üretilen yapıların optimum verimliği için genel olarak, karbon, aramid elyaflar ve diğer özel takviyeler deniz alanında kullanılır.

Yüksek performanslı denizcilik uygulamaları için en yaygın kullanılan iki fiber türü; karbon ve cam dır. Cam elyafları genellikle maliyetin önemli olduğu daha az kritik uygulamalar için tercih edilirken, karbon elyafları yüksek mukavemet ve rijitlik özellikleri olan laminatlar sağladığından yüksek maliyetle daha verimli yapılar elde edilir. Fiberler, laminatın mekanik özelliklerinin ana katkı maddesidir ve bu nedenle, deniz uygulamaları için uygun malzemeleri seçerken fiber bozulması önemli bir husustur. Neme bağlı bozulma, mevcut fiberler çeşitleri arasında değişmektedir. Karbon lifleri kimyasal saldırılara karşı duyarlı olsalar da, genellikle deniz suyunda orta dereceli sıcaklıklarda bozunmaya uğramazlar (Echtermeyer, Gagani, Krauklis, & Mazan, 2018). Fiberglas kompozitler, karbon fiber kompozitlerden daha fazla nemi emerler. Cam elyafı ise deniz suyuna maruz kaldığında eğilme rijitliği ve mukavemet değerleri, artan su emme miktarları ile azalmıştır. (Kootsookos & Mouritz, 2004).

Aramid lifleri, yüksek modül, yüksek mukavemet, tokluk, ısıl stabilite ve kimyasal direnç gibi benzersiz kombinasyonlara sahiptir. Bununla birlikte, moleküler düzenlemeden dolayı, fiberler zayıf enine (transverse) mukavemet ve basma özelliklerine sahiptir (basma dayanımı genellikle çekmenin yaklaşık %20'sidir). Ayrıca, amid grubu hidrofildir (suyu seven), bu yüzden lifler nemi emer ve fiberler ultraviyole ışık ile bozunurlar. En yaygın aramid lifi ise DuPont tarafından geliştirilen Kevlar® malzemedir. Kevlar® 49'un su emilimi diğer takviyelerden daha yüksektir, ancak ultra yüksek modüle sahip Kevlar® 149, Kevlar® 49'un üçte ikisinden daha az su emer.

Fiberlerin nem absorbe etmesi, reçine matris emdirilmesi ve dış kaplama uygulamaları ile azalmaktadır. Fiberlerin üretim yöntemlerine uygulanabilmeleri için farklı formlarda tekstil ürünleri yapılmıştır. Tekne endüstrisi, tek yönlü ve dikişli kumaş takviyeleri elde edilene kadar fiberglasın yöne bağlı mukavemet özelliklerinden yararlanamamıştır. Tekne imalatında izotropik özelliklere sahip keçe ve kırılmış cam elyaf takviyeler kullanılmıştır. Kumaş veya dokuma fitil gibi dokuma takviyeler, liflerin "ön burkulma" dezavantajına sahiptir, bu da düzlem içi mukavemet özelliklerini büyük ölçüde azaltır. Tek yönlü takviyelerin ve dikişli kumaşların tek yönlü tabakaları, fiber eksenine göre üstün özellikler sunar. Tek yönlü takviyeler, kırılgan ve gövde boyunca merkez hatları gibi uzunlamasına mukavemet elemanlarında çok etkilidir. Örme kumaşların en popüler olanı, üstün kayma mukavemeti sergileyen ve gövdeyi burulmaya karşı güçlendirmek ve ikincil yapıya eklemek için kullanılan ± 45 yönlenebilir örgüdür. Günümüzde fiberler;

dokuma, dikişli, tek yönlü, keçe ve dolgu (dokuma olmayan) gibi takviye elemanları deniz inşaat sektöründe kullanılmaktadır (Şekil 1.12) (Associates, 1999; Pemberton vd., 2018).



Şekil 1.12: Denizel kompozit malzemelerde takviye eleman kullanımı (%) (Associates, 1999).

1.6.2 Reçineler

Polyester reçineler:

Polyester reçineler genellikle düşük mekanik özellikleri ve epoksi ve vinil esterle karşılaştırıldığında daha yüksek seviyede nem kaynaklı bozulma nedeniyle yüksek performanslı uygulamalar için düşünülmez. Polyester reçineler yaygın olarak daha küçük gezinti teknelerinin üretimi gibi daha az kritik uygulamalar için kullanılır, düşük maliyetler onları çekici bir seçim haline getirir. Bu tür uygulamalarda, kompozit ve deniz suyu arasındaki, jel kaplamalar, daha dayanıklı reçinelerin reçine bakımından zengin bölgeleri ve diğer koruyucu bariyerler iç kısımdaki cam/polyester laminatını korumak için kullanılabilir. Bu, nihai bozulmayı engellemeyebilir ve ozmotik kabarma gibi kusurlar hala ortaya çıkabilir (Clegg, 2006).

Polyester reçineler, kullanımı en kolay ve iyi kimyasal direnç gösteren en basit, en ekonomik reçine sistemleridir. Çeşitli reçine sistemleri kullanan üreticilerin yüzdesi, Şekil 1.13'te gösterilmiştir. Ortoftalik ve izoftalik olmak üzere denizcilik endüstrisinde iki tip polyester reçine kullanılmaktadır. Orto reçineleri hala yaygın olarak kullanılan geliştirilen orijinal polyester grubudur. Sınırlı termal kararlılığa, kimyasal dirence ve işlenebilirlik özelliklerine sahiptirler. İzo reçineleri genellikle daha iyi mekanik özelliklere sahiptir ve daha iyi kimyasal direnç gösterir. Su geçirgenliğine karşı artan dirençleri, birçok

inşaatçının bu reçineyi deniz laminatlarında bir jel kaplama veya bariyer kaplama olarak kullanmasına neden olmuştur. Doymuş asitlerin doymamış olanlara oranının artırılmasıyla polyester reçinelerinin sertliği azaltılabilir. Esnek reçineler, darbe direncinin artırılması için avantajlı olabilir, ancak bu, genel gövde kırılganlığının azalması anlamına gelir. Jelkotlar ve bariyer perdeleri gibi yapısal olmayan laminat katlar, bazen lokal çatlamaya dayanmak için daha esnek reçinelerle formüle edilir.

Vinil ester reçineler:

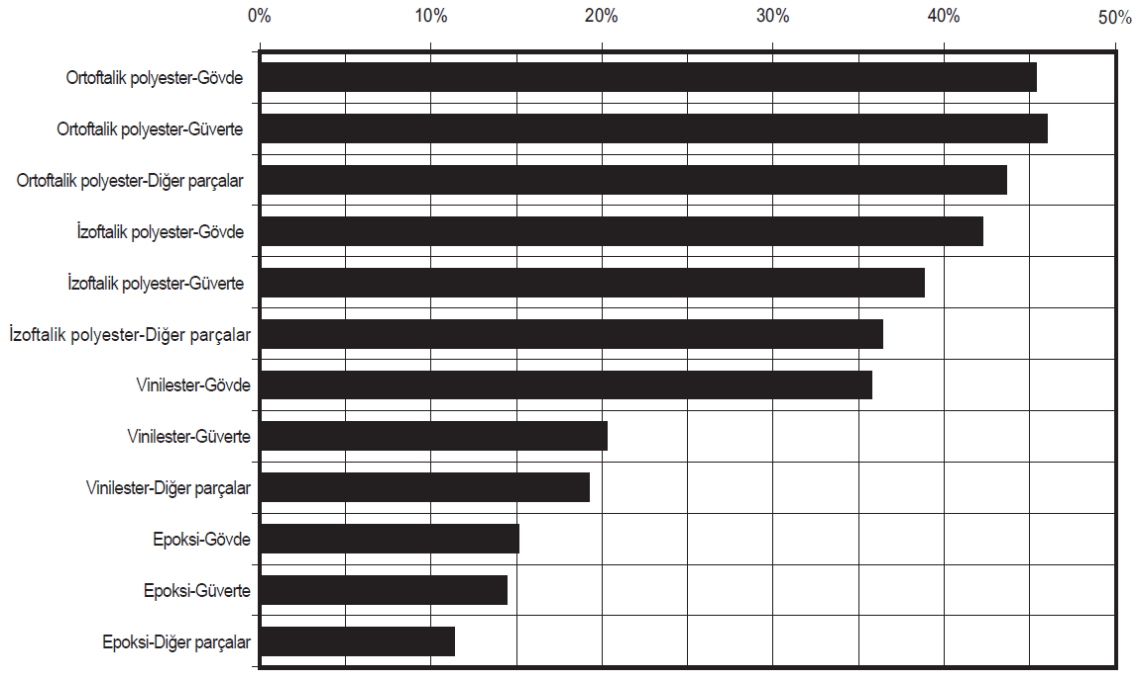
Vinil esterler tipik olarak mekanik performans ve maliyet açısından epoksiler ve polyesterler arasındadır. Bu reçineler, tekne yapımında ve diğer deniz yapılarında geleneksel kullanımlarını destekleyen nispeten düşük nem emme değerleri sergiler. Bu reçineler, katalizör/reçine karışım oranlarındaki değişikliklere daha toleranslıdır. Ayrıca, polyesterlere kıyasla ağır kimyasallara ve çevresel bozulmaya karşı geliştirilmiş yüksek dirençleri onları çok çeşitli denizcilik uygulamaları için uygun kılar. Vinil esterlerin kullanım ve performans özellikleri polyesterlere benzer. Vinil esterlerin yüksek maliyetlerini haklı çıkarabilecek bazı avantajları arasında üstün korozyon direnci, hidrolitik stabilite ve darbe ve yorulma direnci gibi mükemmel fiziksel özellikler bulunur.

Hem polyester hem de vinil ester reçineleri stiren içerir, bu da kürleşme sırasında laminattan yayılan zararlı buharla sonuçlanır. Çalışanlar için bu potansiyel sağlık riski, pahalı duman tahliyesi ve koruyucu güvenlik ekipmanı gerektirir. Bu önlemlerle bile, fabrikalarda stiren kokusu vardır. Düşük stiren içerikli reçineler bu nedenle tercih edilir.

Epoksi reçineler:

Epoksi reçineler, vinil ester veya polyester reçinelerden daha yüksek mekanik özellik sunar ve daha yüksek maliyetleri nedeniyle yüksek performanslı yapılar için kullanılır. Epoksi reçinelerinin kullanımı, sertleştirici/reçine karışım oranları için gereken sıkı toleranslar nedeniyle biraz daha zordur. Buna rağmen, epoksi reçineleri, çevresel bozulmaya karşı daha fazla direnç sağlayabildiklerinden yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kürleşme sonucunda, epoksi reçineler %2' den daha düşük polyester ve vinil ester reçineler %7 ile %10 arasında çekme payı oluşur. Bu durum ise kalıptan çıkan ürünlerin pürüzsüz yüzeylere sahip olmasını sağlamaktadır (Associates, 1999; Chalmers, 1994; Hoge & Leach, 2016; Marsh, 2007; Pemberton vd., 2018).



Şekil 1.13: Denizel kompozit malzemelerde reçine kullanımı (%) (Associates, 1999).

1.6.3 Çekirdek Malzemeler

Başlangıçta balsa ahşabı ve mantar gibi doğal malzemeler, ağırlığın önemli olduğu uygulamalarda kullanılmışlardır. (Castro, Silva, Devezas, Silva, & Gil, 2010; Gil, 2009) Bu malzemeler sandviç yapılarda çekirdek malzemelerin yapımında doğal ve sürdürülebilir seçenekler sunar. Hem balsa hem de mantar tamamen yenilenebilir kaynaklardan üretilir, kısmen geri dönüştürülebilir ve kompostlaştırılabilir (Le Duigou, Deux, Davies, & Baley, 2012; Reis & Silva, 2009).

Ağacın liflerine dik yönde kesilmiş (end-grain) balsa'nın basma ve kayma mukavemeti genellikle PVC köpüklerden ve diğer çekirdek malzemelerden daha yüksektir, ancak darbe ve enerji emme kapasiteleri çok düşüktür. Balsa darbe altında kompozitin yapıştırma hattına paralel olarak gerçekleşen delaminasyon ile kolayca ayrılır. 1950'lerden başlayarak, denizcilik sektöründe kullanılan temel çekirdek malzemeler doğrusal ve çapraz bağlı PVC köpük ve (end-grain) balsa ahşabı gelişmiştir (Cremonini, Negro, Properzi, & Zanuttini, 2008). ABD Donanması DD-968 Spruance sınıfı yüzey gemilerinde, E-cam/vinil ester, balsa ve PVC köpük çekirdek kullanılarak VARTM ile üretilen kompozit sandviç yapıları halen gelişmiş kapalı radar direklerinde (AEM/S) kullanılmaktadır (Mitra, 2010; Ulven & Vaidya, 2006).

Deniz sandviç yapılarında polimer köpüklerin kullanımı için birkaç örnek vardır. PVC köpük çekirdek yapıya sahip sandviç kullanılarak küçük ve orta büyüklükteki tekne ve yatların gövdeleri yapılmıştır. İsveç Donanması tarafından geliştirilen Visby sınıfı korvetin gövdesi köpük çekirdek yapıya sahip sandviçten yapılmıştır. Kaptan köşkü ve USS Zumwalt'ın güvertesinin yapımında büyük ölçekli sandviç paneller kullanılmıştır. Köpükler, küçük teknelerin usturmaça kısımlarında, darbe emilimi ve yüzdürme için kullanılır.

Köpükler açık ve kapalı hücreli olmak üzere iki kategoride sınıflandırılmış hücresel malzemelerdir. Açık hücreli köpüklerde, hücreler birbirine bağlıdır ve köpüğün kalınlığı boyunca bir sıvı nüfuz edebilir. Açık hücreli köpükler, denizel sandviç yapı uygulamalarında pek uygun değildir:

- Mukavemetleri ve rijitlikleri düşüktür ve bu nedenle yük taşıma kapasiteleri azdır.
- Dış tabakaların hasar görmesi, köpüğün tamamının su almasına ve çok ağırlaşmasına neden olabilir.
- Köpükteki çok küçük kesit alanı nedeniyle dış tabakanın (kaplamaların) yapışması zordur.

Bu nedenlerden dolayı, denizel sandviç yapılarda çekirdek malzemesi olarak kapalı hücreli köpükler tercih edilir. Bu köpüklerin kapalı hücreli yapısı, açık hücreli köpüklere kıyasla yüksek basma mukavemeti ve modülü elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Köpük hücrelerinde hapsedilen gaz, bu malzemelerin basma ve darbe özelliklerinin geliştirilmesine yardımcı olan karşı basınç uygular. Hücrelerin şekli çokgendir. Hücre duvarları ince olmasına rağmen, hücre bağlantıları kalın olabilir ve güç sağlar. PVC köpükler kimyasal olarak ise lineer ve çapraz bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Lineer olan köpüklerin, çapraz bağlı olanlara göre statik dayanım değerleri düşük, darbe yükü altındaki performansları ise daha yüksektir. Çapraz bağlı olanlar PVC köpükler ise daha sık kullanılmaktadır.

Balsa panellerinin statik mukavemeti genellikle PVC köpüklerden daha yüksek olmasına rağmen, darbe enerjisi emilimi daha düşüktür. Lokal darbe dayanımı çok iyidir, çünkü gerilme sandviç tabakaları arasında etkili bir şekilde iletilir. PVC köpükler balsa ahşabına göre, düşük yoğunluk, düşük nem emme kapasitesi ve darbe hasar toleransı gibi üstün

özelliklere sahiptir. Küçük ve orta büyüklükteki tekne ve yat imalat sektöründe en çok tercih edilen çekirdek malzemelerden biri PVC köpüktür (Şekil 1.14).

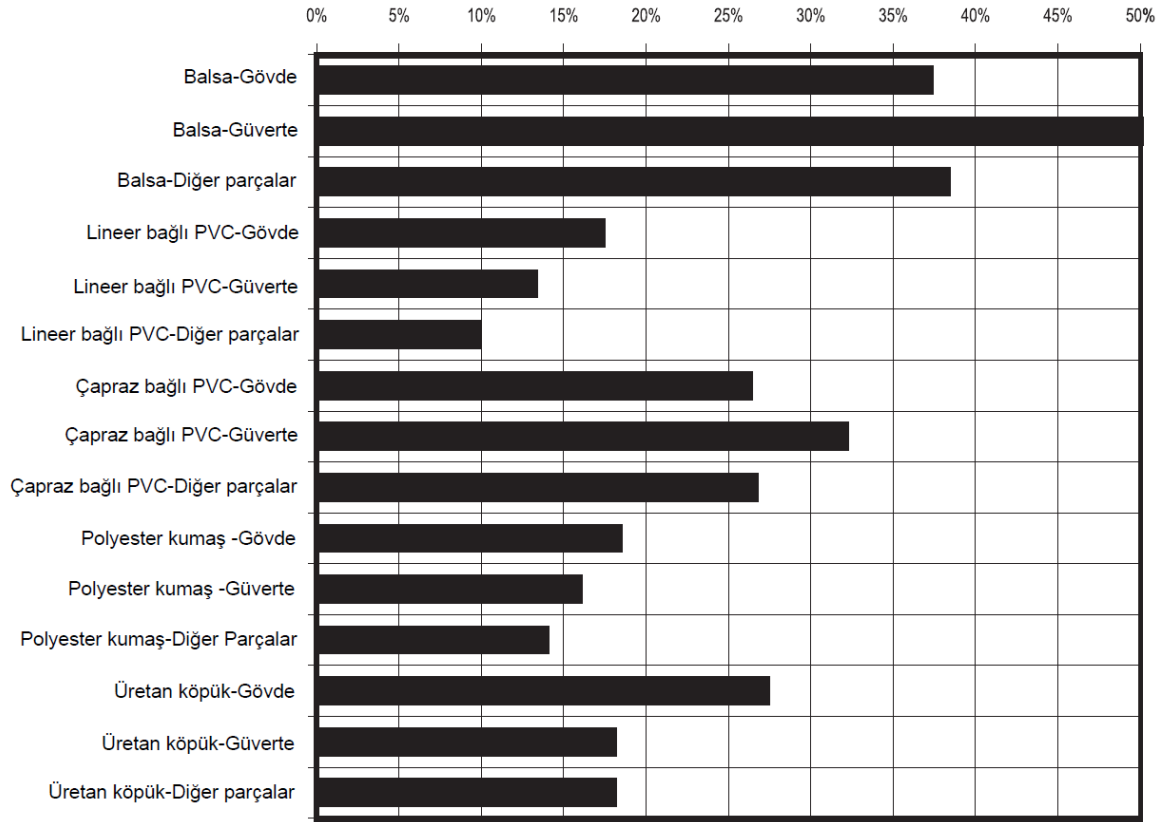
Deniz uygulamalarında kullanılan malzemeler için bariz bir endişe nem emilimidir. Mekanik, elektriksel ve ısı yalıtımı özellikleri nem alımından ciddi şekilde etkilenir. Sandviçlerde, dış tabaka bir miktar koruma sağlar; bununla birlikte, dış tabaka hasarı çekirdek malzemenin yüksek su/nem emilimine neden olabilir. PVC, yavaş nem alan hidrofobik bir malzemedir. Çekirdek malzemenin neme karşı duyarlı olması deniz suyuna maruz kalacak yapısal uygulamalar için önemli bir husustur. Nem alımına bağlı büyük boyutsal değişiklikler, nemli ortamdaki yapısal uygulamalar için sorun olabilir.

Kontrplak, yapısal bir çekirdek malzemesi olarak da belirtilmelidir, ancak fiberglas genellikle kontrplak ile birlikte kullanıldığında yalnızca bir kaplama olarak görülür. Laminatın basma özelliklerini geliştirmek için kontrplak daha hafif yoğunluktaki çekirdek malzemenin yerini almıştır. Ahşabın deniz ortamında nem emme ve şişmeye neden olup sonradan ortaya çıkan delaminasyon hasarı endişesi, ahşabın FRP ile birlikte kullanımındaki düşüşü hızlandırmıştır. Yeni deniz sınıfı kontrplak imalatında daha iyi işlem kontrolü bu sorunu azaltmalıdır. Kontrplağın düzensiz yüzeyi, zayıf bir yapışma anlamına gelir. Ayrıca, kontrplakların düşük mukavemet ve düşük gerilme özellikleri nedeniyle çekirdek malzeme olarak kullanıldığında erken hasarlara neden olabilir.

Hücre selüloz asetat (CCA), polistiren ve poliüretan gibi köpük plastikler çok hafiftir ve suya, mantarlara ve çürümeye karşı direnç gösterirler. Polistiren köpüğün ise düşük mekanik özelliklere sahip olması ve polye ester reçine ile tepkimeye girmesi kullanımını kısıtlamıştır. Bu köpükler karmaşık eğrilere uyumlu değildir. Kullanım genellikle yapısal uygulamalardan ziyade yüzdürme ile sınırlıdır. Yüzdürme malzemesi için genellikle köpük poliüretan kullanılır.

Havacılık endüstrisinde, çeşitli tiplerde üretilen balpeteği çekirdek yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bileşen malzemeler arasında alüminyum, fenolik reçine emdirilmiş cam elyafı, polipropilen ve aramid elyaf fenolik işlem görmüş kâğıt bulunur. Son derece hafif panellerin imalatı, balpeteği çekirdek yapılarla mümkün olsa da, deniz ortamındaki uygulamalar karmaşık dış tabaka geometrilerine yapıştırma zorluğu ve önemli su emme potansiyeli nedeniyle sınırlıdır.

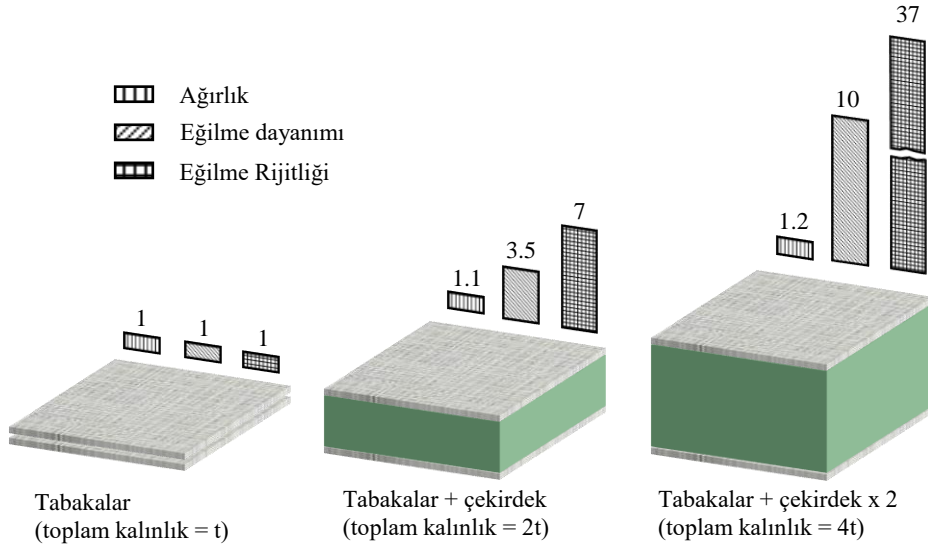
Laminat tekne ve yat güvertelerinde kalınlık artışı sağlamak amacıyla polyester dokumasız dolgulara başvurulmaktadır (Associates, 1999; Pemberton vd., 2018).



Şekil 1.14: Denizel kompozit malzemelerde çekirdek kullanımı (%) (Associates, 1999).

1.7 Ahşap Kompozitler

Ahşap esaslı kompozitler, nispeten kalın bir çekirdeğe bağlı iki ince kaplamadan oluşan katmanlı elemanlar olan sandviç panel ailesine aittir. Bu ürünlerin en önemli avantajlarından biri aşırı ağırlık eklemekten eğilme rijitliğinin artırılmasıdır. Aslında, çekirdek bir I-profil benzeri gibi çalışır: yük taşıyan flanşlar arasında hafif bir “iskelet” sağlar. Bu yapısal elemanda flanşlar ana çekme ve basma yüklerini taşır ve çekirdek, yalnızca kayma yüklerine dayanması gerektiğinden nispeten hafif olabilir.



Şekil 1.15: Sandviç yapı etkisi

Şekil 1.15'te, aynı kaplama malzemesine sahip çekirdeksiz bir panel ile karşılaştırıldığında genel bir kompozit malzemenin etkinliğini göstermektedir. Temel olarak, köpük veya bal peteği çekirdek ile yapılan tüm sandviçler, hafifliği ile birlikte olağanüstü rijitlik ve dayanıklılık sunar. Laminat yapılarla kıyasla sandviç kompozitlerin en önemli avantajı çekirdek yapının eklenmesi ile ağırlıkta önemli bir artışa neden olmadan dayanım ve rijitlik artışı sağlanmasıdır. Çekirdek yapı olarak köpük ve balsa ağacı kullanılması durumunda balpeteğine oranla ağırlık artışının daha fazla olması beklenir.

Tabaka kalınlıkları sabit kalmak şartıyla çekirdek yapıya sahip sandviç panelin toplam kalınlığı iki ($2t$) katına çıktığında eğilme dayanımı 3.5, eğilme rijitliği 7 kat artar. Toplam kalınlığın dört ($4t$) katına çıkması durumunda ise eğilme dayanımı 10 kat eğilme rijitliği 37 kat artar.

Kompozitin tamamında yeterli bir yapışma kalitesi sağlanmalıdır. Diğer bir deyişle, iyi mekanik özellikler ve farklı elemanlar arasında etkili bir yük aktarımı elde etmek için, dış tabakaların kalın ve zayıf olan çekirdeğe iyi bir şekilde birleştirilmesi gerekir. Çekirdek malzemenin asıl rolünün, sandviçin kayma rijitliğinin çoğunu sağlamak ve aşırı ağırlık eklemekten dış tabakaları ayırıp dengelemek olduğu açıktır, ancak aynı zamanda basma gerilmelerinden dolayı lokal burkulmayı da önlemesi gerekir. PVC ve E-Cam malzemelerin darbe davranışlarında iyi performans gösterdiği malzeme özellikleri tablosunda verilmiştir (Şekil 1.16).

	Fiber			Reçine					Çekirdek					
	E-Cam	Kevlar	Karbon	Polyester	Vinilester	Epoksi	Fenolik	Termoplastik	Balsa	Çapraz Bağlı PVC	Doğrusal PVC	Nomex/Alüminyum Balpeteği	Termoplastik Balpeteği	Sentetik Köpük
Statik Çekme Mukavemeti	■	■	■	□	□	■	□	□	■	■	■	□	□	□
Statik Çekme Rijitliği	□	■	■	□	□	□	□	□	■	□	□	■	□	□
Statik Basma Mukavemeti	■	□	□	□	□	□	□	□	■	□	■	■	□	□
Statik Basma Rijitliği	□	□	■	□	□	□	□	□	■	□	□	■	□	□
Yorulma Performansı	□	■	■	□	■	■	□	■	■	□	■	□	■	□
Darbe Performansı	■	■	□	□	■	■	□	■	□	■	■	□	□	□
Su Geçirmezlik	■	□	□	□	■	■	□	■	□	■	■	□	□	□
Ateşe Karşı Dayanım	■	□	□	□	□	□	■	□	■	□	□	■	□	□
İşlenebilirlik	■	□	□	■	□	□	□	□	■	□	□	□	□	■
Fiyat	■	□	□	■	□	□	□	■	■	□	□	□	■	■
	■ İyi Performans □ Zayıf Performans													

Şekil 1.16: Sandviç yapıyı oluşturan malzeme özelliklerinin değerlendirilmesi (Associates, 1999).

Sandviç kompozit malzemeler, fiber, reçine ve çekirdek kombinasyonları ile optimizasyon fırsatı sağlar. Tablo sandviç yapıyı oluşturan malzeme özelliklerinin değerlendirilmesiyle emsallerine göre karşılaştırma imkânı vermektedir. Bu malzemelerin kombinasyonlarıyla oluşan sandviç yapı kullanılacağı yere göre gerekli olan malzeme özelliklerini arttıracak veya azaltacaktır.

1.7.1 Ahşap Kompozitlerde Çekirdek Malzeme Kullanımı

Şekil 1.17’de ticari olarak piyasada kullanılan farklı/çok katmanlı çekirdek yapılara sahip ahşap ve cam fiber dış tabakalı sandviç kompozitler bulunmaktadır.



Şekil 1.17: Ticari olarak kullanılan ahşap tabakalı sandviç kompozitler.

Ahşap tabakalı hafif kompozitler, kalın, yumuşak çekirdek yapıya bağlı iki ince ve sert tabakadan oluşur. Mantar, kauçuk, kauçuk-mantar ve PVC köpük çekirdek malzemeleri ahşap esaslı malzemelerle birlikte kullanılır. Ahşap malzemeler göreceli olarak kırılındır ve darbelere karşı dayanıklılığı düşüktür. Örneğin, balsa ahşap çekirdek malzemesi statik yüklemeye altında iyi performans gösterirken, lif boyunca düşük kırılma tokluğu nedeniyle darbe yükü altında hasara uğrarlar.

Balsanın çekirdek malzeme olarak kullanımı:

En iyi bilinen ve en eski yapısal çekirdek malzemelerden biri, ortalama yoğunluğu yaklaşık 150 kg/m^3 olan en hafif ahşap balsa'dır. Aslında, balsanın sıkıştırma ve kopma mukavemeti genellikle PVC köpüklerden ve diğer çekirdek malzemelerden daha yüksektir, ancak darbe ve enerji emme kapasiteleri çok düşüktür. Ayrıca, balsa, kompozitin yapıştırma hattına paralel olarak meydana gelen delaminasyonla darbe altında kolayca ayrılır.



Şekil 1.18: Balsa çekirdek malzemeye sahip ahşap dış tabakalı sandviç yapı.

Günümüzde genellikle 3 ila 50 mm kalınlığındaki balsa çekirdeğe sahip tabakalar, yüksek basma özelliklerinin gerekli olduğu, perde bölmeler (bulkheads) haricindeki hafif kısımları yapmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 1.18).

Aslında, bunlar birkaç küçük teknede faydalı olan tekne gövdelerinin (hulls) yapısal parçalarıdır; ayrıca iç mekânları ayırmak için bölümler olarak da hizmet ederler. Yük taşıma kapasiteleri nedeniyle ve dinamik bir yüke maruz kaldıklarından, genellikle nispeten sert bir konstrüksiyon ile yapılmaları ve yükü transfer etmek için gövdeye kuvvetlice bağlanmaları gerekir. Bu bağlamda, balsa çekirdek (10 ila 20 mm kalınlığında) ve okume deniz kontrplaklarının (3 ila 5 mm arası) oluşturduğu sandviç yapının 16 ila 28 mm aralığında nominal bir kalınlığa ulaştığı yapısal olmayan ahşap esaslı kompozitlerin kullanılması oldukça yaygındır.

Son olarak, FRP dış gövdeleri ve modern balıkçı teknelerinde, manyetik olmayan mayın tarama gemilerinde ve diğer askeri gemilerdeki güverte kısımları için yaygın olarak balsa ağacı çekirdek malzeme olarak kullanılmaktadır (Vallbo, 2005).

Mantar kauçuğun çekirdek malzeme olarak kullanımı:



Şekil 1.19: Mantar kauçuk çekirdek malzemeye sahip ahşap dış tabakalı sandviç yapı.

Bilinen diğer bir ahşap esaslı bir kompozit, birçok yönden balsa ahşabı ile yapılabenzer, yığma mantardan (yoğunluk 0.35 gr/cm^3) veya karıştırılmış mantar-kauçuk çekirdek ve okume kontrplak dış tabakalarından oluşan sandviç yapılardır (Şekil1.19). Bu sandviç 10mm mantar çekirdek ve 4 mm okume kontrplak tabakaları ile toplamda 18 mm kalınlık için ($6,7 \text{ kg/m}^2$) olağanüstü hafiftir. Yat motorunun termal yalıtımı ve gürültü emisyonlarını azaltmak için özellikle ısı ve ses yalıtımı gerektiren uygulamalarda (örneğin daha hafif bölmelerin birleştirilmesi) kullanılmaktadır.

Bal peteğinin çekirdek malzeme olarak kullanımı:

Diğer bir çekirdek ailesi, arı kovanlarına benzer hücresel yapısı ile adlandırılan bal peteğidir. Düşük yük uygulamaları için (kapı veya hafif bölmeler gibi) düşük mukavemete ve sertliğe sahip olan fenolik reçine emdirilmiş kâğıttan, son derece hafif alüminyum veya perde bölmeler için yüksek mukavemet ve rijitliği olan emdirilmiş aramid kâğıdına kadar birçok bal peteği çekirdek malzemesi mevcuttur.

Bir bal peteği çekirdek yoğunluğu, hücre geometrisi ve malzeme tipi ile tanımlanır. Mevcut yoğunluklar, malzeme ve hücre konfigürasyonuna bağlı olarak çok düşüktür (20 ila 100 kg/m³ arasında). Her bir bal peteği tipolojisi bünyesine bağlı olarak özel avantaj ve dezavantaj gösterir. Genel olarak kayma ve basma özellikleri, balsa veya sentetik köpük çekirdek ile karşılaştırıldığında daha düşüktür ve doğrusal PVC gibi yoğunluk artıkaçça yükselir.

Bal peteği çekirdeklerinin pek çok fayda sağlamasına rağmen, çekirdek malzemeye dış tabakaları yapıştırma zorluğundan (lokal burkulma önlemek için) ve potansiyel su emme riskinden dolayı deniz ortamlarındaki yapısal uygulamaları sınırlıdır. Ne yazık ki, yüksek performanslı bal peteği çekirdek yapısının kullanımı, özellikle aramid malzemeleriyle yüksek maliyetleri nedeniyle oldukça sınırlıdır.

Bu sektörde bal peteği üretiminde kullanılan farklı malzemeler:

Alüminyum: Makul bir maliyetle birlikte en yüksek mukavemet/ağırlık oranlarından birini gösterir. Bununla birlikte, tuzlu su ortamındaki potansiyel korozyon sorunları nedeniyle alüminyum, deniz taşıtlarında dikkatli kullanılmalıdır. Alüminyumun darbe davranışı da dikkate alınmalıdır çünkü darbe esnasında geri dönüşsüz olarak şeklini kaybeder (Şekil1.20).



Şekil 1.20: Alüminyum balpeteği çekirdek malzemeye sahip ahşap dış tabakalı sandviç yapı.

Termoplastik: Bal peteği çekirdek yapısını üretmek için kullanılan en yaygın polimerler polikarbonat, polipropilen, polietilen ve poliüretandır. Termoplastik petekler hafiftir ve kullanılan polimere bağlı olarak neme, yangına ve yorulmaya karşı direnç, darbe absorbe etme, düşük fiyat ve kolay geri dönüşüm gibi farklı özelliklere sahiptir. Başlıca dezavantajları, petek ve dış tabakalar arasında iyi bir yapışma kalitesi elde edilmesinin zor olmasıdır (Şekil1.21).



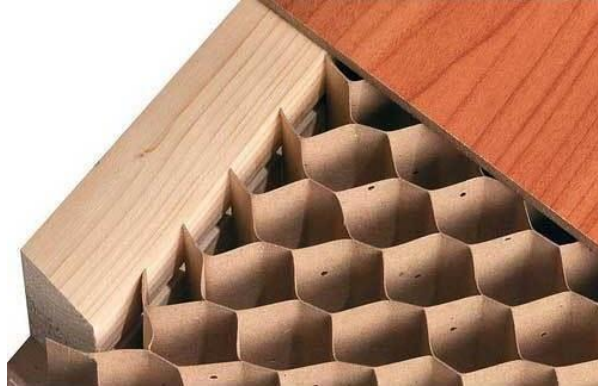
Şekil 1.21: Polipropilen balpeteği çekirdek malzemeye sahip ahşap dış tabakalı sandviç yapı.

Aramid: Bu malzeme fenolik reçine ile kaplanmış bir inert aramid fiber takviyeli bal peteği (DUPONT Nomex veya eşdeğeri) ile oluşturulmuştur. Çekirdek malzeme mükemmel esneklik, küçük hücre boyutu, düşük yoğunluk, iyi ısı yalıtımı ve olağanüstü yangın dayanımı özelliğine sahiptir (kendi kendine söner). Ahşap bazlı aramid petek kompozitlerin şekillendirilmeleri kolaydır ve kontrplaktan daha dayanıklı ve performanslı olmaları nedeniyle bölme perdesi (bulkheads) veya kalın kavisli yapılar için kullanılırlar (Şekil1.22).



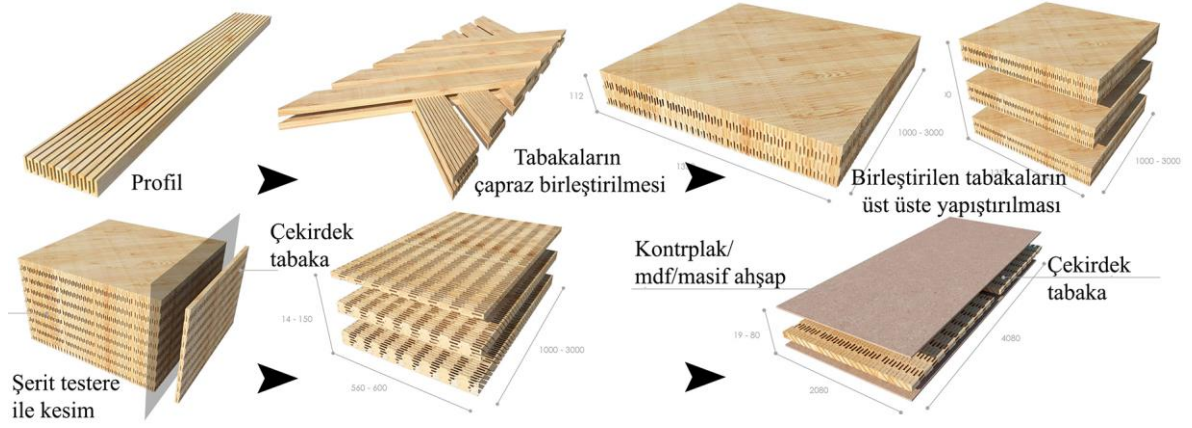
Şekil 1.22: Nomex balpeteği çekirdek malzemeye sahip ahşap dış tabakalı sandviç yapı.

Kâğıt: En bilinen ve eski bal peteği çekirdek malzemesidir (Seidl, 1956). Fenolik reçine emdirilmiş kâğıt-bal peteği çekirdek yapının iki ince dekoratif kontrplak arasına yapıştırılması, kapılar, mobilyalar ve hafif bölmeler gibi yapısal olmayan uygulamalar için güçlü, sert, hafif ve nispeten ucuz ahşap bazlı bir kompozit haline getirmektedir (Şekil1.23).



Şekil 1.23: Kâğıt balpeteği çekirdek malzemeye sahip ahşap dış tabakalı sandviç yapı.

Hafif sandviç panellerde yeni bir ürün olan DendroLight bal peteği yerine alternatif bir çözüm olarak planlanmıştır. Levhanın temel rijitliğini sağlayan ince dış tabaka malzemesi kullanım yerine göre değişmekte olup, genelde masif odun, kontrplak, ince yonga veya lif levhadan oluşmaktadır. Çekirdek malzeme olarak ladin odunu tercih edilmektedir fakat makaslama direnci yüksek olan tüm ağaç türleri kullanılabilir. Maksimum makaslama direnci, liflerin yüzeye 45° meyilli çapraz şekilde yerleştirilmiş küçük hücrelerden oluşması ile sağlanmıştır. Hücreler dik açıda birbirleriyle kesişmektedir (Şekil 1.24). Çekirdek malzemenin üretiminde bir lif levha ve yonga levha üretiminde değerlendirilebilir nitelikte yaklaşık %50 oranında testere talaşı oluşmaktadır. Çekirdek malzemedeki tutkal oranı %4'den daha düşüktür.



Şekil 1.24: Dendrolight hafif sandviç panelin üretim aşamaları.

Basit ve hızlı bir üretime sahip olması, iklim şartlarını değişiminde yüksek boyutsal kararlılığı, hammadde ve üretim maliyetlerinin düşük olması, $250-300 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğu olup masif ladinin %50-60'ı olması, ladin odunundan daha iyi ısı ve yanma dayanımına sahip olması, özel makineler, yapıştırıcılar veya birleştirme aparatları gerekmeden masif odun gibi vidalanma, çivilenme ve işlenebilme özelliği, yüksek enerji absorbe etme özelliği ve yonga levhadan 4-5 kat daha fazla eğilme direncine sahip olması avantajları arasındadır. (Korkut S., 2019).

Sentetik köpüğün çekirdek malzeme olarak kullanılması: Köpük çekirdek malzemeler çok çeşitli sentetik polimerlerden imal edilebilirler. Kompozit yapılar için yoğunlukları $50-200 \text{ kg/m}^3$ kalınlıkları 5-50 mm arasında değişir. En çok bilinen yapısal sentetik köpük çekirdek yapılardan biri PVC'dir. Askeri tekne yapımı uygulamalarında kullanımı 50'lerde başlamış, ancak 70'lerde yat tekne yapımı için tercih edilen çözümlerden biri haline gelmiştir. Deniz ahşap esaslı kompozitlerde kullanılan PVC köpüklerin yoğunlukları, istenen kullanımlara göre $30-200 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir. İki farklı PVC köpük formülasyonu yaygın olarak kullanılır: çapraz bağlı (daha sert fakat daha kırılğan) ve doğrusal (daha yumuşak).

Çapraz bağlı PVC köpükler, eşdeğer yoğunluğa sahip doğrusal PVC'den daha yüksek statik özellikler sağlayan üç boyutlu ağ moleküler yapısından oluşmuştur. Çapraz bağlı PVC çekirdek tipik olarak güverte, üst yapı, gövde (ayrıca FRP ile) ve ara bölmelerde kullanılır.

Lineer PVC'nin bağı olmayan moleküler yapısı, malzeme kırılmadan önce önemli bir uzama sağlar. Bu köpükler kavis etrafında daha esnek, daha dayanıklı ve ısıtılıp form alması daha kolaydır. Bununla birlikte, eşdeğer yoğunluğa sahip çapraz bağı köpükten biraz daha düşük mekanik özellikler ve sıcak iklimlerde yumuşama veya sürünmeye yatkın olan yüksek sıcaklıklara karşı daha düşük direnç gösterirler. Genellikle, gövde tabanları ve yanları gibi yüksek etkiye sahip alanlarda kullanılır.

Halen, ahşap esaslı kompozitlerde kullanılan en yaygın PVC çekirdek türü, çapraz bağı klorofloro karbon gazı (CFC) içermeyen PVC köpüklerdir. Okume kontrplak dış tabakalar ile PVC çekirdek içeren ticari ahşap sandviçler, 16 ila 23 mm arasında değişen kalınlıklarda mevcuttur. PVC köpüklerin yanı sıra, termoset ve termoplastik polimerlerden üretilen farklı sentetik köpük çekirdek malzemeler piyasada bulunmaktadır. Polipropilen (PP), poliüretan (PUR), polistiren (PS), stiren akrilonitril (SAN), polieterimid (PEI) ve polimetakrilimid (PMI) içeren köpüklerin ahşap esaslı sandviçlerin çekirdek malzemesi olarak kullanımları daha azdır.

Son zamanlarda, yeni ve yenilikçi yüksek performanslı ahşap esaslı kompozitler üretiliyor. Laricross, okume dış tabakalardan oluşan ve 2 boyutlu ahşap petek yapılı bir çekirdeğe sahiptir (Şekil 1.25a). Bu çekirdek, okume kaplamadan (veener) yapılmış ve çapraz bağlanmış bir dikdörtgen ağ yapısının düşük yoğunluklu polistiren veya poliüretan sert köpük (58 kg/m³) ile doldurulmasıyla oluşur. Kalınlığı 16 ila 48 mm arasında değişen ahşap bazlı kompozitler yapısal kullanıma uygundur.



Şekil 1.25: a) Ahşap petekli köpük çekirdek yapıya sahip okume dış tabakalı sandviç yapı, b) ahşap petekli köpük çekirdek yapıya sahip kauçuk mantar ara tabakalı, okume dış tabakalı, sandviç yapı.

Tam hücreli iki bileşenli çekirdek yapısı, çok hafif ağırlık (18 mm kalınlık için sadece 4.8 kg/m²) ile birlikte yüksek basma direnci ve boyutsal stabilite sunar. Şimdi daha yüksek mekanik özellikler ve daha hafif kompozitler elde etmek için yenilikçi oluklu veya yapısı çapraz bağlı (cross-linked) olan çekirdeklerin optimizasyonu ve geliştirilmesine odaklanılmıştır. Akustik yalıtım performansı için özel kauçuk mantar tabakaları eklenmiştir (Şekil 1.25b).

Metalik köpükler, çok düşük özgül ağırlık ile birlikte iyi rijitlik veya iyi enerji absorbe etme ile birlikte yüksek basma mukavemetleri gibi fiziksel ve mekanik özelliklerin farklı kombinasyonları için kabul görmektedirler (Ashby vd., 2000).

1.8 Denizel Sandviç Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Denizel sandviç kompozit malzemelerin seçilecek üretim yönteminde hız, maliyet, dayanım, yapının şekil ve büyüklüğü çok önemlidir. Tekne gövdesi gibi geniş yapılar için en yaygın teknik açık kalıplama yöntemi olmuştur. Kırpılmış fiberlerin püskürtülmesi genellikle daha küçük gövdeler ve parçalar ile sınırlıdır. Şekil 1.26'da denizcilik endüstrisindeki çeşitli üretim işlemlerinin göreceli olarak birbirleriyle karşılaştırmasını gösteren bir endüstri araştırmasının sonuçlarını mevcuttur.

1950'lerden 1990'lara kadar, eğlence tekneleri endüstrisinde kullanılan malzemeler ve üretim tekniklerindeki gelişmeler üretim maliyetlerini düşürmeye ve ürün kalitesini yükseltmeye yardımcı olmuştur. El yatırma imalat yöntemi, 1960'lı yıllardan başlayarak günümüze kadar gelen küçük ve orta büyüklükteki tekne ve yat üretimlerinde baskın olmuştur. 1970'li yıllarda sandviç yapılar, 1980'lerde ileri üretim yöntemleri geliştirilmiş ardından alternatif takviye elemanları kullanılmaya başlanmış, 1990'lı yıllarda denizcilik sektörü vakum torbalama (VB) ve reçine infüzyon yöntemleri ile tanışmıştır. Her tekne üreticisi kendilerine ait olduğunu düşündükleri özgün üretim prosedürleri kullanmasına rağmen, genel endüstri eğilimleri Şekil 1.27'de gösterildiği gibi zaman içinde izlenebilir (Associates, 1999; Neşer, 2017).

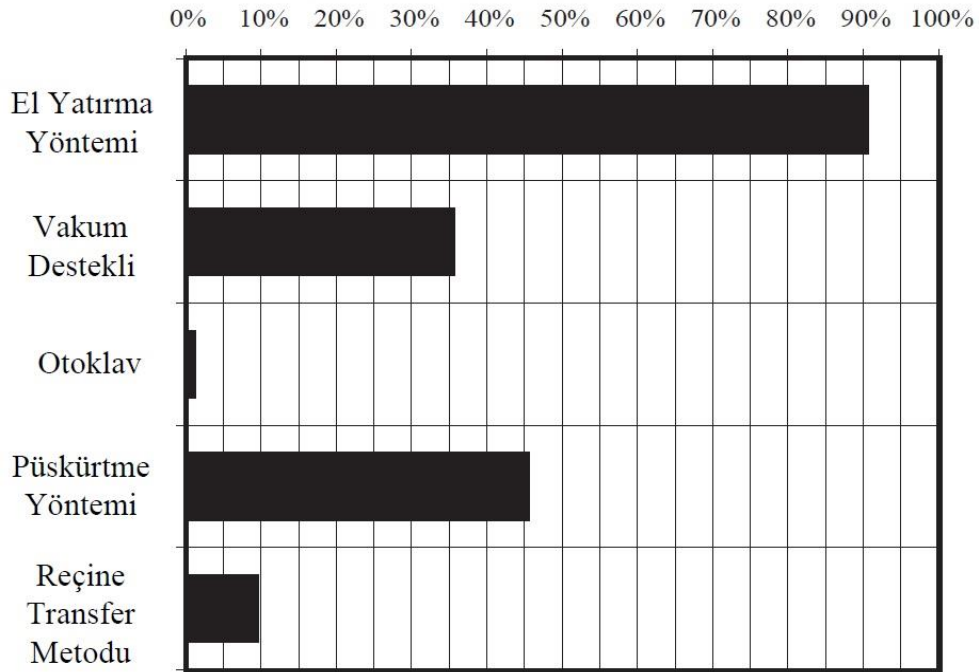
Seemann kompozit reçine infüzyon yöntemi (SCRIMP), ABD Donanması için projelerin zorlu gereksinimlerini karşılamak için Bill Seemann tarafından icat edilmiştir. TPI Technology, Inc.'in (TPI) sahip olduğu on ABD patentinin ilki 1990'da yayınlanmıştır. (Seemann III, 1990). SCRIMP, sıvı reçineyi kuru istiflenmiş tabakaya çekmek için bir

vakum kullanan ve neredeyse sıfır organik uçucu bileşenler (VOC) emisyonuna sahip çok yüksek kalitede, tekrarlanabilir kompozit parçalar yapmak için kullanılan bir kapalı kalıp reçine transfer kalıplama işlemidir.

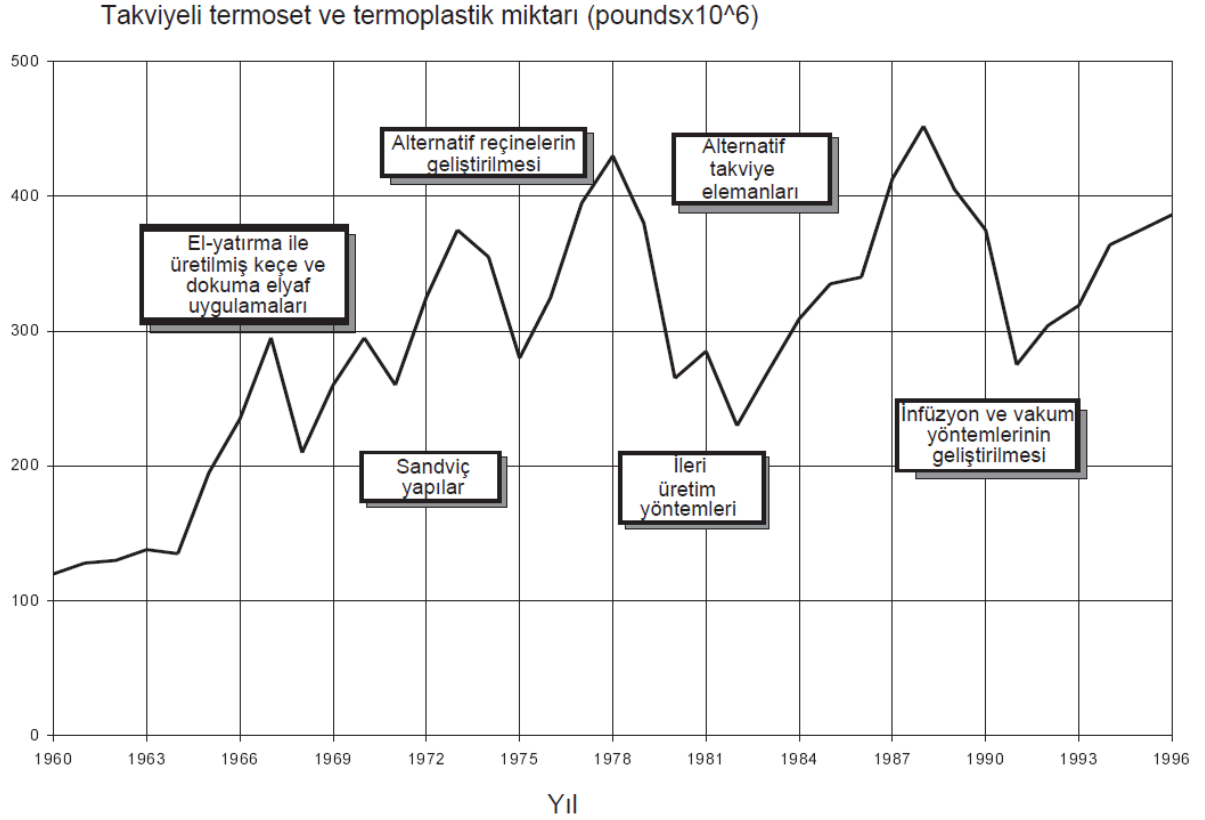
Vakum altında reçine infüzyon yöntemleri çeşitli isimler ve kısaltmalar ile tarif edilmiştir: VARTM, RIF, SCRIMP, RFI, RFIM, VAIM, VARI, VARIM, VIM, VIMP (Marsh, 2010; J Summerscales & Searle, 2005). Reçinenin vakumlanmış ortam içerisinde ilerlemesi prensibiyle çalışan bu yöntemlerde, ürünün el değmeden üretimi amaçlanmaktadır.

Vakum ortamında reçine infüzyonu mantığına dayanan en yaygın yöntemler;

- Vakum destekli reçine transfer metodu (VARTM)
- Seemann kompozit reçine infüzyon kalıplama yöntemi (SCRIMP)
- Esnek kalıp altında reçine infüzyon yöntemi (RIFT)



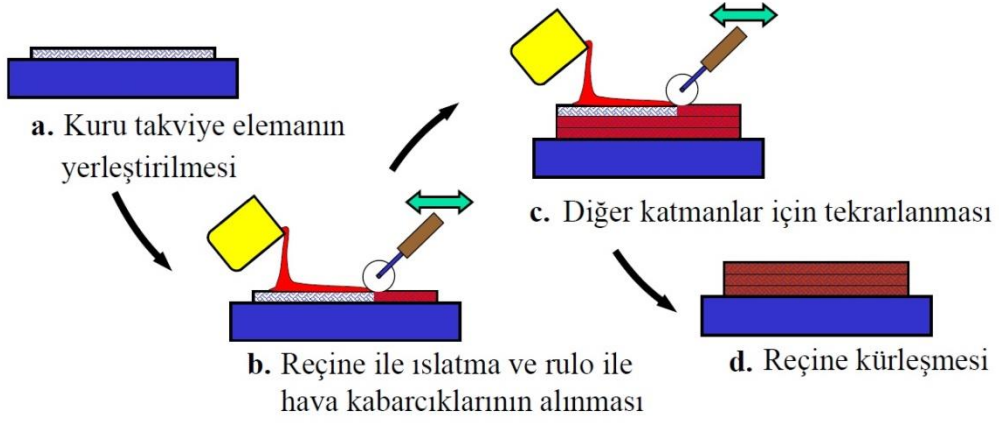
Şekil 1.26: Deniz taşıt üretiminde tercih edilen üretim yöntemleri (Associates, 1999).



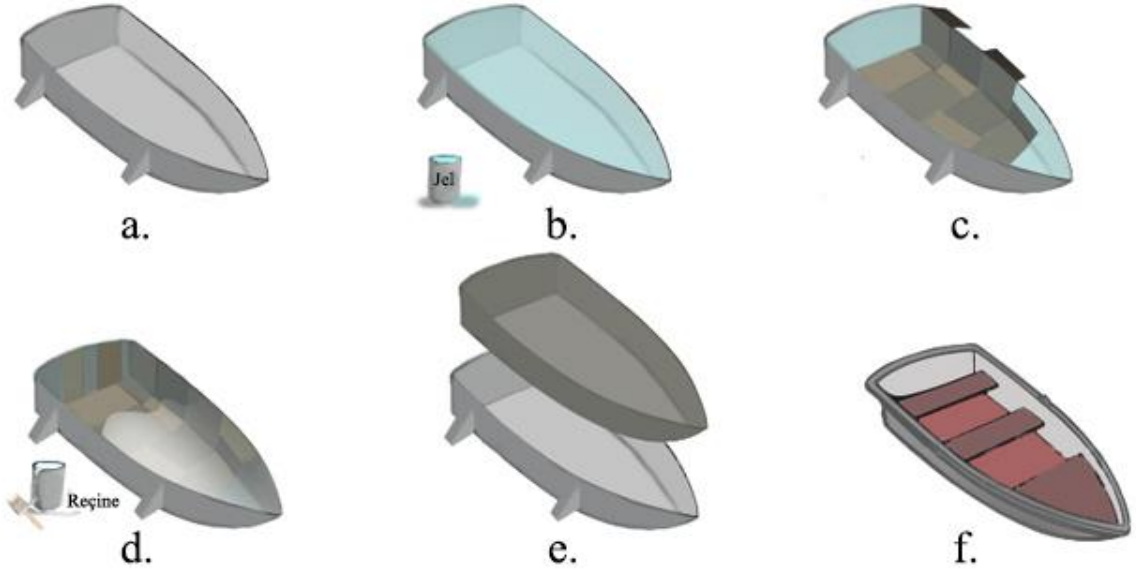
Şekil 1.27: Denizcilik endüstrisi için takviyeli termoset ve termoplastik reçinelerin kompozit üretimindeki gelişmelere bağlı yıllık taşınma miktarları (Associates, 1999).

1.8.1 El Yatırma Yöntemi (HLU)

El yatırma yöntemi kompozit teknelerin üretimi için en basit ve yaygın kullanılan imalat tekniği olmuştur. Kalıp içinde imalat yapılması teknenin dış yüzeyinin hiç bir ilave işlem gerektirmeyecek şekilde mükemmel olarak oluşmasını sağlar. El yatırma yöntemi ile monolitik (bütünsel) laminat ve sandviç kompozitler üretilmektedir. Elyaf reçine oranı %30'lara varan kompozit üretimi yapılabilir. Elyaf katları ölçü alınarak veya şablon çıkarılarak önceden kesilip numaralandırılarak hazır bekletilmelidir. Yeterli sayıda çalışan ile hızlı ve tüm işlem aşamaları önceden iyice planlanmış olarak yürütülmelidir. Bu yöntemde en uygun reçineler; polyester ve epoksidir. Polyester veya epoksi malzemenin katlar arasına iyice nüfuz edebilmesi, katların birbirine yapışması ve katlar arasında hava kabarcıkları kalmaması için disiplinli ve hızlı çalışma şarttır. Tekne üretimine ait örnek Şekil 1.28' de verilmiştir. (Calabrese vd., 2016).



Şekil 1.28: El yatırma yöntemi ile laminat üretimi.



Şekil 1.29: El yatırma yöntemi ile tekne imalatı
a) kalıp hazırlanması, b) jel kaplama uygulaması, c) cam elyaf yatırma,
d) reçine emdirme, e) kalıptan çıkarma, f) son ürün.

Sandviç kompozit üretiminde el yatırma yöntemi aşamaları: (Şekil 1.28a-d, Şekil 1.29a-f)

- Kalıp ölçüsüne göre elyaf katları kesilerek numaralandırılır.
- Kalıp silindikten ve temizlendikten sonra ve kalıp ayırıcı olarak vaks sürülür.
- Sünger ile ikinci ayırıcı polivinil alkol uygulanır.
- Fırça ile kalıba viskozitesi yüksek reçine (jel kaplama) uygulanır.
- Reçine hazırlanarak katkıları karıştırılır.

- Jel kaplama üstüne reçine uygulandıktan sonra keçe yerleştirilir ve fırça darbeleri ile keçeye reçine emdirilir.
- Rulo ile hava kabarcıkları giderilir.
- Katların kuruması beklenmeden, laminasyon planına göre istenilen kalınlığa ulaşmaya kadar bir önceki ıslak katın üzerine elyaf katmanları uygulanır.
- Çekirdek malzeme yerleştirildikten sonra üzerine reçine uygulanır.
- Elyaf katları çekirdek malzeme üzerine uygulanır ve reçine emdirilir.
- Reçineye bağlı olarak 24-48 saat arasında parça kürleşmesi (sertleşme) sağlandıktan sonra ürün kalıptan çıkarılır.

El yatırma yönteminin avantajları:

- Düşük yatırım ve üretim maliyeti gerektirdiğinden çok ekonomiktir.
- Öğrenilmesi ve uygulaması kolay bir yöntemdir.
- Yerinde kalıplama olanağı, basit kalıplarla ve pahalı olmayan temel el aletleri (rulo, sünger, fırça) ile üretim ve montaj kolaylığı vardır.
- Üretilebilecek parçanın boyutuyla ilgili teorik olarak herhangi bir kısıtlama yoktur.
- Tasarımda değişiklikler gerektiğinde kolaylıkla yapılabilir.
- Uygun süreçte ölçekli prototipten son ürüne geçiş.
- Ayda 50 ile 100 arası parça arasındaki üretim sayıları için idealdir.

El yatırma yönteminin dezavantajları:

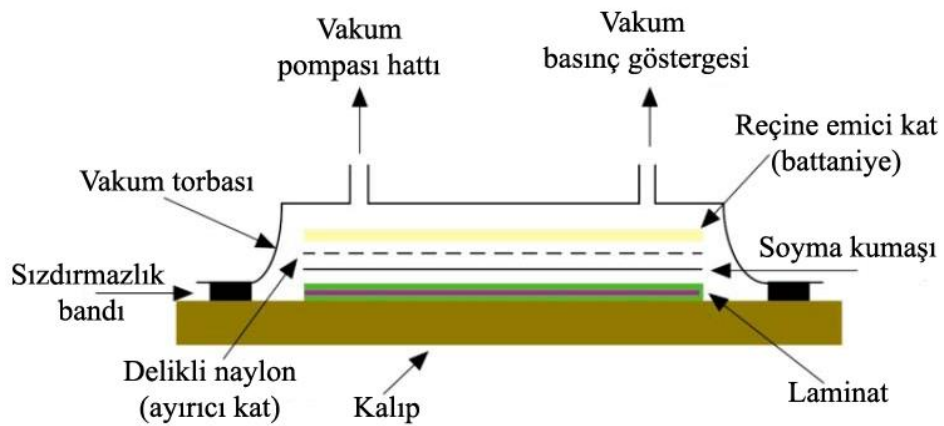
- Yüzey kalitesi tek bir tarafta iyidir.
- Üretim kalitesi çalışan işçinin el becerisine bağlıdır, işgücü açısından yoğun bir yöntemdir.
- Yüksek “Fiber Hacimsel Yoğunluğu” na ulaşmak çok zordur.
- Reçine oranı düşük tutulmak istendiğinde yüksek oranda hava boşlukları ve ıslanmayan kuru bölgeler meydana gelebilir.
- Üretim esnasında parça kalınlığının kontrolü hassas değildir.
- Fiber-reçine oranını ayarlamak zordur.
- Rulo ile hava kabarcıklarının yeterince giderilememesi.
- El yatırma yönteminde kullanılan reçinelerin yoğunluğu ve viskozitesi düşük olduğundan insan sağlığı açısından ağır moleküllü reçinelere oranla daha zararlıdır.
- Çalışanların reçinenin kürleşirken açığa çıkan kimyasallara (stiren) maruz kalması.

- Pahalı havalandırma sistemleri olmaksızın polyester ve vinil ester için havaya karışan stiren konsantrasyonunu yasal sınırlarda tutmak zordur.
- Küçük parçaların yüksek sayıda üretilmesi için uygun değildir.

Üretim kaynaklı kusur olan boşluklar, sandviç yapının yapısal davranışını bozan ana etmenlerden biridir. Reçinenin karıştırılması, üretim veya depolama esnasında reçine tarafından emilen nem boşluk oluşumuna yol açabilir. Buda yapının yorulma direncinin düşmesine ve su emilimine karşı daha hassas olmasına neden olur. Zayıf bir kompozit %5'e kadar boşluğa sahipken kaliteli bir kompozit yapı asgari, %1'den daha az boşluğa sahip olması gerekir. Tabaka ile çekirdek yapı arasındaki ara yüzeyde de boşluk ve yabancı katkılar ortaya çıkabilir. Tekne gövdesine etki eden kayma gerilmeleri etkisiyle bunun gibi üretim kusurları kolayca delaminasyon hasarına dönüşebilir (Calabrese vd., 2016; Mazumdar, 2001).

1.8.2 Vakum Torbalama Yöntemi (VB)

Vakum torbalama yöntemi düşük maliyetli ve uygulama tekniği kolay olan bir yöntemdir. Basit bir laboratuvar ortamında, elle yatırma yönteminin dezavantajlarını ortadan kaldırarak kolaylıkla daha sağlam ve hafif kompozit sandviç ve laminatların üretilmesi mümkündür. Teknelerde, yarış araçlarında ve kompozit yapıların bakım onarım işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1.30: Vakum torbalama yöntemi ile laminat üretimi.

Vakum torbalama yönteminde sandviç kompozit üretim aşamaları (Turgut, Kayran, Alemdaroğlu, & Ceylan, 2007) (Şekil 1.30):

- Kalıp yüzeyi temizlendikten sonra kalıbın çevresine sızdırmazlık bandı yapıştırılır.
- Reçine sertleştikten sonra üretilecek kompozit yapının ve vakum torbalama elamanlarının kalıba yapışmaması için kalıbın yüzeyine kalıp ayırıcı ince bir tabaka halinde iki kat uygulanır.
- Takviye katmanların yerinden kaymaması için reçine karışımından malzemenin serileceği yere fırça ile bir miktar sürülür. Sürülen bölgeye ilk katman yerleştirilir ve el yatırma yöntemine benzer olarak rulo veya fırça ile her tarafına reçine emdirilir. Laminasyon planına göre diğer katmanlar ve çekirdek malzeme sırayla yerleştirilir ve her katmanın reçine ile ıslatıldığından emin oluncaya dek fırça ile yayma ve ıslatma işlemine devam edilir.
- Soyma kumaşı, delikli naylon ve reçine emici (battaniye) katlar sırasıyla sandviç yapı üzerine dizilir. Delikli naylon fazla reçinenin katmanların arasından sızarak polyesterden yapılmış emici kata (breather) ulaşmasını, soyma kumaşı da kompozit malzemenin yüzeyini pürüzlü bırakması nedeniyle astar veya son kat boyalarının dış yüzeye iyi tutunmasını sağlar. Soyma kumaşı ayrıca ikinci bir yapıştırma işlemi olacağı zamanlarda fazladan zımpara yüzey işlemlerine gerek bırakmaz ve reçine geçirgenliğini sağlayan ayırıcı kat olarak da kullanılabilir.
- Reçine emici kat daha kalın bir tabaka olarak vakum ayak alt plakalarının yerleştirileceği bölgeye konular, böylelikle emici katta biriken fazla reçine ayakların içine girmez ve ayrıca vakum esnasında bu ayakların kompoziti ezmesi önlenir.
- Bütün kalıbı içine alacak şekilde kompozit üzerine yerleştirilen vakum torbası kalıp çevresine uygulanan hava kaçaklarını önleyen sızdırmazlık macunu ile yapıştırılır. Yapıştırma işlemi bir kenardan başlayarak kalıp çevresi dolaşılır. Vakum torbasının en son birleşme noktasında kat yapılarak içine sızdırmazlık bandı yapıştırılır.
- Vakum ayak alt plakalarının deliklerine karşılık gelen yerlere vakum torbasında yarık açılır ve plastik contalı üst vakum ayakları sıkılarak yerleştirilir. Vakum ayaklarına basınç göstergesi ve vakum pompa hortumu takılır.
- Vakum pompası çalıştırılarak hava kaçakları kontrol edilir. Kompozit yapı üzerinde vakum torbası ile basınç oluşur. Kürleşme sırasında, vakum pompası vasıtasıyla atmosferik basınçtan (1 atm) daha düşük bir negatif bir basınçla takviye elemanları

ile reçine arasındaki hava dışarı çekilir. Reçinenin sertleşme süresince hava kaçağı olsun olmasın vakum pompası çalışır durumda tutulur. Fazla reçinenin pompaya ulaşmasını önlemek için vakum hattı ile pompa arasında mutlaka bir reçine kaçış kabı bulundurulur.

- Reçine sertleştikten sonra vakum sonlandırılıp, vakum torbası ve ara katmanlar sökülür, sandviç kompozit kalıptan çıkarılır.

Vakum torbalama yönteminin avantajları:

- Karmaşık şekle sahip presle elde edilemeyen parçaların az sayıda üretimi için uygun bir yöntemdir.
- Vakumla esnasında fazla reçine polyester battaniye tarafından emilir bu sayede kompozit yapı içindeki elyaf/reçine oranı daha yüksek olur. Vakum, reçinenin tüm katmanların içine tam olarak nüfuz etmesini ve bu sayede bütün bölgelerin reçineyle ıslatılmasını sağlar.
- Islak tabakalar arasında istiflenme oluşturarak, sıkışan havanın vakum etkisiyle dışarı atılmasıyla düşük nem emilimi sağlanır. Reçinenin kürleşmesi esnasında kompozit yapı içinde hava kabarcıklarının neden olduğu boşluklar ve çatlak oluşma riski en aza indirilerek yapının mukavemeti arttırılmış olur.
- Kompozit yapı üzerine uygulanan mekanik basınç etkisiyle katmanlar arasında yapışma en iyi şekilde oluşur, katmanlar arası kesme mukavemeti artar, fiberlerin yanlış hizalanması engellenir.
- Reçinenin yapı içerisinde vakum etkisiyle daha iyi yayılması sağlanır, kuru veya fazla reçine olan bölgelerin oluşmasını engellenerek homojen reçine dağılımı sağlanır.
- El yatırma tekniğine kıyasla daha düşük hava kabarcığı (boşluk), daha düşük ağırlık, daha iyi mekanik özellikler, sabit kalınlık ve daha yüksek fiber içeriği oluşmaktadır.
- Vakum torbasıyla kapalı bir ortam oluşturulması ile sağlık açısından zararlı olabilecek stiren gibi uçucu maddelerin solunmasını ve emilimi azalır.

Vakum torbalama yönteminin dezavantajları:

- Vakumlu torbalama işlemi, aşırı doymuş bir laminat üretimi ile başlar. Uygulanan vakum basıncı daha sonra fazla reçineyi uzaklaştırır. Bu reçine miktarı uygulanan

vakum basıncının zamanlamasına bağılı olarak büyük ölçüde değişebilir ve kontrol edilmesi zor birçok farklı ve kritik değişkene bağılıdır. Ayrıca bu reçine para ve kaynak israfına yol açar.

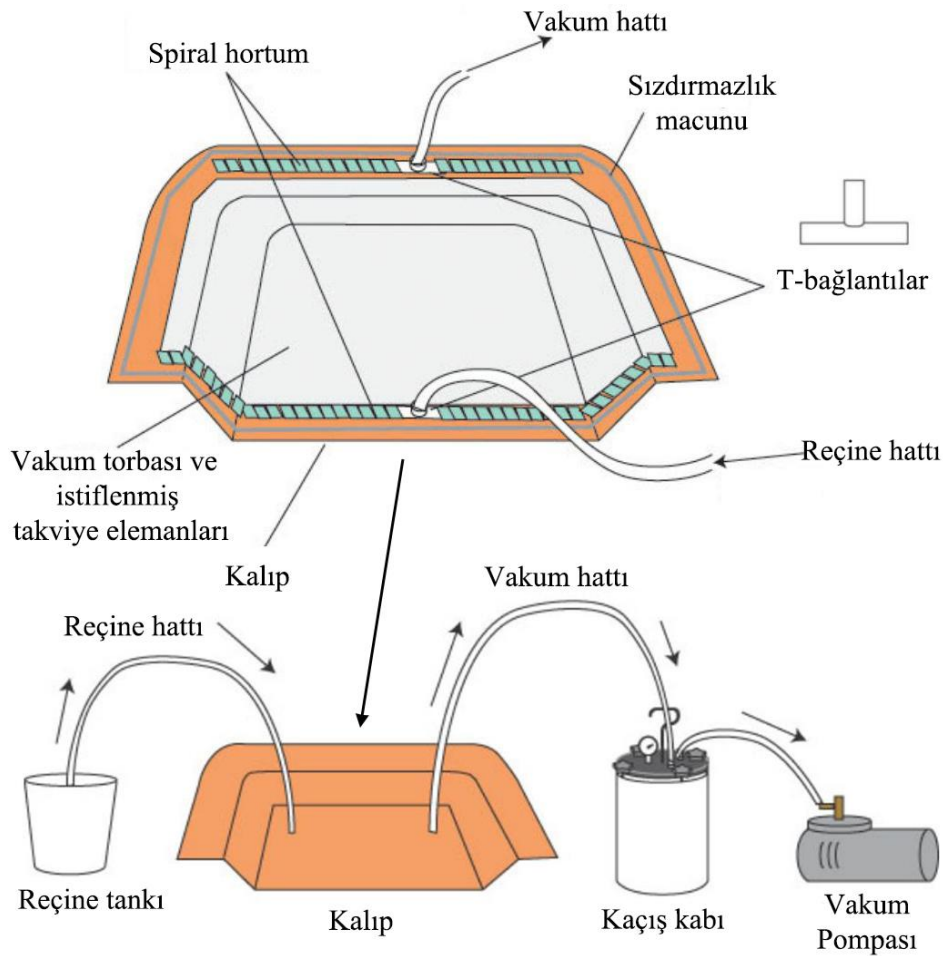
- Daha büyük projelerde, reçine poşetinin sınırlayıcı bir faktör olması nedeniyle vakum torbası işleminin birkaç kez uygulanması gerekebilir.
- Vakum contasında bir sızıntı meydana gelirse ve hemen bulunamazsa, acele ile açılan torba işlemi hata yapma olasılığını artırır.
- El yatırma, imalat işlemi sırasında takviye elemanlarına sıkışan büyük miktarda hava kabarcığı anlamına gelir. Daha sonra vakum torbası tekniğinin kullanılması, hava kabarcıklarının büyümesine ve laminatta ve yüzeyde boşluk oluşmasına neden olabilir.
- Elyaf/hacim oranı diğer işlemlerde olduğu gibi başarılı bir şekilde hesaplanamaz ve aşırı reçineli veya kuru laminatlar oluşabilir.
- Daha büyük ve daha karmaşık yapılar ayrıca ek yardımcıları, ilave iş gücü gereksinimlerini ve desteğini gerektirir.
- Tek kullanımlık vakum torbası, soyma kumaşı, reçine emici katman gibi atılan sarf malzemeler nedeniyle üretim maliyeti artar.
- Reçinenin karıştırılması, kontrolü ve vakum aşaması için tecrübeli ve kalifiye kişiler gereklidir.
- Vakum, polyester ve vinil ester reçineden fazla oranda stiren (polimerleşmeyi engelleyici bir faktör) çıkarılmasına sebep olabileceğinden, epoksi ve fenolik reçine kullanımına daha uygundur.
- Sadece kalıp tarafındaki yüzeyi pürüzsüz olur, vakum torbası tarafı daha kabadır.
- İşlemin bir kez başlatıldı mı, duraklatma veya geri adım atma seçeneği mümkün olmaz. Elyafların fırça/rulo ile ıslatma işlemlerinde, tüm malzemelerin hazır duruma getirilmesinde, reçine kürlenmesi ile sınırlı bir zaman aralığı vardır.

1.8.3 Vakum destekli reçine transfer metodu (VARTM)

VARTM metodu, reçine transfer kalıplama (RTM) ile benzerlikler sunan kapalı kalıp reçine transfer yöntemidir. RTM' de kullanılan tam kapanan iki parçalı sert kalıpların yerini, bir vakum torbasıyla üstü kapanan tek parçalı bir sert kalıp almıştır.

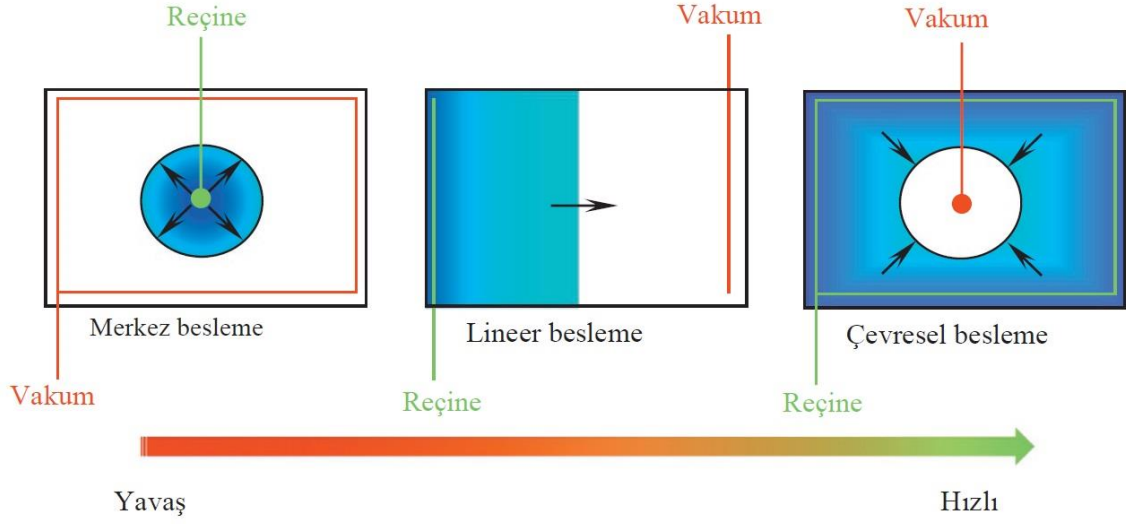
VARTM, vakum torbalama ve el yatırma tekniklerinden farklı olarak kapalı bir işlemdir ve aralarındaki temel fark el yatırma aşamasının olmamasıdır. Üretim sonrası soyma kumaşı yardımı ile atılan, dolun süresini azaltmaya yarayan “akış filesi”, kuru takviye elemanlar ve çekirdek malzeme ile kalıba yerleştirilir. Vakum ve reçine emiş hatları yerleştirilir ve vakum torbası sızdırmazlık bandı kullanarak kalıba yapıştırılır. Yeterli vakum basıncı oluştuğunda, reçine girişleri açılır ve reçine boru vasıtasıyla dış bir kaptan vakum torbasına emilir. Vakum uygulaması, kalıp içindeki havanın emilmesiyle katmanları sıkıştırır ve ayrıca reçinenin yapının içinde ilerlemesini sağlar. Elyafların tamamı ıslandıktan sonra, reçine girişi kapatılır ve sandviç yapının kurumasına izin verilir. Hem infüzyon hem de kütleme fazı ortam veya yüksek sıcaklıkta gerçekleşebilir.

VARTM yöntemi dört ana bölümden oluşur: reçine tankı, kalıp, vakum pompası, kaçış kabı ve sarf malzemeler: spiral hortum, T-bağlantılar, reçine ve vakum hatları, vakum torbası ve sızdırmazlık macunu olarak sıralanabilir (Şekil 1.31).

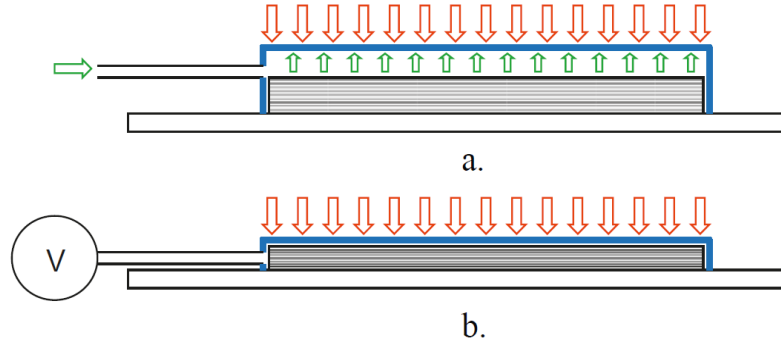


Şekil 1.31: VARTM elemanları ve üretim tesisatı (Calabrese vd., 2016).

İnfüzyon sürecini kapalı kalıp içinde reçinenin besleme hattından vakum hattına doğru ilerlemesidir. Reçine hattının kalıp içerisindeki durumuna göre merkez, lineer ve çevresel besleme olarak üç farklı vakum infüzyon yaklaşımı vardır. Nadir olan merkez besleme en yavaşı ve avantajı yoktur. Doğrusal ve çevresel beslemeler yaygındır ve her birinin artıları ve eksileri vardır. Vakum ve besleme hatlarının farklı düzenlemesi ise dolma zamanını etkilemektedir (Şekil 1.32).



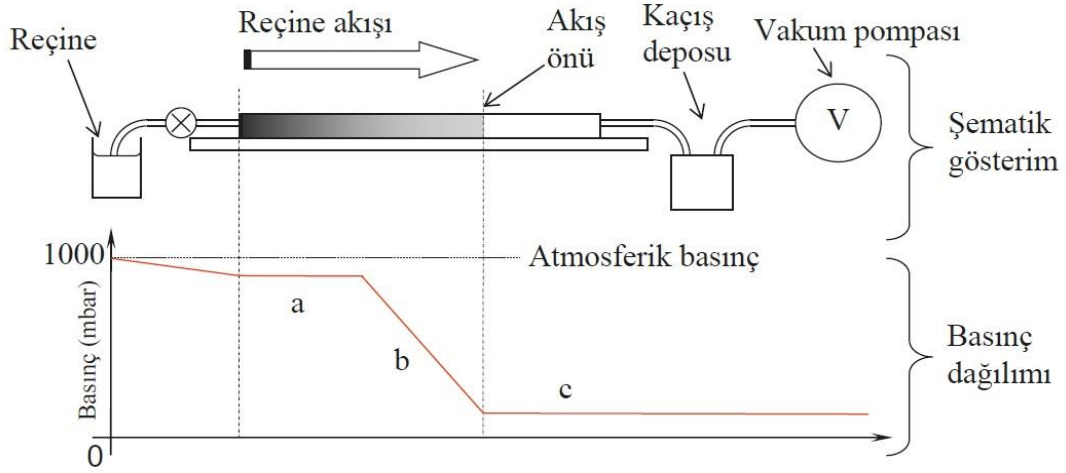
Şekil 1.32: VARTM reçine besleme yaklaşımları ve dolma zamanları (Pemberton vd., 2018).



Şekil 1.33: Birleştirme basıncının etkisi (Pemberton vd., 2018).

Şekil 1.33 (a) vakum uygulanmadan önce torbalanmış laminatı gösterir. Torbanın içi atmosfere açıktır ve torbanın her iki tarafındaki basınç aynıdır. Şekil 1.33 (b) vakum uygulandıktan sonra torbalanmış laminatı gösterir. Torbanın içindeki basınç, içindeki havanın alınmasıyla düşürülür ve torbanın dışındaki atmosferik basınç, birleştirme kuvveti sağlar. VARTM üretimi sırasında ürüne uygulanan 50 ile 200 mbar arasındaki mutlak basınç ile vakum basıncı toplamı atmosfer basıncına eşittir. Şekil 1.34'te infüzyon işlemi

boyunca basınç dağılımını gösterir. Açık reçine kabı (atmosferik basınç) ile vakum pompası arasındaki basınç farkı, reçineyi laminattan geçirir (Calabrese vd., 2016).



Şekil 1.34: Laminat içindeki basınç farkını gösteren reçine infüzyon işleminin şematik gösterimi a) tamamen ıslanmış takviye, b) kalınlık boyunca akış gradyanı, c) kuru takviye (Pemberton vd., 2018).

VARTM de reçine ve takviye elemanlarının seçimi:

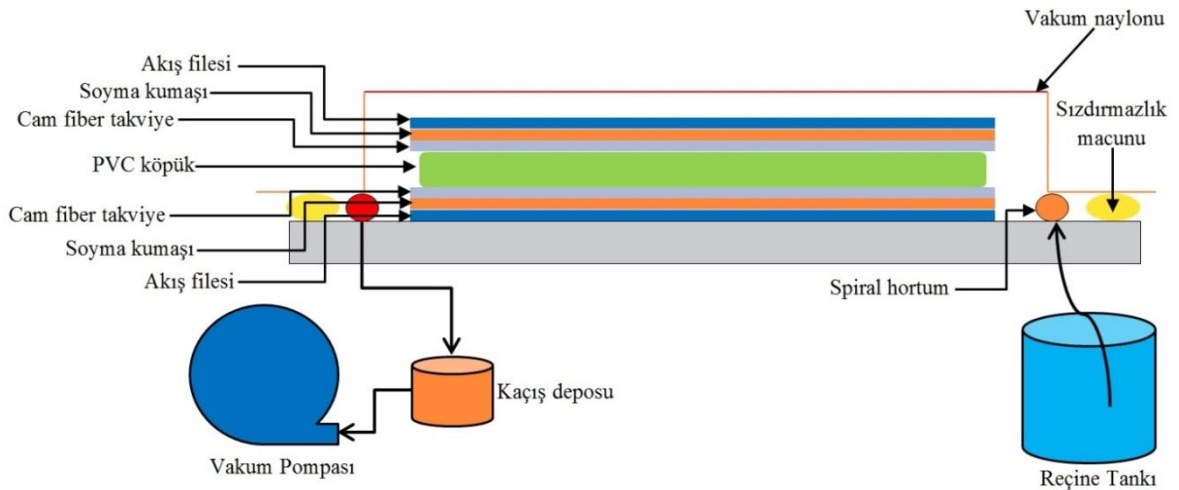
Reçine ve takviye malzeme seçenekleri VARTM metodunda önemlidir. Reçinenin viskozitesi ve kullanım ömrü ile ilgili bazı genel değerlendirmeler yapılması gerekse bile, herhangi bir reçine infüzyon için kullanılabilir. Genel anlamda, düşük viskozite, takviyeye daha kolay nüfuz etmesine izin verdiği için infüzyona yardımcı olacaktır. Daha yüksek viskoziteli reçineler vakum infüzyonunda kullanılabilir, ancak daha dikkatli planlama, daha fazla reçine hattı (daha kısa akış mesafeleri) ve daha fazla akış ortamı gerektirir. Genellikle bu durumlarda uzun kullanma süresi olan yüksek viskoziteli reçineler, yavaş infüzyon süreleri bir sorun teşkil etmediği sürece kullanılır.

Takviye seçimi, her kompozit yapı için önemli bir husustur, ancak bu malzemeler, infüzyon yöntemiyle bir sandviç yapı üretmek için kullanıldığında yapılması gereken ilave işler vardır. Tüm kumaşlara potansiyel olarak infüzyon yöntemi uygulanabilir, ancak farklı malzemeler ve dokuma stilleri reçine akış hızlarını ciddi şekilde değiştirebilir (Y. Wang & Grove, 2008). Özellikle, daha az çözgü ve atkı kesişimi bulunan dokuma kumaşlar, iplikçiklerin daha az kıvrılması nedeniyle daha iyi infüzyon olma eğilimindedirler. Genel olarak, örme kumaşlar ve rastgele elyafli keçeler, yüksek miktarda boşluk bulundurur.

Dokuma olmayan dikişli kumaşlar sıkça infüzyon için kullanılır. Reçine emiliminin en yavaş olduğu takviye elemanları dikişli kıvrımsız kumaşlardır. Dokunmamış bir keçe kullanıldığında, hem sürekli elyafı ve kırılmış elyafı keçe reçineye yüksek geçirgenlik sunar, ancak kırılmış içindeki bağlayıcı biraz reçine akışını engeller. Ayrıca, çoğu kumaş vakum basıncı altındayken %30'a kadar kalınlık düşmesine uğramaktadır. İnfüzyon üretiminden elde edilen panel rijitliği, ilave birleşme basıncının etkisiyle, sertleştirilmiş kat kalınlığını azalttığı için daha düşük olacaktır. Bu, üretim sürecini el laminasyonundan VARTM'e geçerken tasarımı tehlikeye atabilir (Calabrese vd., 2016; DIAB, 2002).

VARTM de çekirdek malzemenin seçimi:

Reçine ve takviyelerde olduğu gibi, çekirdek malzemelerin seçimi de önemlidir. Vakum infüzyonu için uygun bir çekirdek malzemenin kapalı hücre olması gerekir. Petek yapıları çekirdek malzemelerinin çoğu büyük ve açık hücreleri nedeniyle vakum infüzyon için uygun değildir. İnfüzyonda yeterli akış ve doygunluk için çekirdek malzemenin reçine geçirgenliğinin artırılması, delik, oluk ve kesikler açılması gerekir (MACK, 2008). Bu modifikasyonlar infüzyonun ayrı bir akış filesi olmadan gerçekleştirilmesine izin verir. Bu nedenlerden dolayı, birçok çekirdek üreticisi (DIAB, Airex, Baltek şirketleri vb.) infüzyona yardımcı olan reçine transfer ortamı olarak kullanılan çekirdek malzemeleri tanıtmışlardır (Reuterloev, 2003; Reuterlöv, 2002).



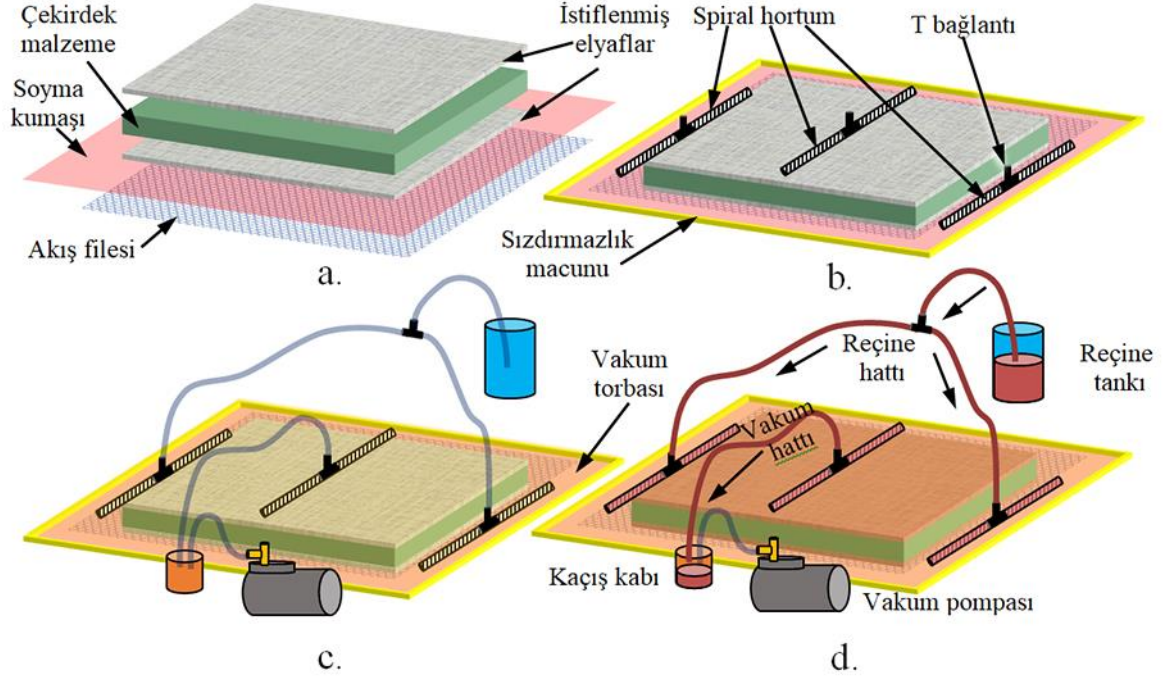
Şekil 1.35: VARTM ile sandviç kompozit malzeme üretimi.

Şekil 1.35 te VARTM tekniği ile sandviç kompozit üretimi şematik olarak verilmiş ve sonrasında üretim aşamaları detaylı anlatılmıştır.

VARTM yöntemi ile sandviç kompozit üretim aşamaları (Şekil 1.36):

- Elyaf katları önceden bir tezgâh üzerinde kalıp ölçüsüne göre pay bırakılarak kesilir ve numaralandırma yapılır, PVC köpük kesilip hazırlanır.
- Kalıp veya üretimin yapılacağı yüzey temizlenir, kurulanır ve kalıp ayırıcı vaks uygulanır.
- Elyaf ölçülerine göre fazladan pay bırakılarak kesilen akış filesinin üstüne soyma kumaşı, ardından laminasyon planına uygun şekilde elyaflar, çekirdek malzeme, elyaflar şekilde yerleştirilir (Şekil 1.36a).
- Vakum ve reçine emiş hatları için spiral hortumlar kesilir, Tee bağlantılar takılır ve çift taraflı sızdırmazlık macunu ile sabitlenir (Şekil 1.36b).
- Çift taraflı sızdırmazlık macunu üretilmek istenen sandviç kompozitin çevresine belirli bir pay bırakılarak uygulanır.
- Vakum torbası sandviç kompozit parçanın ölçülerine göre paylı ve yüksekliği de hesaba katılarak kesilir ve kat bırakılarak daha önceden uygulanan sızdırmazlık macunu ile yapıştırılır.
- Reçine emiş ve vakum hatları için polietilen hortumlar kesildikten sonra spiral hortumlardaki Tee bağlantılara takılırlar. Vakum hortumu reçine kaçış deposuna bağlanır, reçine emiş hortumunun diğer ucu katlanarak (kırık halde) kapalı tutulur (Şekil 1.36c).
- Vakum pompası çalıştırılarak kumaşların üzerindeki hava emilir vakum torbası iş parçası üzerine yapışır ve basınç uygular. Hortum bağlantılarında veya torbada kaçak olup olmadığı reçine kaçış kabı ve pompa üzerindeki manometreler karşılaştırılarak kontrol edilir.
- Reçine miktarı laminasyonun toplam metrekaresine göre hortumlarda kalacak reçinede ilave edilerek belirlenir. Hesaplanan reçinenin ağırlığına göre gerekli sertleştirici ve hızlandırıcılar eklenir ve homojen hale getirinceye kadar karıştırılır.
- Akışı başlatacak olan emiş hortumu içine hava kaçmayacak şekilde reçine kabına daldırılarak açılır. Reçinenin elyaflar üzerinde akışı izlenerek kompozit yapının tamamının ıslanması sağlanır. Tüm hacim reçine ile kaplandıktan sonra reçine emiş hattı kapatılır ve sandviç yapının kürleşmesine izin verilir (Şekil 1.36d).

- Tüm elyaflar ıslandıktan sonra vakum hortumu katlanarak sabitlenir, ardından vakum pompası kapatılır.
- Kürleşme atmosfere açık ortamda veya reçine kürleşme döngüsü dikkate alınarak fırınlama yöntemi ile yapılabilir.



Şekil 1.36: Sandviç kompozit malzemenin VARTM üretim aşamaları a) cam elyaf ve köpük çekirdek malzemelerin kalıba yerleşmesi, b) spiral hortumların çekilmesi, c) vakum torbasının yerleşmesi, reçine ve vakum hortumlarının takılması, d) VARTM işleminin yapılması.

VARTM yönteminin avantajları:

- Düşük işçilik maliyeti, daha az iş gücü ve temiz bir çalışma ortamı sağlanır.
- Yüksek mukavemetli olmayan tek taraflı bir kalıba ihtiyaç vardır.
- Elle yatırma yönteminde kullanılan kalıplar bu yöntem için modifiye edilerek kullanılabilir. El yatırma sürecine göre daha düşük atık çıkar ve malzeme tasarrufu sağlanır.
- Tasarımda boyut sınırlaması olmaksızın, ikinci bir ekleme işlemine ve yapıştırılmaya gerek olmadan çekirdek içeren büyük parçaların üretilmesine uygun bir yöntemdir. Kısa sürede üretilen tekne gövdeleri gibi geniş parçalar için en uygun tekniktir.

- Uygulayanın beceri veya yeteneğine bağlı olmayan, daha yüksek kalitede ürün üretilmesine imkân tanıyan bir üretim tekniğidir.
- Üretilen kompozit yapılar hafif olup daha yüksek spesifik mekanik dayanım ve rijit-tokluk değerine sahiptir.
- Zaman kısıtlaması yoktur, çünkü kalıba yerleştirilen elyaflar henüz kuru iken vakum uygulandığında bir problem ortaya çıkması durumunda reçine emdirme başlamadan problem çözülebilir.
- Yüksek fiber %70, reçine %30 oranının yanında %1 den az boşluk içeriği hasar başlangıcı riskini azaltır.
- Üretim esnasında homojen reçine dağılımı sağlandığından kuru bölgeler, reçinece zengin bölgelerin neden olduğu yüksek ekzotermik sıcaklıklar ve üretilen parçalarda çarpılma olmaz. Üretim kusurları azalır.
- Bu yöntemde düşük stiren buhar emisyonu oluşur; Avrupa ülkelerinde sınırları 20 ila 100 ppm değerleri arasında, ABD’de ise ortalama 35 ppm dir.
- Bu yöntem tekrarlanabilir olduğundan aynı laminat özelliklerini sağlar. Vakum basıncı ve reçine viskozitesi gibi üretim parametreleri ölçülebilir ve katman sayısı ve laminasyon planına göre ayarlanabilir.
- Reçine dolumu sırasında ve dolum sonrasında etkili parametrelerin değişimiyle elde edilen ön deneysel verileri sağlayan, reçine infüzyon düzenekleri oluşturulmuştur. Böylece üretiminin ilk aşamalarında oluşacak başarısızlık riski en aza inmektedir.

VARTM yönteminin dezavantajları:

- Çalışanların infüzyon süreci, sarf malzemeleri, tesisat hakkında eğitim almış, nitelikli, kalifiye olması gerekir. Laminasyon planlarını okuyup uygulayabilmelidir.
- Üretim parametre sayısı, işlem basamakları açık kalıplama yöntemlerine göre daha fazladır. Üretimden önce ortam ve kalıp sıcaklığı, nem değerleri, elyaf ağırlıkları, reçine, sertleştirici ve hızlandırıcı karışım oranları gibi değişkenler, infüzyon esnasında ise reçine viskozitesi ve vakum basınç seviyeleri gibi parametreler kontrol edilmelidir.
- Açık kalıplamaya göre yatırım ve üretim maliyetleri daha çoktur. Vakum pompası, kaçış kabı, tek kullanımlık vakum torbası, sızdırmazlık macunu, tesisatı için spiral ve düz hortumlar vb. birçok sarf malzemeye ihtiyaç vardır.

- VARTM yönteminde meydana gelen aksaklıklar, yüksek maliyetlere neden olabilir. Reçinenin kalıba aktarılması sonrası geri dönüş imkânsızdır, elektrik kesintisi veya sonradan ortaya çıkan hava kaçaqları nedeniyle vakum seviyesinin azalmasıyla reçine ile ıslanmamış bölgelerin kalması veya hazır olmayan reçinenin katmanlara emdirilmesi üretimin sonlandırılmasına neden olur.
- Karmaşık şekle sahip küçük parçalar için tercih edilmez.
- Üretilen yapının bir yüzünün pürüzlü olması yerine göre istenmeyen bir durum olmaktadır.
- İnfüzyon sırasında dinamik kalınlık değişimleri oluşur, doğrudan kontrolü yoktur.
- Endüstriyel uygulamada, deneme yanılma yaklaşımı genellikle infüzyon işlemi sırasında enjeksiyon yerlerinin ve stratejilerinin tanımlanması için uygulanır, bu da yüksek bir hata riski oluşturur.
- Endüstrideki pratik deneme yanılma yöntemleri ile infüzyon sürecine ait reçine giriş ve vakum yerlerinin belirlenmesi çok riskli hatalara yol açabilmektedir. Bu yüzden, PAM-RTM, LIMS, PolyWorx ve myRTM ticari sonlu elemanlar programları ile üretim optimizasyon analizleri yapılması gerekmektedir.

Son yıllarda, yat ve tekne üreticilerinin önemli bir bölümü, ürün kalitesini artırmak, üretim sürecini hızlandırmak için sağlık ve güvenlik mevzuatları daha sıkı olan reçine infüzyon üretim tekniklerini benimsemiştir. Tüm işaretler, bu eğilimin hız kazanacağı ve açık kalıp tekniklerini kullanarak sandviç yapı bileşenlerinin üretilmesinin çok nadir bir görüş haline geldiği yönündedir. Yat imalatı yapılan tersanelerin sandviç kompozit üretiminde VARTM tercih edildiği görülmüştür (Calabrese vd., 2016; Graham-Jones & Summerscales, 2015; Pemberton vd., 2018; J Summerscales & Searle, 2005).

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Matos ve Simplicio (2006), çalışmalarında otomobil iç kısımlarında PVC malzeme yerine geçebilecek bir malzeme araştırmışlardır. Hedef olarak iyi ısı yalıtımı, az termal genleşme, imalat ve imha esnasında çevreye az zarar verilmesi kısıt olarak ta hafiflik, kullanım direnci, estetik, kolay temizlenebilme, düşük maliyet belirlemiştirler. Bu hedef ve kısıtlara uygun geri dönüşümü ve tekrar kullanılması iyi olan mantar ve ahşap malzemeyi seçmişlerdir. Kimyasal olarak mantar ve ahşap aynı fakat farklı oranlarda ana temel bileşenlere sahiptirler. Mantarda ahşapta olmayan suberin fazla iken, ahşapta ise mantarda az miktarda bulunan selüloz fazladır. Mantara sızdırmazlık ve hafiflik sağlayan suberin çoğunlukla düşük ağırlıktaki yağlı organik asitlerden oluşur. Ahşaba daha yüksek yoğunluk ve neme bağlılık kazandıran selüloz, yüksek moleküler ağırlıklı doğrusal polimerik zincirlerden oluşur. Diğer organik bileşenler, özellikle lignin, malzemelere esneklik ve sıkıştırılabilirlik kazandıran bağlayıcı bileşikler olarak işlev görür. Yapısal olarak, her iki malzeme de hücreli yapıya sahiptir; bu da hafif olmalarını, ses, ısı yalıtımı ve mekanik titreşim özelliklerinin iyi olmasını sağlar. **Özellikle ısı işlem görmüş ahşaplar geleceğin malzemesi olarak düşünülmektedir.**

Negro, Cremonini, Zanuttini, Properzi, ve Pichelin (2011), çalışmalarında deniz taşıtlarında kullanılmak üzere ahşap esaslı, tamamen geri dönüştürülebilir, 205 kg/m³ yoğunluğa sahip, okume balpeteği çekirdek ve okume kontrplak dış tabakalara sahip sandviç panel yapı kullanmışlar, eğilme dayanımı, elastikiyet modülü, kayma dayanımı gibi fiziksel ve mekanik özelliklerini test etmişler ve tekne yapım gereksinimlerinin karşılanması için yapısal olarak uygun olduğu sonucuna varmışlardır. Piyasada bulunan ve şu anda fiziksel-mekanik özellikleri için kullanılan, başka bir ahşap esaslı hafif kompozit ile aynı oranda performansı olduğu ortaya çıkmıştır.

Cremonini vd. (2008), çalışmalarında tekne inşaatında kullanılan ahşap esaslı kompozit yapıları incelemişlerdir. Son yıllarda, ulusal tekne yapım endüstrisinin hızla gelişmesiyle birlikte, bu malzemelerle ilgili araştırmalar ağırlık hafifletmeye ve mekanik, ses geçirmezlik ve yangına dayanıklılık özelliklerinin iyileştirilmesine odaklanmıştır. Sonuç olarak piyasada sandviç yapılarda, sentetik bal peteği (aramid, polipropilen vb.), yumuşak veya sert kauçuk tabakalar, mantar-kauçuk tabakalar çekirdek yapı olarak, okume kontrplak yapılar ise dış tabaka olarak kullanılmaktadır. Yapı malzemelerine gelince, asıl

amaç, yüksek mekanik özelliklerden ödün vermeden teknenin toplam ağırlığını azaltmaktır. Hafif, ahşap esaslı kompozitler, İtalyan tekne yapım sektöründe, yarı yapısal ve yapısal olmayan uygulamalarda kullanılmaktadır. Yapısal uygulamalar alanında, yüksek performanslı çekirdek içeren ahşap esaslı kompozitlerin kullanılması maliyetleri nedeniyle hala sınırlıdır. Geri dönüşümlü malzemelerin hala genel tekne yapısının düşük bir yüzdesini oluşturduğu denizcilik sektöründe de çevre sorunları gelecek yıllarda muhtemelen daha da önem kazanacaktır. **Bu noktaya gelince, yapılarda ahşap esaslı kompozitlerin kullanılması bir avantaj haline gelebilir.**

Hazizan ve Cantwell (2002), çalışmalarında dış tabakalar, fenolik reçine içeren dokuma cam elyaf tan oluşan farklı yoğunluklardaki doğrusal PVC, polieterimid (PEI) ve PVC/PUR köpükleri 11 çeşit sandviç yapıda kullanmış, düşük hızlı darbe tepkisi incelemiştir. Köpük yoğunluğundaki artış, verilen enerji için ölçülen darbe kuvvetinde artışa neden olmuştur. Sandviç yapılarda düşük hızlı darbe testi, bu sistemlerin dinamik tepkisinin köpük çekirdek malzemesinin elastik özelliklerine bağlı olduğunu göstermiştir. Köpüğün kayma modülünün artmasıyla, verilen darbe enerjisi için, maksimum darbe kuvveti artma eğilimindedir.

Anderson ve Madenci (2000), çalışmalarında grafit/epoksi dış tabakaları ve köpük veya bal peteği çekirdeğe sahip çeşitli sandviç plakalarda gözlenen hasarın tipini ve boyutunu karakterize etmek için darbe testleri yapmışlardır. Her ne kadar yüksek yoğunluklu köpük çekirdek ve kalın dış tabaka hasar oluşturmak için gereken enerji miktarını arttırsa da, darbe sonrası benzer ölçüdeki izler için hasar aynı kalmıştır. Aynı darbe enerjisi için köpük çekirdek yapıya sahip sandviç yapılarda kritik hasar için darbe sonrası iz 0.13 mm, balpeteği çekirdeğe sahip sandviç yapılarda 0.25 mm olmuştur. Hem bal peteği hem de köpük çekirdeğe sahip numuneler, darbe bölgesinin merkezinden numunenin kenarına kadar çatlama (veya yırtılma) yaşamışlardır.

J. Wang, Waas, ve Wang (2013), çalışmalarında 12.5 mm, 25 mm iki farklı kalınlıktaki poliüretan (PUR) köpük çekirdeğe sahip, 1 mm, 2 mm kalınlığa sahip düz dokuma karbon kumaş lamine dış levhalar içeren panellere 7.5J, 15J, 30J enerji seviyelerinde 15mm, 25mm, 35mm çaplarındaki yarı-küresel çelik impaktörler ile düşük hızda darbe testleri yapmışlardır. Test edilen numunelerin hasar durumunu belirlemek için dijital görüntü korelasyonu (DIC), kesit ve optik yöntemler kullanılmışlardır. İmpaktör boyutu, darbe

enerjisi, dış tabaka kalınlığı ve çekirdek kalınlığının darbe tepkisi ve bunun sonucunda ortaya çıkan hasar durumları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Tepe yükü, absorbe edilen enerji/darbe enerji oranı ve darbe süresi gibi parametreler, darbe enerjisi ile artmıştır; Daha kalın dış levha kullanımında tepe yükü artarken, emilen enerji / darbe enerji oranı ve temas süresi azalmıştır. Hem düzlemsel hasar çapı hem de darbe derinliği darbe enerjisi ile artarken, dış levhanın kalın kullanılması ile azalmıştır. Darbe tepkisinin ve hasar durumunun köpük çekirdek kalınlığından bağımsız olduğu ortaya çıkmıştır. En şiddetli hasar için, ilk önce temas kuvveti sabit bir değere yaklaşırken köpük çekirdek ezilmiş, daha sonra temas kuvveti kademeli olarak artmış ve dış tabakada kademeli elyaf kırılmalarına ve matris ezilmesine sebep olmuştur. İmpaktörün çevresi boyunca dış tabakadaki hasara karşılık gelen ani bir yük düşüşü meydana gelmiştir. Bundan sonra dış tabakadaki hasarlı kısım çekirdek malzemeye dalmış ve yük kalkmadan önce impaktör altında geniş bir köpük alanının ezmesine neden olmuştur.

Atas ve Potoğlu (2016), çalışmalarında, vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile ürettikleri, + 45/-45 istiflenmiş, 780 gr/m², E-cam iki eksenli dikişli kıvrımsız kumaş ve epoksi reçineden oluşan PVC ve PET köpük çekirdekli farklı kalınlıklarda üst ve alt tabakalara sahip 100 mm x 100 mm boyutlarındaki sandviç yapıların farklı enerji seviyelerinde (5J-50J) düşük hızda darbe testlerini yapmışlardır. Farklı yoğunluk, çekme ve basma mukavemeti ve elastik modülü değerlerine rağmen, perforasyon eşiği açısından iki farklı köpük çekirdeğe sahip kompozit arasında çarpıcı bir fark olmadığını belirtmişlerdir. Her iki köpüğün kayma mukavemeti, kayma modülü ve kırılma esnasındaki kayma uzaması gibi yakın kayma malzeme özellikleri nedeniyle bu sonuca varmışlardır. Sabit bir köpük çekirdek kalınlığı için, dış tabakaları oluşturan katman sayılarının artması (yani kalınlığın artışı) ile perforasyon eşiği doğrusal bir biçimde artmaktadır. Temas kuvveti-deplasman eğrilerinde, impaktörün ön ve arka cam/epoksi dış tabakalar ile temas etmesini ifade eden iki tepe noktası olmuştur. Tam perforasyonun başlangıcında, ikinci tepe temas yükü değerinin ilkinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Nedeninin arka tabakanın reaksiyonunun yanı sıra, köpük çekirdeğin yoğunlaşmasından kaynaklandığını düşünmüşlerdir.

Mamalis, Spentzas, Pantelelis, Manolakos, ve Ioannidis (2008), çalışmalarında metalik ve polimerik malzemelerin avantajlarının çoğunu birleştirirken, dezavantajlarından bazılarını önleyerek yeni bir hibrit sandviç yapısı geliştirmişlerdir. Bu yeni konsept için dış

tabakadaki rijitliği en üst seviyeye çıkarmak için metal plakalar kullanılmıştır ve tüm yapının bir arada durması için hafif çekirdeğe yapıştırmışlardır. Ayrıca, kompozit veya ahşap tabakaları, darbe direncini arttırmak için ara tabaka olarak kullanmışlardır. Bu ara tabakaların çekirdek malzemesinden daha rijit, yeterince hafif, tercihen dış tabakalardan daha kalın olmalıdır ki böylelikle daha ince dış tabakalar (metaller), biraz daha ağır olmasına rağmen daha ucuz çekirdek köpükler (XPS,PUR) kullanılabilir. Ara tabaka olarak seçilen ahşabın yaygın bir malzeme olmasıyla maliyeti düşürmesi, bahsedilen malzemelerle güzel yapışma kabiliyetinin olması da avantaj yaratmıştır. Kontrplak ara katman, kompozit (cam elyaf/epoksi) ara katmandan çok daha kalın olduğu ve düşük elastikiyet modülü nedeniyle düşük enerji darbeleri yüklere karşı daha iyi bir davranış sağlamıştır. Çekirdek yapının kontrplak ara katman ile güçlendirilmesi maksimum gerilmeyi azaltarak, sandviç panelin tekrarlı yorulmaya daha dayanıklı hale getirilmesini sağlamıştır. Alüminyum dış tabakalı, kontrplak ara katmanlı, çekirdek olarak EPS köpüğün kullanıldığı sandviç yapı ağırlık ve maliyet açısından en iyi özellikleri göstermiştir.

Suvorov ve Dvorak (2005), çalışmalarında dış tabaka ile köpük çekirdek arasına yerleştirilmiş sünek katmanlar kullanılmasını içeren sandviç plakalarda bir tasarım modifikasyonu önermişlerdir. İki farklı ara tabaka malzemesi, rijit ve sıkıştırılmaz poliüretan (PUR) ve esnek ve sıkıştırılabilir bir elastomerik köpük (EF) aynı dış tabakalar ve çekirdek malzemeleri ile kullanmışlardır. Düşük hızda darbe altında, ara katman, elastik deformasyonla dış katmanın sehimini karşılamaktadır. Aynı zamanda ara katman, köpük üzerindeki kalıcı basının derecesini ve köpük ara yüzeyindeki artık gerilme değeri azaltarak köpük çekirdek yapıyı korumaktadır. Sabit kalınlıktaki üç farklı sandviç plakayı, plakanın destek aralığına eşit bir şekilde uygulanan yük altında ve düşük hızda darbe etkisinde iki ayrı düz ve silindirik rijit indentörün (batıcı uç) verdiği kuvvetlerin altında analiz etmişlerdir. Sonuçlar, PUR ara katmanın, dış tabakanın hem genel hem de lokal sehimini ve ayrıca köpük çekirdek lokal sıkıştırılmasını ve yükün kaldırılmasından sonra kalan artık gerilmeleri azalttığını göstermiştir. EF ara katmanı, hem genel hem de lokal sehimini büyütürken köpük çekirdek sıkışmasına karşı çok daha iyi bir koruma sunmuştur. Her iki ara katman, köpük çekirdeğin sıkışmasından dolayı meydana gelen artık gerilmelerden kaynaklanan ara yüzey çatlaklarının gerinim enerjisi salınım oranlarını büyük ölçüde azaltmıştır. Köpük çekirdeği, darbe alan dış tabakadan ayırmakla, ara tabakalar sehimin çoğunu emmiş ve böylece köpük çekirdeğin lokal ezilme derecesini azaltmıştır.

Dvorak ve Suvorov (2006), çalışmalarında dış plaka ile köpük çekirdek arasına koyulan, dış plakanın sehimini karşılayan ve böylece köpük çekirdeğin zarar görmesini önleyen veya azaltan, ince, sünek ara tabakaların koruyucu etkisini incelemiştir. Ara tabaka olarak PUR veya EF, dış tabakaları grafit/epoksi, çekirdek yapı olarak PVC tercih etmişlerdir. Yükleme, rijit bir silindirik indentör üzerine etki eden tekil bir kuvvet ile uygulanmıştır. Sonuçlar, PUR ara katmanın, darbe almış dış tabakayı köpük çekirdek veya EF ara katmanından daha iyi desteklediğini göstermiştir. Rijit ara tabakaların eklenmesi, plakanın eğilme rijitliğine de arttırmıştır ve böylece toplam sehim azaltılmıştır. Ara tabakalar sandviç plakaların düşük hızlı darbe hasar direncinin iyileşmesini sağlamıştır. Köpük çekirdek malzemesinden daha rijit olan sünek ara tabakalar, rijit indentörün oluşturduğu hasara karşı iyi bir koruma sağlamıştır. Ara katman köpük çekirdeği lokal ezilmeden korumuştur. Sıkıştırılabilir ve esnek bir ara tabaka elastomerik bir köpük kullanmak, plastik deformasyonu (ezilmeyi) azaltarak köpük çekirdeğin daha da iyi korunmasını sağlamıştır. Bununla birlikte, dış tabakaya daha az destek vermiş ve böylece dış tabakanın rijit indentör altında lokal sehimini büyümüşür.

Sabah, Kueh, ve Al-Fasih (2017) ve Sabah, Kueh, ve Al-Fasih (2018) çalışmalarında ağaçkakanın indentör tasarımına dayanan yeni biyo-ilhamlı petek çekirdekli sandviç kirişin tekrarlı düşük hızlı darbe davranışını incelemiştir. Karbon fiber takviyeli plastik üst ve alt tabakalar, kauçuk ve alüminyum petek içeren çift çekirdekli yapı olmak üzere yeni tasarım dört ana katmandan oluşmuştur. Darbe testleri, üç enerji 7.28 J, 9.74 J ve 12.63 J seviyesi için yarı küresel çelik impaktör ile tekrarlı bir şekilde sayısal ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Tüm durumlarda, biyo-ilhamlı sandviç yapı alt tabakasındaki gerilmeler az olmuş, geleneksel bal petekli sandviç kirişine göre daha fazla sayıda darbeye dayanmış ve önemli ölçüde daha düşük hasar alanı meydana gelmiştir. Kauçuk çekirdek, biyo-ilhamlı sandviç yapı alt tabakasından daha az gerilme oluşmasına izin vererek darbe sırasındaki gerilmenin yayılmasını en aza indirmiştir. Sonuçlar, biyo-ilhamlı sandviç yapının darbe hasarı direncinin geleneksel olandan üstün olduğunu göstermiştir.

Jedari Salami, Sadighi, Shakeri, ve Moeinfar (2013), çalışmalarında sandviç panel içine eklenen fazladan bir katmanın üst ve alt kısmına yerleştirilen iki farklı çekirdek tipinin düşük hızlı darbe yükleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Bu araştırmada, üst ve alt çekirdek tabakaları ayırmak için iç tabaka adı verilen ilave bir

tabaka eklenerek çok katmanlı bir sandviç yapı oluşturulmuştur. Sandviç yapının dış tabakaları ve iç lamine tabakası polimer kompozit (E-cam/epoksi) olup, çekirdek iki tip sıkıştırılabilir köpük içermektedir. Üst ve alt çekirdek için genleştirilmiş polipropilen (EPP) ve poliüretan rijit (PUR) dan oluşan çok katmanlı sandviç panelleri, çekiç düşme test makinesine sabitleyerek düşük hızda darbe testlerini yapmışlardır. Çok katmanlı sandviç panelin üst/alt çekirdek malzemesi olarak iki farklı köpük kullanmanın ve iç kompozit tabakanın sandviç kalınlığı boyunca farklı konumlarda bulunmasının, üst çekirdeğin lokal yer değiştirmesine, temas kuvvetine ve sandviç panelin sehimi değerlerine etkilerini incelemiştir. Sıkıştırma rijitliği PUR dan daha fazla olan EPP köpüğün alt veya üst çekirdek olarak kullanılması fark etmeksizin çekirdek yapıdaki oranının artırılması, sandviç kompozitin bütün rijitliğini artırmış, temas kuvveti tepe noktasını yükseltmiş, çekirdeğin lokal yer değiştirmesini azaltmıştır. Ayrıca, iç lamine tabaka üst dış tabakaya daha yakın yerleştirildiğinde, sırasıyla tepe temas kuvvetinin artmasında ve azalmasında ve çekirdeğin lokal yer değiştirmesinde az bir etkiye neden olduğu sonucuna varmışlardır. Çekirdek yapıda EPP kullanılması, üst dış plakasının yer değiştirmesinin önemli bir kısmını alt dış plakasına aktarır. PUR'un alt veya üst çekirdek olarak kullanılması fark etmeksizin, çekirdek yapıdaki kalınlığa katkısının artırılması yapının sehimini azaltmıştır. Çekirdek malzeme tipi, sandviç panelin davranışını geliştirmede, ekstra katmanın farklı konumlarına kıyasla daha önemli rol oynamıştır.

Jiang ve Shu (2005), çalışmalarında iç tabaka adı verilen ve çekirdeğin arasına yerleştirilen ek bir tabaka ile iki katmanlı bir sandviç panel oluşturmuşlardır. Polimer matrisli kompozit lamine dış levhalar ve düşük hız darbesine maruz kalan ince bir iç tabaka içeren iki katlı paneller incelemiştir. Ticari LSDYNA3D yazılımını, dinamik problemi modellemek ve analiz etmek için kullanmışlar ve farklı konumlara yerleştirilen iç tabakanın etkisiyle farklı darbe enerjisi seviyelerinde darbe noktası altında petek yapılı çekirdeğin lokal olarak yer değiştirmesine odaklanmışlardır. İç tabakanın, darbe enerjisini lokal bir alanına yoğunlaştırmak yerine, darbe enerjisini tüm panellere yaymakta olduğunu görmüşlerdir. Analiz edilen sonuçlarla, iç tabaka ile darbe alan dış tabaka arasındaki boşluğun azaltılması yoluyla çekirdeğin darbe doğrultusundaki lokal yer değiştirmesinin önemli ölçüde azaldığını, iç tabakanın konumu ve darbe enerjisi ne olursa olsun, temas kuvveti ve sandviç yapının sehimi üzerinde önemli bir etkisi olmadığını ortaya koymuşlardır.

I. Daniel, Abot, Schubel, ve Luo (2012), çalışmalarında kompozit sandviç kirişlerin ve panellerin düşük hızlı darbe davranışlarını incelemişlerdir. Sandviç yapıdaki dış tabaka malzemeleri tek yönlü/kumaş, karbon/epoksi ve cam kumaş/vinil ester içermektedir. Çekirdek malzemeler arasında, dört farklı yoğunluktaki kapalı hücreli PVC köpük ve balsa ağacı bulunmaktadır. Darbe enerjileri 8 J ile 108 J aralığındadır. PVC çekirdeğe sahip sandviç kirişler, farklı çekirdeğe sahip kirişlerden daha sağlam olmuşlardır. Çekirdek yoğunluğu daha fazla olan kirişler, uygulanan enerjinin daha fazlasını absorbe etmiş ve böylece dış tabakalarının hasara karşı daha dirençli olduğu görülmüştür. Balsa ahşap çekirdeğe sahip sandviç kirişleri statik yükleme altında iyi performans gösterse de, lif yönü boyunca düşük kırılma tokluğu nedeniyle darbe yükü altında hasara uğramışlardır.

Susainathan, Eyma, De Luycker, Cantarel, ve Castanie (2018), çalışmalarında iki farklı kontrplak çekirdek tipine ve dört farklı dış tabakaya (alüminyum, cam, karbon, keten takviyeli polimerlere) sahip sandviç panelleri düşük hız / düşük enerji etkileri altında test etmiş ve davranışlarını incelemişlerdir. Darbe sonrası yapıyı incelediklerinde çatlak başlangıcının, kontrplak kaplamalarının tomruktan soyma işlemi sırasında kesme sırasında oluşan hasarlara yakın olduğunu gözlemlemişlerdir. Daha dayanıklı, daha işlevsel ve daha çevre dostu olan kontrplak çekirdek ile geliştirilen bu yapıların havacılık endüstrisinde kargo bölmesi zeminlerinde kullanılan malzemelerin yerini alabilmeleri mümkün olduğu sonucuna varmışlardır. Ucuz olmasına karşın tek dezavantajı, şu anda kullanılan malzemelerden 2.5 katı ağır olmalarıdır.

Shin, Lee, ve Cho (2008), çalışmalarında alçak tabana sahip Kore marka otobüsün yapısal malzemeleri olarak kabul edilen dört farklı sandviç yapının altı enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testlerini yapmışlardır. Dokuma cam kumaş/epoksi dış tabakalı sandviç panel, alüminyum dış tabakalı ile karşılaştırıldığında daha iyi bir darbe direnci göstermiştir. Tüm sandviç paneller arasında, dokuma cam kumaş/epoksi dış tabakalı alüminyum çekirdeğe sahip sandviç paneller, ağırlık tasarrufu avantajlarının yanı sıra en iyi darbe performansını sağlamışlardır.

Castro vd. (2010), çalışmalarında geliştirdikleri ve sandviç yapılarda çekirdek malzeme olarak kullandıkları iyileşmiş mekanik özelliklere sahip mantar aglomeraların performanslarını değerlendirmişlerdir. Gelişmiş mekanik performansa sahip mantar aglomeratları, epoksi reçinesi ile üretilmiş ve temel özellikleri, geleneksel mantar

aglomeratları ve taşıma uygulamaları için sandviç komponentlerde yaygın olarak kullanılan yüksek mukavemetli çekirdek malzemelerle karşılaştırılmıştır. Üç nokta eğilme testlerinde diğer çekirdek malzemelerle karşılaştırıldığında, mantar-epoksi, çatlak yayılma bölgesini azaltan önemli ölçüde daha iyi bir çekirdek kayma gerilme limiti sunmuştur. Tüm darbe testleri yarıçapı 20 mm olan 3 kg'lık impaktör, 0.8 m yükseklikten 4m/s hız ile düşürülmesiyle (yaklaşık 23 J) yapılmıştır. Darbe testlerinde yüksek performanslı köpüklerle karşılaştırıldığında, optimize edilmiş mantar aglomeratlarına sahip sandviç bileşenleri, daha az hasar alarak yüksek bir enerji emme kapasitesine sahip olmuşlardır. Mantar aglomeratlarının, darbeye maruz kalan sandviç parçalar için yapısal bütünlük açısından iyi bir çekirdek malzeme olduğu görülmüştür.

Atas ve Sevim (2010), çalışmalarında PVC köpük ve Balsa ağacını çekirdek malzeme olarak kullandıkları sandviç kompozit yapıların darbe tepkisini (impact response) deneysel olarak araştırmışlardır. 62 kg/m³ PVS köpük, 157 kg/m³ balsa ağacı kullanılmıştır. Üst ve alt tabakalarda iki eksenli (biaxial), dikişli birleştirilmiş (stitch bonded) bükümsüz (noncrimp) +45/-45 E-cam elyaf kullanılmıştır. Numuneler vakum destekli reçine transfer metodu (VARTM) kullanılarak [± 45 /çekirdek/ ± 45] çekirdek PVC köpük ve Balsa ağacı olmak üzere üretilmiştir. Çeşitli darbe enerjilerinde (5J-75J) arasında testler yapılmıştır. Çapraz çizgilerle inceleme (Cross-examining) ve yük-sehim (load-deflection) eğrileri ve enerji diyagramlarından sandviç kompozitlerdeki hasar durumlarını analiz etmişlerdir. Üst ve alt tabakalardaki fiber kırıkları (fiber fracture), birleşik cam elyaf-epoksi katmanları arasındaki ayrılma (delamination), çekirdek kayma kırılması, çekirdek ayrılması (debonding) hasar durumları meydana gelmiştir. İç katmanlardaki ve köpükteki hasar mekanizması kesim yapılarak incelenmiştir. Tek darbenin yanında tekrarlı darbe tepkilerine bakılmıştır. Sonuç olarak yük-sehim eğrilerinden köpük çekirdeğe sandviç daha düşük eğilme rijitliğine/mukavemetine, basma testlerinde balsa ağacının PVC köpüğe göre daha mukavemetli olduğu görülmüştür. Balsa ağacı yüksek temas kuvveti fakat küçük sehim göstermiştir. Yüksek deformasyon kapasitesine sahip PVC köpük içeren numunelerde üst tabakanın katmanları arasında oluşan büyük bir ayrılma (delaminasyon) alanı oluşmuştur. Bu darbe enerjileri balsa ağacında delaminasyondan ziyade lokal hasar durumlarına yol açmıştır. PVC köpük çekirdekli sandviç yapıda direk darbeye maruz kalmayan alt tabakada delaminasyon alanı küçük olup, darbe enerjisi arttığında fiber kırılmasını takip eden delaminasyon alanı bir dereceye kadar genişlemiş, eğilmeden dolayı alt tabakada hasar oluşmuştur. Balsa çekirdekli sandviç yapıda, PVC köpük ile

karşılaştırıldığında daha zayıf bir cam elyaf/epoksi arayüzeyi bulunmaktadır, yüksek darbe enerjilerinde fiberlerin eğilmeden dolayı kırılmalarını takip eden tabakaların çekirdek malzemeden ayrılması (debonding) ana hasar durumu olarak görülmüştür. Arka taraftaki yüzeylerdeki dairesel beyazımsı alan tabakadaki delaminasyondan çok büyük ölçüde arayüzey ayrılmasını (debonding) göstermektedir. Kesit resimlerinden çekirdek malzemenin kayma etkisinde hasara uğradığı görülmüştür.

Atas ve Sayman (2008), düz dokuma E-cam kumaş ve epoksi reçine içeren kompozit plakaların darbe tepkisi üzerine çalışmışlardır. İmpaktör ucu 6.25 mm yarıçapa sahip yarım küre şeklindedir, numuneler ise ortalama 2.2 mm kalınlığındadır. Yaklaşık 4-45 J arasında değişen darbe enerjileri altında test yapmışlardır. Numunelerin hasar sürecinin temel olarak, enerji profili diyagramı, örneklerin hasarlı görüntüleri ve karşılık gelen temas kuvveti-sehim eğrileri karşılaştırılmasıyla yeniden yapılandırılabilen sonucuna varmışlardır. Darbe enerjisi düşük olduğunda, kuvvet-sehim eğrisi kapalı tiptedir ve eğrinin azalan kısmının tamamı hem yük hem de sehim azaldığı için geri sekmeyi ifade etmektedir. Bu durumlarda darbe yükü, küçük matris çatlakları dışındaki numunelerde ciddi hasarlara neden olmamıştır. Eğilme ve fiber ayrılması nedeniyle oluşan hasarlar nedeniyle maksimum tepe noktasının etrafında düzlükler meydana gelmiştir. Kuvvet-sehim grafiklerinde düşey kuvvet azalması impektör ile numune arasındaki temasın bir anlığına düşmesi ile oluşmuştur. Darbe enerjisinin artmasıyla geri sekmesiz delinme başlangıcı ve tamamen delinme meydana gelen açık tip kuvvet-sehim eğrileri oluşmuştur. Ayrıca kuvvet-sehim eğrilerine ek olarak, absorbe edilen enerji ve sehim veya zamana karşı hız gibi diğer darbe parametrelerinin varyasyonunun laminatlardaki hasar süreci hakkında faydalı bilgiler verebileceğini de belirtmişlerdir. İmpaktör ucu yarıçapının-plaka kalınlığına oranının, penetrasyon aralığını, penetrasyon ve perforasyon eşiklerini belirlemede bir parametre olarak değerlendirilebileceğini belirtmişlerdir.

Atas, Akgun, Dagdelen, Icten, ve Sarikanat (2011), çalışmalarında hibrit kompozit plakaların darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Numunelerde tamamen delinme gerçekleşinceye kadar yükselen darbe enerjisi iki farklı tip hibrit kompozit plakaya (cam-karbon/epoksi) uygulamışlardır. Darbe enerjisi ve absorbe edilen enerji arasındaki ilişkiyi gösteren enerji belirleme metodu, yük-sehim eğrileri ile birlikte kullanılarak hibrit kompozitlerin nüfuziyet (penetration) ve delinme (perforation) eşiklerini belirlemiştir. Yük-sehim eğrileri ve hasarlı numunelerin darbe tarafı ve darbe görmemiş

tarafından alınan resimler ile farklı darbe enerjilerinde hasarlı numuneler için kırılma/hasar (failure) süreci değerlendirmişlerdir. Ayrıca görsel olarak numunelerin kesit görünüşleri incelenmiş ve incelenen katmanlardaki fiber kırılmaları, bitişik katmanlar arasındaki delaminasyonların büyümesi gibi hasarların kapsamını tartışmışlardır. Karbon fiber yüzeyi tarafından darbe alan hibrit kompozitin delinme eşiği yaklaşık, yüzeyi cam-elyaf olanından %30 daha yüksek çıkmıştır. $GC(G_0/G_{90}/G_{\pm 45}/G_{90}/G_0)_s+(C_0/C_{90}/C_{\pm 45})_s$, $CG(C_0/C_{90}/C_{\pm 45})+(G_0/G_{90}/G_{\pm 45}/G_{90}/G_0)_s$, $CG1(C_0/C_{90}/C_{\pm 45})_s+(C_0/C_{90}/C_{\pm 45})_s$ cam elyaf/karbon numuneler yapmışlardır. Malzeme olarak karbon 50K ve E-cam tekyönlü (unidirectional), epoksi reçine ve yöntem olarak elle yatırma kullanmışlardır. Kumaşlar (fabrics) içindeki nemi gidermek için 4 saat 60°C de fırında kurutulmuştur. Hibrit kompozit plakalar laminasyon presinde 2 saat 120°C de ve 0,3 MPa sabit basınç altında kürlenmiştir. Aynı basınçta oda sıcaklığına soğumaya bırakılmışlardır. Tamamen delinme gerçekleşinceye kadar 25J ile 75 J arasındaki değerlerde darbe uygulanmıştır. Sonuç olarak 35J altı darbe enerjilerinde darbe olayı elastik olmuş ve impaktörün geri sekmesinde, geri sekme darbe enerjisi kullanılmıştır. Hasarlı numuneler görsel olarak incelendiğinde, cam yüzeyinde küçük matris kırıkları ve birkaç delaminasyon, numunenin darbe almış karbon yüzeyinde ise sadece çukur/iz (indentation) ve matris kırıkları gözlemlenmiştir. Darbe enerjisi yükseldiğinde, ana hasar modu fiber kırıkları olmuştur. Hibrit kompozit CG nin enerji absorbe etme kapasitesi GC hibrit kompozitten daha az ve bu yüzden CG'nin GC den daha yüksek geri sekme (excessive) enerjisi olmuştur. Fakat CG hibrit kompozit çok açık bir nüfuziyet ve delinme eşiklerine sahip değildir. CG hibrit kompozitin delinme eşiği, GC hibrit kompozitten yaklaşık olarak %30 daha yüksek, CG1 hibrit kompozitten yaklaşık %4 daha düşüktür. Karbon tabakasının kalınlığı arttığında yani katmanlarının sayısı 4 katmandan 8 katmana yükseltildiğinde delinme eşiği yaklaşık 69.5J dan 72.4J olarak değişmiştir. Bu laminasyon planı için karbon tabaka kalınlığını arttırmanın delinme eşiği yükselmesine önemli derecede katkısı bulunmamıştır.

Al-Shamary, Karakuzu, ve Özdemir (2016), üç tip farklı çekirdek konfigürasyonundan oluşan sandviç kompozit laminatın ağırlık düşme testleri ile düşük hızda darbe tepkisini deneysel olarak incelemişlerdir. PVC köpük çekirdek ve cam elyaf, sırasıyla çekirdek malzemesi ve tabaka olarak $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/\text{çekirdek}/0^\circ/90^\circ/0^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ/\text{çekirdek}/0^\circ/0^\circ/\text{çekirdek}/90^\circ/0^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ/\text{çekirdek}/0^\circ/\text{çekirdek}/0^\circ/\text{çekirdek}/90^\circ/0^\circ]$ kullanmışlardır. Tüm tasarımlarda aynı sayıda ve yönde cam elyaf kullanmışlardır. 10 ile

50 J enerji seviyeleri arasında darbe uygulamışlardır. Temas kuvveti-sehim, maksimum temas kuvveti-darbe enerjisi ve absorbe edilen enerji-darbe enerjisi davranışları incelenmiş ve darbe sonucu numunelerin görsel olarak değerlendirilmesini yapmışlardır. Numunelerin üst yüzeyinde çukur/iz hasarları, cam/epoksi tabakaları arasında delaminasyon ve elyaf kırılmaları gözlenmiş ve artan darbe enerjisi seviyesi ile alt yüzeydeki delaminasyon alanı artmıştır. Numunelerin kalınlığı arttıkça, sandviç kompozitin eğilme rijitliğini arttırmış, çukur/iz hasarları daha açık bir şekilde gözlenmiştir. Yük-sehim eğrilerinde, yüksek darbe enerjisi ile yapılan düşme testlerinde üç çekirdeğe sahip numunelerin, dış (üst, alt) ve iç tabakalarda hasarları gösteren dört tepe nokta oluşmuştur. İki tepe arasındaki yatay yer değiştirme, çekirdek malzemenin deformasyonundan kaynaklanmaktadır. Tek çekirdek ve iki çekirdeğe sahip numunelerdeki ikinci tepe değeri, köpük çekirdeğin darbe yükü altında sıkıştırılmasından dolayı birinci tepe değerinden daha yüksek olmuştur. Tek çekirdeğe sahip numunelerin 40 J'deki maksimum temas kuvveti, üç çekirdeğe sahip numunelerinkinden yaklaşık %177 daha yüksek değerdedir. Ayrıca, üç çekirdekli, iki ara/iç tabakaya sahip numunelerin tam delinme seviyesi, tek çekirdekli numunelere göre yaklaşık %17 daha yüksek çıkmıştır. Sandviç kompozitin darbe tepkisinin hem iç tabakalar hem de çekirdek malzeme yoluyla geliştirilebileceğini söylemişlerdir.

Ozdemir, Oztoprak, ve Kandas (2018), deneysel olarak E-cam elyaf takviyeli termoplastik dış tabakalar ve farklı kalınlıktaki (15 mm ve 25 mm) balsa ağacı çekirdekli sandviç yapıların düşük hızlı darbe tepkisini araştırmışlardır. Darbe dirençlerini değerlendirmek için aynı enerji seviyelerinde düşük hızlı tekli ve tekrarlı darbe testleri yapmışlardır. Hasar sürecini iki farklı kompozit panel için temas kuvveti-deformasyon eğrileri, enerji profili şemaları ve hasar görmüş örnekler aracılığıyla incelemiş ve karşılaştırmışlardır. Darbe sonucu E-cam takviyeli polipropilen bazlı termoplastik prepreg üst ve alt tabakadaki fiber kırılmaları, termoplastik komşu yüzey tabakaları arasındaki delaminasyonlar, balsa ahşap çekirdek tabakada enine kırılma gözlenmiştir. **Tek darbeli durumda delinme eşiği, seçilen sandviç kompozit tasarımın artan çekirdek kalınlığı ile yükselmiştir.** Tekrarlı darbelerde sandviç kompozit numunelerin maksimum temas kuvveti, ilk beş darbeden sonra azalmıştır. Tabakalı kompozit panellerin aksine, sandviç kompozitin temas kuvveti-deformasyon eğrileri, daha yüksek darbe enerjisi seviyelerinde impaktörün üst ve alt dış tabakalara temas etmesini ifade eden iki tepe şeklinde oluşmuştur. Eğrilerde ikinci pik değeri, birinciden düşük olmuştur. 25 mm çekirdek kalınlığına sahip olan sandviç

kompozitin eğilme rijitliğinin çekirdek tabakası 15 mm olandan daha yüksek olduğu görülmüştür.

Ozdemir, Karakuzu, ve Al-Shamary (2015), çalışmalarında PVC ve PET köpük çekirdek malzemelerin ve kalınlıklarının sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. [$\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/\text{çekirdek}/90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ$] oryantasyonlarına sahip sandviç kompozitleri vakum altında üretmişlerdir. 5 mm çekirdek kalınlığına sahip numunelerde temas kuvveti-sehim ve zaman eğrilerinde bir tepe noktası oluşmuştur. Kalınlığı az olan çekirdek tabakayı deforme etmek için temas süresi çok kısa olduğundan lamine kompozit plakalarla neredeyse aynı darbe özelliklerini göstermiştir. Çekirdek tabakanın kalınlığının az olması, temas kuvveti ve numunenin rijitliğinde önemli bir etkiye sahip olmamıştır, lamine bir kompozit gibi davranmıştır. Çekirdek kalınlığı arttıkça, numuneler daha elastik davranış göstermiş ve böylece temas süresi ve maksimum sehim değerleri artarken, maksimum temas kuvvet değeri düşmüştür. Daha kalın çekirdek kalınlıklarında, numuneler daha fazla enerji absorbe etmişlerdir. Penetrasyon kısmı daha geniş enerji aralıklarında görülmüştür. Çekirdek bulunmayan numunenin eğilme rijitliği, çekirdek olan tüm numunelerden daha yüksek olmuştur. Eğilme rijitliği, çekirdek malzemelerin basma modülü ile uyumlu olarak, PVC çekirdekli numunede maksimum ve PET çekirdeklide ise minimum olmuştur. Tüm numunelerde, darbe enerjisinin artmasıyla darbe alanı hasarları artmıştır.

Loganathan ve Shivanand (2015), dokuma cam dış tabakalardan ve üç farklı yoğunluğa sahip poliüretan köpük çekirdekli sandviç panelleri düşük hızda düşme testine tabi tutmuşlar, değişen çekirdek yoğunluğu ve kalınlığının etkisini incelemişlerdir. Yoğunluğu daha fazla olan çekirdek içeren sandviç paneller daha yüksek enerji absorbe etmişlerdir. Spesifik enerji emilimi ve darbe enerjisi faktörü, çekirdek yoğunluğu ile yaklaşık doğru orantılıdır. Daha yoğun köpük çekirdekli sandviç panelin eğilme direncinin belirgin olması, yoğun köpüğün deformasyona karşı yüksek direnç göstermesindedir. Yüksek yoğunluklu köpükte, yükün maruz kaldığı alana dağılımı daha iyi olduğundan, düşük bir ortalama lokal yüke yol açmıştır. Çekirdek yoğunluğundaki artışla, çekirdek kalınlığının değişmesine benzer olarak daha yüksek enerji emilimi olmuştur.

Zhou, Guan, ve Cantwell (2013), farklı yoğunluklardaki köpüklerin birbirine yapıştırılarak birleştirilmesiyle üretilen çekirdeğe sahip karbon elyaf dış tabakalı sandviç plakalarda yarı-

küresel impaktör ile düşük hızlı darbe testleri yapmışlardır. Üç katmanlı bir çekirdek üretmek için bir doğrusal PVC, çapraz bağlı PVC ve PEI köpükleri farklı dizilimlerde birbirine yapıştırmışlardır. Tabakalı köpük çekirdekli sandviç yapılar, tek çekirdekli eşdeğer yapılara karşı üstün bir delinme direnci sunmuştur. **Tabakalı çekirdek yapıda yüksek yoğunluklu ve dayanıklı köpüğün en üstte olması delinme direncini %30 artırmıştır.**

Edgren, Asp, ve Bull (2004), çalışmalarında kıvrımsız kumaşlı, köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin, darbe sonrası basma (tek eksenli düzlem içi) altındaki hasarlarını incelemiştir. Dış tabakalardaki hasarları fraktografi ile karakterize etmişlerdir. Bu araştırmalarda, basma hasarı sandviç panellerde, elyaf mikro-burkulma bantlarının oluşumuna ve yayılmasına neden olmuştur. Panellerin darbe sonrası basma testlerinde, açıkça görünür darbe hasarı (BVID) ile görünür darbe hasarı (VID) arasındaki gerinim farkının çok küçük olduğunu, bozulan elastik özelliklerden ve kalan göçükten dolayı çarpma hasarının çevresinde karmaşık bir gerilme alanı oluştuğunu görmüşlerdir. Çarpma hasarının bu özellikleri, gerilme yoğunlaşmasına, eğilme etkilerine ve bölgedeki çarpma noktasına yakın hem düzlem içi hem de düzlem dışı kayma gerilmelerine neden olmuştur.

Wu ve Sun (1996), grafit/epoksi tabakaları ve Rohacell köpük çekirdek malzemenin oluşan sandviç kırılgarların darbe hasarları incelenmiştir. Düşük hızda yapılan darbe testlerinde tabakalarda ve çekirdek malzemedeki hasar mekanizmaları ve hasar modlarına bakılmıştır. Ana hasarlar/kusurlar (failure) çekirdek malzemenin akması (yielding), matris kırılması ve tabakalardaki delaminasyonları içermektedir. Maksimum asal gerilme hasar kriteri kullanılarak kompozit katmanlarda matris kırılma başlangıç tahmini için sonlu elemanlar analiz yöntemi uygulanmıştır. Sonraki delaminasyonlar kırılma mekaniği kullanılarak analiz edilmiştir. Analizlerde çekirdek malzeme elastik-plastik kabul edilmiştir. Tahmin edilen delaminasyon çatlak (crack) boyutu deneysel verilerle çok uyumlu çıkmıştır.

Schubel, Luo, ve Daniel (2007), çalışmalarında dokuma karbon/epoksi dış tabakalardan ve PVC köpük çekirdekten oluşan bir kompozit sandviç yapısının hasar toleransını araştırmışlardır. Sandviç panelleri, artan yüksekliklerden hasar oluşana kadar ağırlık düşürülerek darbe testine tabi tutmuşlardır. Darbe hasarı, etkilenen dış tabakalardaki delaminasyon ve kalıcı batmalardan oluşmuştur. Panellerden kesilmiş sandviç kolonların

darbe sonrası basma (DSB) mukavemeti, hasar görmemiş bir kolonun mukavemeti ile karşılaştırılmıştır. Sandviç plakanın kolon uçlarından yük uygulamak yerine, basma bir Instron test makinesinin çenesinde daha rijit bir şekilde tutulan bölge boyunca kayma ile uygulanmıştır. Sandviç yapısında darbe sonrası özelliklerine bakıldığında görsel inceleme ile çarpma hasarı panelde kolayca görülmesi de, yapının mekanik özelliklerini düşürücü etkisi olmuştur. DSB testi genellikle delaminasyon kaynaklı hasarlarda, sandviç yapının hasar toleransını değerlendirmenin en iyi yoludur. Delaminasyon, kompozit malzemelerin bası sırasında aniden hasar oluşmasına neden olan bükülme bandı (kink band) formu ile yapıda kararsızlık yaratır. Sandviç yapı, hasar görmemiş ile karşılaştırıldığında, darbe alan dış plakadaki delaminasyon içeren kolon, bası gerilmesine çok iyi dayanmamıştır. Delaminasyon hasarı, sandviç kolonun bası mukavemetini, orijinal kuvvetin yarısından daha azına düşürmüştür.

Shipsha ve Zenkert (2005), kompozit dış tabakalı köpük çekirdekli sandviç panellerin darbe sonrası basma (DSB) dayanımını deneysel olarak incelenmişlerdir. Yarı küresel bir impaktörün düşük hızlı etkisi, dış tabakada kalıcı bir girinti (artık çökme) eşliğinde bir çekirdek ezilmesi formunda bir hasara neden olmuştur. Sandviç panelin orta kesit düzlemi içine doğru çöküntünün ilerlemesi ve ardından dış tabakasının tamamen ayrılması, hasar modu kabul edilmiştir. Sandviç panellerde, darbe hasarının artmasıyla DSB mukavemeti azalmıştır. Sandviç panelleri talaşlı keserek hasar parametrelerini karakterize etmişlerdir. Deneysel, darbe hasarının panellerin basma dayanımını azalttığını göstermiştir. Kalıcı göçmenin panel içerisine doğru artmasıyla dış tabakaların ani şekilde ayrılmasını hasar durumu kabul etmişlerdir. Hasarlı panelleri tahribatlı kesip, görsel olarak incelendiklerinde, şişkin bölgelerdeki köpük çekirdeğin düzlem dışı çekme kırılmasına bağlı hasar mekanizmasının oluşabileceğini ve darbe alan dış tabakada basmadan kaynaklı hasar olmadığını görmüşlerdir.

Kassapoglou, Jonas, ve Abbott (1988), çalışmalarında düşük hızda darbe etkisinin grafit/epoksi sandviç panellerin basma dayanımı üzerindeki etkisi deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Çeşitli impaktör boyutları ile ve darbe enerji seviyelerinde testler yapmışlardır. Bu araştırmada yer alan paneller için hasar bölgesi c-taraması sonuçlarındaki gibi eliptik olmuştur. Darbe hasarının, panellerdeki darbe sonrası basma dayanımını %33'e kadar azalttığı görmüşlerdir. Darbe noktası altında çekirdeğin bitişiğindeki katman ile komşusu arasında çok fazla delaminasyon oluşmuştur. Yapıştırıcı filmin delaminasyona en

yatkın katın arayüzeyine yerleştirilmesi gerektiğini söylemişlerdir. Yapıştırıcıyı film şeklinde ara tabaka olarak kullanmaları, çarpmanın neden olduğu delaminasyon boyutunu azaltarak panelin performansını iyileştirmiş ve basma dayanımını arttırmıştır.

Bull ve Edgren (2004), karbon fiber-vinil ester yüzeyleri ve PVC köpük çekirdekli panellerin darbe hasar direnci ve artık dayanımı üzerine parametrik bir çalışma yapmışlardır. İki sandviç konfigürasyonu incelemiştir. İlk konfigürasyon üst güverteden gelen bir paneli temsil eden ince dış tabakalardan ve orta yoğunluklu çekirdek yapıdan, ikinci konfigürasyon tekne gövdesinden bir paneli temsil eden, kalın dış tabakalardan ve yüksek yoğunluklu bir çekirdek yapıdan oluşmuştur. Sandviç yapıya farklı enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe hasarı verecek küresel ve piramit şeklinde iki farklı impaktör kullanmışlardır. Artık (residual) dayanımını, sandviç plakaların düzlem içi basma testleri ile uzama ölçerler veya dijital nokta fotoğraflama yöntemleri kullanarak belirlemişlerdir.

Jiang ve Shu (2005), DHD (Düşük hızda darbe) yüklemesi altında farklı konumlarda çekirdek malzemenin içine yerleştirilen ara tabakanın etkilerini incelemiştir. Ara tabakayı geleneksel sandviç yapıya eklemek, çekirdek malzemenin darbe yükü altında yer değiştirmesini önemli ölçüde azaltmıştır. Ara tabaka kullanılması darbe enerjisinin bölgesel etkisini azaltmış ve darbe enerjisini yapı içindeki daha geniş bir alana yayılmasını sağlamıştır.

Lakreb, Bezzazi, ve Pereira (2015), çok katmanlı sandviç panellerde çekirdek malzeme olarak mantar aglomeratı ve dış levhaları standart endüstriyel kontrplak üzeri Halep çamı ahşabı kaplanarak üretilmiştir. Mantar aglomerat ile ahşap tabakanın yapışması ve birleşme dayanıklılığı iyi olmuştur. Panellerin mekanik davranışı dikey basma ve çekme, uzunlamasına basma, üç ve dört nokta eğme ve kesme açısından test edilmiştir. Yük-deplasman eğrileri, yapılar ve çatlak kırıkları analiz etmişlerdir. Mantar aglomeratı, dikey basma altında yüksek performanslı bir çekirdek yapı sağlarken, ahşap tabakaları çekirdek malzemeyi korumuş ve mekanik mukavemetini arttırmıştır. Sandviç paneldeki katman sayısının artırılması ile de mukavemet artmıştır. Çekirdek tabakadaki hasar mantar granülleri arasında kırılma ile oluşmuştur. Sonuç olarak, bu sandviç panellerin, çevre dostu ve maliyet avantajı olan iç mekân uygulamalarında panel veya bölme duvarları için inşaat malzemesi olarak kullanılabilceğini öne sürmüşlerdir.

Iejavs ve Spulle (2013), yapısal uygulama için üç katmanlı hücresel ahşap panellerin basma özelliklerini değerlendirmişlerdir. Basma testleri için 6 yapısal panel modelin her biri için hem dikey hem de paralel 8 örnek üretmişlerdir. Yapısal panellerde hücresel sarıçam ve masif çam ağacı kirişlerini çekirdek malzeme olarak kullanmışlardır. Hücresel ağaç çekirdek yapısını, yatay veya dikey yönde yerleştirmişlerdir. Sarıçam ahşap paneli ve huş kontrplağı dış katman malzemesi olarak kullanmışlardır. Alt zemin ve duvar panellerinde ortak gerilme tipi bası olduğundan, hücresel malzeme oryantasyonunun, kirişlerin ve dış tabaka malzemelerinin, sandviç tipi yapısal panelin basma mukavemeti üzerindeki etkilerini LVS EN 408'e göre değerlendirmişlerdir. Hücresel materyalin dik yerleştirildiği, kirişlerin ve dış katmanın masif kereste olduğu yapısal modelde, paralel yöndeki en yüksek basma mukavemetini 17.5 MPa, hücresel materyalin dik yerleştirildiği dış katmanın kontrplak olduğu yapısal modelde dik yöndeki basma mukavemetini 4.48 MPa, elde etmişlerdir. Masif ahşap kirişler, paneller paralel yönde yüklendiğinde basma kuvvetini önemli ölçüde etkilemiştir. 20 mm masif ahşap dış katmanlara sahip yapısal modeller, paralel yönde önemli ölçüde daha yüksek basma dayanımları, ancak 12 mm huş kontrplak dış katmanları olan yapısal modele kıyasla dış katmana dik olarak yüklendiğinde önemli ölçüde düşük değerler göstermiştir. Masif kerestenin yük taşıma yönü lif yönüne paralel olduğundan masif ahşap kirişler, paneller dış tabakaya paralel bir yönde yüklendiğinde basma kuvvetini önemli ölçüde arttırmış, ancak dikey yönde önemli bir artış gözlenmemiştir. Yatay olarak yerleştirilmiş hücresel ahşap malzeme, çoğunlukla dikey olarak yerleştirilmiş hücresel ahşap malzemeye sahip panellere kıyasla önemli ölçüde daha düşük basma mukavemeti değerleri göstermiştir.

Fang vd. (2015), CTP (cam elyaf takviyeli polyester) dış tabakalardan, bambu ara tabakalara sahip Paulownia ahşap çekirdekli sandviç kirişleri deneysel olarak incelemişlerdir. CTP ve bambu tabaka kalınlıklarının eğilme yükü altında genel yapısal performans üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bambu ve ahşap çekirdek arasındaki yapışma, tatmin edici mekanik performans göstermiştir. Sandviç kirişin yönüne paralel olarak Paulownia ahşabın fiber yönündeki kullanımı, eğilme rijitliğini arttırmıştır. Bambu ve CTP tabakalarının kalınlığının artırılması, eğilme rijitliğini ve sandviç kirişlerinin dayanım yükünü önemli ölçüde arttırmıştır.

Zhang vd. (2015), cam elyaf takviyeli plastik dış tabaka, poliüretan (PU) köpük çekirdek, bambu tabakası ve kafes kaburga sistemi ile hibrit kompozit kirişlerin eğilme davranışının

deneysel araştırmasını yapmışlardır. Bambu tabakası, poliüretan köpük çekirdeğın üstüne yerleştirilmiştir. Kafes kaburga sistemi, kiriş doğrultusunda uzunlamasına dağıtmışlardır. Biri kontrol olan dört numuneyi, bambu tabakasının ve kafes kaburgaların hibrit kompozit kirişlerin eğilme mukavemetini arttırdığını doğrulamak için dört nokta eğilme testine tabi tutmuşlardır. Kontrol örneğiyle karşılaştırıldığında, maksimum eğilme dayanımında yaklaşık %85'lik bir artış elde etmişlerdir. Bambu tabakası takviyeli ve kafes kaburga içermeyen kiriş, en yüksek rijitlik-ağırlık oranını sergilerken, hem bambu tabakası hem de kafes kaburgalara sahip kiriş en yüksek mukavemet-ağırlık oranını sergilemiştir. Cam elyaf takviyeli plastik dış tabaka ve PU köpük çekirdek yapıdan oluşan kirişler, üst tabakanın basma hasarı yüzünden kırılmışlardır. Bambu tabakasına sahip kirişlerde, basma ve ezilme hasarları oluşmuştur.

L. Wang, Liu, ve Hui (2014), çalışmalarında CTP dış katmanı ve Paulownia ahşap çekirdekli olan basit ve yenilikçi içi boş sandviç kolonları, vakum destekli reçine infüzyon iřleмиyle üretmişler ve eksenel basma yükü altında test etmişlerdir. CTP dış katman ile odun çekirdek arasındaki maksimum eksenel yük kapasitesini, yer değiştirme sünekliğini, hasar modlarını ve eksenel kuvvet dağılımlarını incelemişlerdir. Ahşap yoğunluğunun arttırılması ile başlangıç rijitliği önemli ölçüde arttırılacağını söylemişlerdir.

Mitreviski, Marshall, ve Thomson (2006), çalışmalarında çeşitli uç geometrileri farklı impaktörler ile darbe testi yapılan kompozit tabakaların darbe sonrası hasar özellikleri araştırılmıştır. Dokuma karbon/epoksi tabakaları, çelik ve 12 mm çapında olan yarı-küresel, ojival (ogival) ve koniksel impaktörler ile ağırlık düşme test kulesi kullanılarak darbeye maruz kalmışlardır. Hasarda impaktörün şeklinin etkisini tayin edebilmek için çok çeşitli (tahribatsız inceleme-NDI ve mikroskop) darbe sonrası analiz teknikleri uygulanmıştır. Küt yarı-küresel impaktör delaminasyonla sonuçlanan en büyük hasar alanını oluşturmuştur. Aksine sivri koniksel impaktör bölgesel hasar alanına sebep olmuş ve en büyük çukur/nüfuziyet (indentation/penetration) derinliği ile sonuçlanan çok sayıda fiber kırıklarına yol açmıştır. Tüm numunelerde çekme mukavemetinde önemli ölçüde düşüş meydana gelmiştir. Yarı küresel impaktör ile 4J de açıkça görülebilir darbe hasarı (BVID) incelemesine dayalı delaminasyonlardan kaynaklı, çok az miktarda yüksek artık çekme mukavemeti gözlemlenmiştir.

3. AHŞAP MALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ

Tüm ağaçlar, selüloz, lignin, hemiselülozlar ve hücrenel bir yapıda bulunan az miktarda (genellikle %10'dan az) yabancı maddelerden oluşur. Bu bileşenlerin özellikleri, oranları ve hücrenel yapıdaki farklılıklar, ahşapları ağır veya hafif, rijit veya esnek, sert veya yumuşak yapar. Tek bir ağaç türü özellikleri sınırlar içinde nispeten sabittir; buna göre seçilmesi bazen yeterli olabilir. Ancak ahşabı en iyi şekilde ve en etkili şekilde mühendislik uygulamalarında kullanmak için spesifik veya fiziksel özellikler göz önünde bulundurulmalıdır.

Ağaçlar, genellikle sert ağaçlar ve yumuşak ağaçlar olarak adlandırılan iki geniş sınıfa ayrılır. Bu isimler kafa karıştırıcı olabilir, çünkü bazı yumuşak ağaçlar aslında bazı sert ağaçlardan daha serttir ve tersine bazı sert ağaçlar bazı yumuşak ağaçlardan daha yumuşaktır. Onları botanik olarak tanımlamak için yumuşak ağaçlar gymnospermlerden (çoğunlukla kozalaklı ağaçlardan) gelen ağaçlardır ve sert ağaçlar anjiyospermlerden (çiçekli bitkiler) gelen ağaçlardır.

Çok az yapı malzemesi ahşabın çevresel faydalarına sahiptir. Ahşap sadece en yaygın kullanılan yapı malzemesi değil, aynı zamanda onu çok çeşitli uygulamalar için uygun kılan özelliklere sahip bir malzemedir.

Metaller ve fosil yakıt bazlı ürünlerin (plastikler gibi) aksine, orman kaynağı yenilenebilir ve uygun bir yönetim ile ahşap ürün akışı süresiz olarak korunabilir. Bu kaynağın sürdürülebilirliği ormanlarımızın uzun vadeli sağlık ve çeşitliliğini sağlayan ormancılık ve hasat uygulamalarını gerektirir. Ne yazık ki, sürdürülebilir uygulamalar geçmişte ve günümüzde evrensel olarak uygulanmamıştır. Mimarlar, ürün tasarımcıları, malzeme şartname hazırlayıcıları ve konut sahipleri gittikçe artan bir şekilde sürdürülebilir bir kaynaktan sertifikalı inşaat ürünleri istemektedirler. Orman ürünleri sektörü için bu talebin sonucu orman sertifikasyon programları oluşturulmuştur. Bu programlar sadece orman kaynağının sürdürülebilir bir şekilde hasat edilmesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda biyoçeşitlilik, habitat koruması ve yerli halkların hakları konuları arazi yönetim planlarına dâhil eder (W. Handbook, 1999).

3.1 Ahşap Ürünler

Masif Ahşap: Tamamıyla kütleli olarak hiçbir katkı ürünü olmadan sadece ahşabın kendisinden oluşuyorsa biz onu “masif” olarak adlandırılır.

Kontrplak: Bir tomruğun kabuğundan başlayarak dıştan içeri doğru spiral olarak bıçakla yontma işlemiyle talaşa benzeyen malzemenin içerisine özel bir reçine katarak elde edilen levhaya “kontrplak” denir.

Sunta (Yonga Levha): Talaşın, sıcak basınç altında sıkıştırılmasıyla elde edilen levha biçiminde malzemedir.

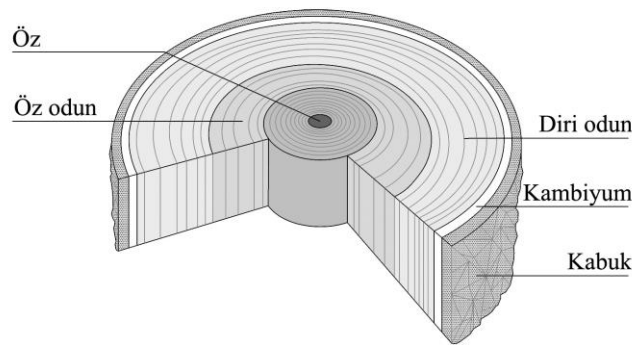
MDF: Ahşap elyafın özel reçine ile sıcak pres altında sıkıştırılmasıyla elde edilen sunta göre daha dayanıklı bir malzemedir. Suya karşı oldukça dayanıklı malzemedir.

Doğal Kaplama: Tomruktan 0.4 ile 2’şer mm kalınlığında kesilen yapraklara, doğal kaplama denir. Bu yaprakları sunta ya da mdf üzerine ısı altında presle yapıştırarak ürün elde edilir.

Laminat Ahşap (Pvc Kaplama Yöntemi): Sunta ve mdf üzerine pvc kaplama kullanılır (Bozkurt & Erdin, 1997).

İnşaat için kullanılan kereste, her biri farklı yoğunluklara ve nem seviyelerine sahip 2000’den fazla ağaç türünün gövdelerinden çıkarılır. Bu faktörlere ek olarak, gövdenin kesilme şekli her ahşap bölümünün işlevselliğini ve nihai özelliklerini belirler.

Bir ağaç gövdesi esas olarak lignin ile birleştirilen selüloz liflerinden oluşur. Dışarıdan içeriye, aşağıdaki parçaları tanımlayabiliriz (Şekil 3.1):



Şekil 3.1: Ağaç gövdesinin kısımları.

Kabuk: İç katmanları koruyan ölü hücrelerden oluşan düzensiz katman.

Kambiyum: Her yıl gövde çapını artıran yeni hücrelerin üretildiği kabuğun yanındaki katman.

Diri odun: Yüksek su içeriği ve az lignin içeren, genç, daha açık renk ve büyüyen ağaç.

Öz odun: Yetişkin, koyu renkli, yüksek lignin içeriği nedeniyle daha rijit ve sert.

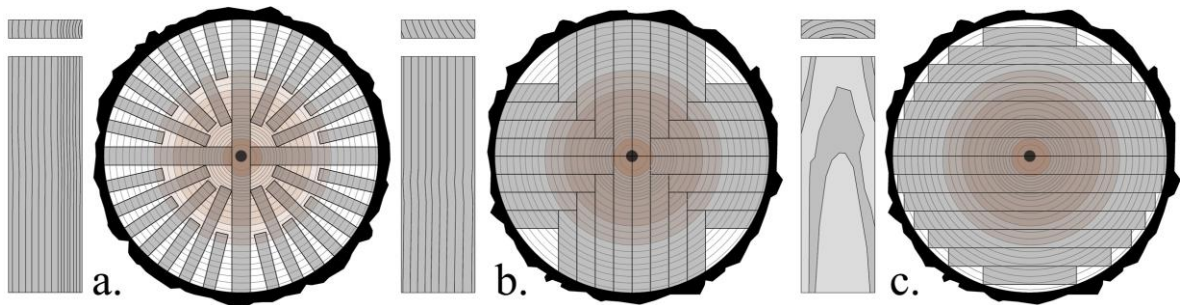
Öz: Gövdenin merkezi kısmı, çok rijit ve yapışkan, nemsiz.

Ahşapları, hem yumuşak hem de sert ağaçlar için sertliklerine göre yapısal olarak sınıflandırırken gövdede diri odununun öz oduna oranını tanımlamak esastır. Yumuşak ağaçlar (hızlı büyüyen) genellikle daha ucuz ve kullanımı daha kolaydır, ancak daha az dirençlidir, sert ağaçlar (yavaş büyüyen) genellikle daha büyük bir mukavemete sahiptir, ancak daha pahalı ve hassastır. Bize ağacın yaşını anlatan büyüme halkaları ve diri kısmı ağaç boyunca dikey olarak hareket ettiren öz ışınlar, ortaya çıkan ahşap tahtanın estetiğinde ve özelliklerinde de bir fark yaratacaktır. Bu teknikler gereken kullanıma bağlı olarak değişebilse de, bir kütüğü kereste şeklinde kesmenin üç ana yolu vardır: Rift, çeyrek ve düz kesim aşağıda verilmiştir.

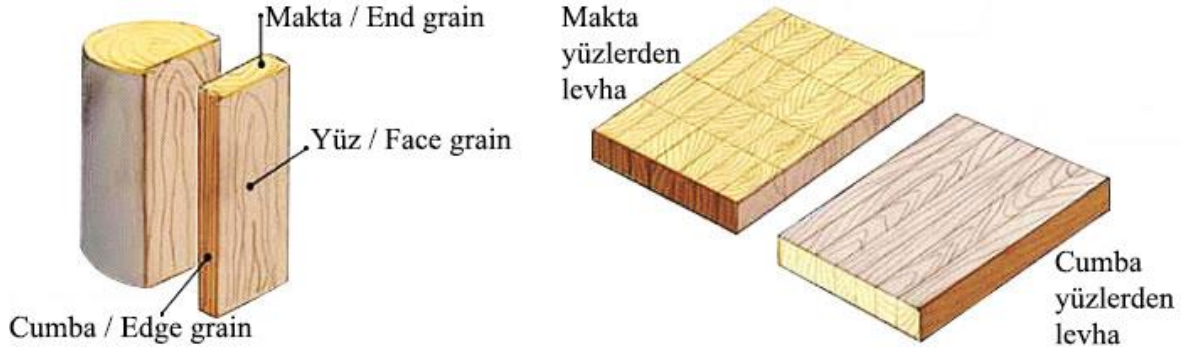
Rift Kesim: Bu kesim büyüme halkalarına dik olarak yapılır. Odun liflerini/damarlarını görünür tutar ve çarpılmayı (tabakanın şeklinde oluşan deformasyonları) veya boyuna çatlakları önler, ancak diğer kesim tiplerinden daha fazla malzeme israf eder (Şekil3.2a).

Çeyrek Kesim: Gövde, çok sayıda görünür halka ile çarpılmaya yatkın olmayan parçalar elde ederek çeyreklere kesilir (Şekil3.2b).

Düz Kesim: Bu, yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir, ancak sonuçta elde edilen parçalar en iyi kalitede değildir, çünkü çoğu, diri ve öz odunun belirli bir yüzdesini içerir. Çekirdek ile çakışan merkez parça kırılabilir, geri kalan parçalar çarpılmaya ve bükülmeye eğilimlidir (Şekil3.2c) (How Tree Trunks Are Cut to Produce Wood With Different Appearances and Uses, 2019).



Şekil 3.2: Kütükten kereste kesme yöntemleri
a)rift kesim, b)çeyrek kesim, c)düz kesim.



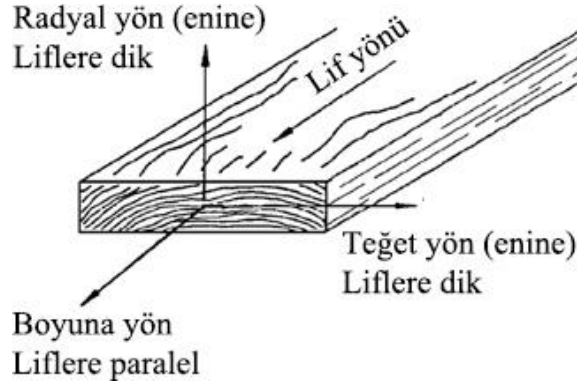
Şekil 3.3: Ahşap malzeme yüzleri.

Yaş halkalarını kullandığımız yüzey ‘end grain’ veya makta, seyrek çizgilerin olduğu, ağacın yan tarafı ise ‘edge grain’ ya da ‘face grain’ olarak anılır (Şekil 3.3). Ahşap parçaların birleştirilme şekli de levhanın kullanımına farklılıklar getirir.

- **Makta (End Grain):** Ağacın liflerine dik olarak kesilmiş, yaş halkalarını görebildiğiniz yüzedir.
- **Cumba (Edge Grain):** Ağacın liflerine paralel yönde alınan kesitte, liflerin sık olduğu, dar yüzeydir.
- **Yüz (Face Grain):** Ağacın liflerine paralel yönde alınan kesitte liflerin seyrek olduğu, geniş yüzeydir (‘End Grain’ ve ‘Edge Grain’ Kesme Tahtası, 2019).

3.2 Ahşabın Mekanik Davranışları

Ahşap ortotropik bir malzeme olarak tarif edilebilir; boyuna, radyal ve teğetsel olmak üzere birbirine dik üç eksen yönünde benzersiz ve bağımsız mekanik özelliklere sahiptir. Boyuna eksen lif yönüne paraleldir; radyal eksen büyüme halkalarının normali yöndedir (radyal doğrultuda liflere dik); ve teğet eksen, liflere dik, fakat büyüme halkalarına teğettir. Bu eksenler Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Lif yönü ve büyüme halkalarına göre üç temel ahşap eksenini.

Tasarım için en yaygın olarak ölçülen ve "mukavemet özellikleri" olarak temsil edilen mekanik özellikler, eğilme sırasında kırılma modülü, lif yönüne paralel basmada maksimum gerilme, lif yönüne dik basma gerilmesi ve lif yönüne paralel kayma mukavemeti içerir. Maksimum eğilme yükünü, darbe eğilme mukavemetini, liflere dik çekme mukavemetini ve sertlikleri değerlendirmek için genellikle ek ölçümler yapılır. Bu özellikler, genel orman ağacı kategorilerine göre sert ağaç ve yumuşak ağaçlar olarak gruplandırılmıştır.

3.3 Ahşap Malzemenin Isıl İşlemi



Şekil 3.5: Isıl işlem görmüş ahşabın özellikleri.

Ahşabın ısıtılması işlemi (Thermowood®) Finlandiya Teknik Araştırma Merkezi tarafından geliştirilmiş bir yöntemden yararlanılarak yapılmaktadır. En az 180 °C derece sıcaklıkta ısıtılan ahşap, buhar ile korunur. Buhar, ahşapta meydana gelen kimyasal değişiklikleri etkiler. Bu işlem ile ısıtılmış ahşap elde edilir. Ahşabın rengi koyulaşır, normal ahşaba göre değişen nem koşullarında daha dayanıklı bir hale gelir ve ısı yalıtım özellikleri artar (ortalama %20-25), hafifler (ortalama %10), yeterince yüksek sıcaklık uygulanırsa ahşabı çürümeye karşı daha dayanıklı hale getirir. Diğer yandan, ahşabın eğilme mukavemetinde azalmaya yol açar (200 °C derecenin üzerine çıktığı zaman) (Şekil 3.5).

Isıl işlem üç aşamada yapılır;

Safha 1: Isı yükseltme ve yüksek ısıda kurutma

Fırın sıcaklığı ısı ve su buharı kullanılarak 100 °C ye çıkarılır. Isı ara verilmeden 130 °C ye yükseltilerek kurutma işlemi gerçekleştirilir, böylelikle ahşabın içindeki nem neredeyse sıfıra indirilir.

Safha 2: Isıl İşlem

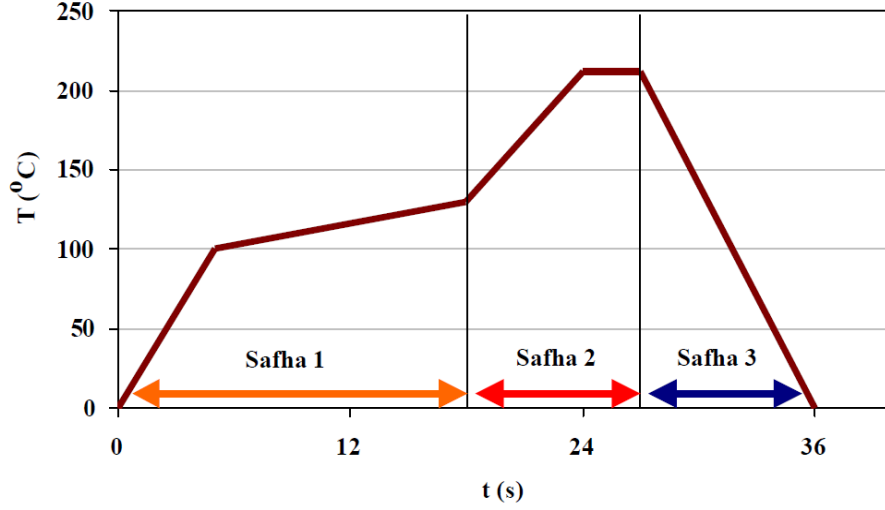
1.safhadan sonra, fırın içi sıcaklığı 185 °C - 212 °C'ye çıkarılır. Bu işlem süresince ağacın yanmaması için buhar kullanılmaktadır. Son sıcaklığa ulaşıldığında, ısıtılma safhasında sıcaklık 2-3 saat boyunca sabit tutulur.

Safha 3: Soğutma ve kondisyonlama (Uygun duruma getirme)

Son safhada su spreyi ile ısı düşürülür, ısı 80-90 °C'ye ulaştığında, ahşap nemlendirilerek %4-7 arasında kullanılabilir seviyeye getirilir. Ağaç sıcaklığı ile dışarıdaki hava sıcaklığı arasındaki yüksek ısı farkı çatlamaya (yarılmaya) neden olabilir, bu yüzden dikkatli olmak gereklidir. Ağaç türüne ve sıcaklığa bağlı olarak bu safha 5 – 15 saat arasında sürer (Şekil3.6). Isı değişimlerinden, dış ve iç yüzey çatlamalarını önlemek ve kontrol etmek için ağaç türleri ve ebatlarına göre değişen bir uyum sistemi kullanılır.

Isıl işlem görmüş ağaç kimyasal madde kullanılmamış doğal bir üründür. Yapıştırıcı ve boya kullanılmamışsa diğer işlenmemiş ağaç atıkları gibi işlemlerden geçirilebilir. Geri dönüşüm açısından artan ve hasarlı ürünler yakılabilir, enerji ihtiva eden doğal maddeleri ısıtılma işlemde uzaklaştırılmış olduğundan işlenmemiş ağaca oranla %30 daha az enerji üretir. Nem miktarının daha az, başka bir deyişle kuru olmasından tutuşabilirliği daha iyidir, daha

küçük bir alevle yanar, daha az duman ve zararlı gaz üretir. Isıl işlem sırasında ağaçtaki yarı selüloz (şeker bileşenleri) parçalandığından mantar besleyici hiçbir madde kalmamakta ve böylelikle ağaç daha uzun ömürlü ve dayanıklı olmaktadır (T. Handbook, 2003).



Şekil 3.6: Ahşap ısıl işlem safhaları grafiği.

3.4 Ahşabın Yangın Dayanımı

Genel kanının aksine ahşabın yangına direnci beton ve çelikten üstündür. Bugün ABD'nde kapalı spor salonu gibi büyük kalabalıkların bulunacağı yerlerin, yangın tehlikesine karşı ahşap karkas olarak inşasına gidilmekte, Almanya'da yine aynı nedenle çelik konstrüksiyonlar ahşap kaplanmaktadır. Yangınlar üzerine yapılmış araştırmalar ve derlenmiş istatistikler taşıyıcı olarak kullanılan ahşabın en güvenli malzemelerden biri olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Yangının başlama nedeni hiçbir zaman ahşap değildir. Isı geçirmeme, kömürleşme özellikleri nedeniyle ahşap-karkas yapı büyük yangınlara yüksek direnç gösterir. Ahşap yapılar yangına 30-90 dakika dayanabilme özelliği gösterir. Bu da çelik konstrüksiyon yapılardan 4 kat daha fazla direnç sağlar. Ancak çıplak çelik konstrüksiyon (çeliğin genleşme katsayısının yüksekliği nedeniyle) normal bir yangına ancak 10 dakika dayanabilmekte, yapı ikaz vermeden anında çökmektedir (Bozkurt & Erdin, 1997).

Kontrplak yapılar, yüksek darbe enerji seviyelerinde, çoğu uygulamada istenmeyen bir durum olan, yapısal bütünlüklerinin büyük bir kısmını kaybederek delinirler. Daha önceki

çalışmalar, bu tür ahşap esaslı malzemelerin sandviç tasarımlarında kompozit malzemelerle birlikte kullanılmasıyla darbe hasarı toleransının arttırılabileceğini ortaya koymuştur. Isıl işlem görmüş ahşap malzemeler kullanılarak özellikle uzun ömür, geri dönüşüm ve estetik görünüm özellikleri ile zemin ve cephe kaplaması, döşeme gibi iç ve dış mekân uygulamalarının gereksinimleri karşılanabilir.

3.5 Kontrplak ile Masif Ahşabın Karşılaştırılması

TS46 (1986)'ya göre kontrplak: Belirli uzunluk ve çaplardaki ağaç gövdesi kısımlarının özel makinelerde soyulması ile elde edilmiş ince soyma levhaların lif doğrultuları birbirine dik olmak üzere 3, 5, 7 ve daha çok tek sayıda üst üste konularak basınç altında preslenmek suretiyle yapıştırılmasıyla elde edilen malzemedir.

Kontrplak, işlenmiş bir ahşap ürünüdür. Katmanlarını (kaplamalar denir) birbirlerine yapıştırmak suretiyle üretilir. Bu ince kaplamalar kütüklerden döndürülüp soyularak elde edilir. Öte yandan masif ahşap, fazla işçilik gerektirmez. Ağaçlardan elde edilen doğal odundur. Ağaçlar ilk önce kesilip devrilir ve kereste kütükleri bıçkı makineleriyle daha küçük boyutlarda kesilir ve tahta bloklar haline getirilir. Yat yapımında kullanılan yerli ağaçlar; Sarıçam, dişbudak, meşe, kestane, yabancı ağaçlar; afrika maunu, prena çamı, dipterokarpus, Amerikan maunu, firavun inciri, makore, opecpe, orta Amerikan sediri ve tik gelmektedir.

Mukavemet karşılaştırması:

Masif ahşap kontrplakla karşılaştırıldığında daha mukavemetli olduğu kabul edilir, çünkü homojen bir malzemedir. Yüksek kaliteli sert ağaçlar (tik veya sisam gibi yaprak döken ağaçlardan elde edilir), çam ağacı veya mango ağacı gibi yumuşak ağaçlara kıyasla daha yoğun, daha ağır ve daha güçlüdür. Öte yandan kontrplak, suni olarak birbirine yapıştırılmış katmanlardan oluşur ve eğer “tutkalın kayma dayanımı” düşükse, katmanlar ayrılabilir. Bu kontrplak kalitesine de bağlıdır.

Görünüş karşılaştırılması:

Masif ahşap yine kontrplaktan daha iyi gözükmektedir. Örnek olarak tik ağacı sadece güçlü ve dayanıklı olduğu için çok popüler değildir, aynı zamanda düz lif desenleri ve altın kahverengi rengiyle de güzel görünür. Satışı yapılan normal ticari kontrplakların yüzleri dekoratif değildir. Bu nedenle, doğal ahşap kaplamaları veya dekoratif laminatları

kontrplağın üst yüzlerine yapıştırmak suretiyle görünüşünü iyileştirmek için ek maliyet ve çaba gerekir.

Bakım açısından karşılaştırma:

Lamine kontrplak çizilmeye ve neme dayanıklı olmasından dolayı yüzeylerin bakımı daha kolaydır, En çok ince laminatlar zarar görebilir ve değiştirilmesi zordur bu yüzden iyi bir sonuç alabilmek için daha yüksek bir kalınlığa sahip bir laminatın kullanılması daha iyidir. Tik ağacı gibi kaliteli masif ahşap suya dayanıklıdır ve dış mekân mobilyaları için de mükemmeldir. Çok fazla bakım gerektirmez, ancak arada bir (birkaç yılda bir) yaşla birlikte koyulaşır ve bu nedenle orijinal parlaklığını ve rengini yeniden kazanmak için zımparalama ve ahşap cila uygulaması gerekir.

Ömür karşılaştırması:

Her iki durumda da kullanılan ahşaba göre değişir. Su geçirmez sınıf kontrplak, ticari neme dayanıklı (MR) kontrplaktan daha iyidir. Denizel kontrplak, ikisinden bile daha iyidir. Kontrplak ne kadar iyi kalitede olursa, ömrü o kadar uzun olur. Masif ahşabın dayanıklılığı kullanılan ahşaba bağlıdır. Sertağaç (tik ağacı veya sisam ağacı gibi), mango ağacı veya çam ağacı gibi yumuşak ağaçlardan daha güçlü ve daha dayanıklıdır. Masif ahşaba ısıtma işlemi yapılarak ömrü daha da arttırılabilmektedir.

Maliyet karşılaştırılması:

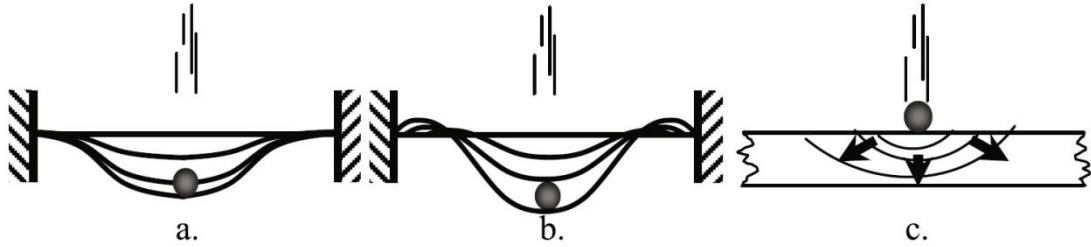
Kaliteli masif ahşap kontrplak ile karşılaştırıldığında çok daha pahalıdır. Bunun temel nedeni yüksek talep ve düşük arzıdır. Ekim yapılan alanlarındaki ağaçların olgunlaşması uzun zaman alır bu yüzden orman rezervlerinden odun arzı, ekolojik kaygılar nedeniyle kontrol edilmeli ve sınırlı tutulmalıdır. Bu düşük masif ahşap ihtiyacı, sunta levhalar (talaştan yapılmış) ve MDF (ahşap liflerinden yapılmış) gibi yeni tasarlanmış ahşap ürünlerinin mobilya pazarında yer edinmesinin bir nedeni olmuştur.

Özetlemek gerekirse, doğal masif ahşabın birçok açıdan kontrplaktan daha iyi olduğunu söylenebilir. Tek önemli dezavantajı maliyetinin fazla olmasıdır (Plywood vs Solid wood, 2019).

4. SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZDA DARBE DAVRANIŞLARI VE HASAR MEKANİZMALARI

4.1 Düşük Hızda Darbe (DHD)

Malzemelerin darbe etkisi genellikle düşük hız (büyük kütle), orta hız, yüksek / balistik hız (küçük kütle) ve hiper hız kısımlarına ayrılır. Şekil 4.1 (a) 'da gösterildiği gibi düşük hızda darbe (DHD) olarak da bilinen büyük kütle çarpması, tipik olarak 10 m/s'nin altındaki hızlarda meydana gelen nesnelere düşmelerinden kaynaklanan durumlardır. Şekil 4.1 (b)'de ikinci derece patlama kaynaklı parçacıklar, kasırga ve hortum yıkıntıları ve yollar ve pistlerdeki yabancı cisim parçaları orta hıza girdiği kabul edilir. Orta hızdaki darbe olayları 10 m/s ile 50 m/s aralığında meydana gelir, düşük ve yüksek hızda darbe etkisinin özelliklerini taşır. Şekil 4.1 (c)'de yüksek hızda (balistik) darbe, genellikle hafif silahların ateşlenmesi veya patlayıcı savaş başlıklarının şarapnelinin bir sonucudur. Yüksek hızda darbe, malzemenin kalınlığı boyunca gerilme dalgasının yayılımının hâkim olduğu, yapının cevap verecek zamanının olmadığı, lokal bir hasara yol açan tepkidir. Darbe olayı stres dalgaları sınıra ulaşmadan geçtiğinden sınır şartları etkileri göz ardı edilebilir. Yüksek hızda darbe 50 m/s ile 1000 m/s arasında değişmektedir ve hiper hız etkisinde > 2-5 km/s'de, mermi çok yüksek hızlarda hareket etmektedir ve hedef malzeme bir sıvı gibi davranır.



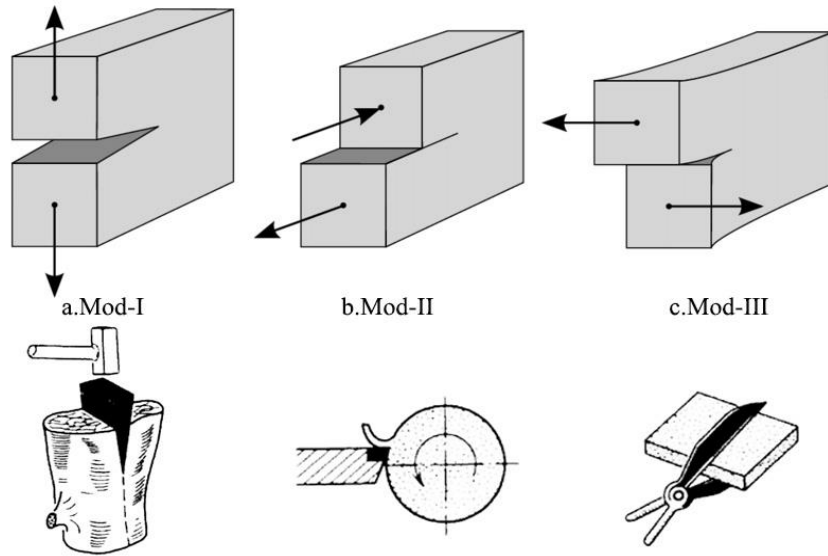
Şekil 4.1: a) Düşük hızda darbe, b) orta hızda darbe, c) yüksek hızda darbe.

4.2 Sandviç Kompozitlerde Düşük Hızda Darbe

Bir sandviç kompozit, düşük yoğunluklu bir çekirdek ile ayrılmış yüksek mukavemetli ve modüllü dış tabakalardan oluşur. Çekirdek yapı genellikle hafiftir ve kalınlığı, dış tabakalardan daha fazladır. Her iki dış tabaka genelde malzeme ve kalınlık olarak aynıdır, ancak tabakaların kalınlık, malzeme veya elyaf oryantasyonu bakımından farklı olabilir. Dış tabakalar düzlem-içi ve yanal (eğilme) yüklerine dayanır. Çekirdek yapının birincil işlevi kaymaya ve enine sıkıştırma yüklerine karşı koymaktır. Dış tabakalar, bileşenler arasında yük aktarımı sağlamak için çekirdek yapıya yapışkanla birleştirilmiştir. Bir

sandviç yapının çekirdek yapısı hemen hemen herhangi bir malzeme veya mimariye sahip olabilir, ancak genel olarak köpük veya katı, bal peteği, kafes ve oluklu olmak üzere dört tipe ayrılır.

Bir sandviç kompozitte tipik DHD hasarı şu şekilde gerçekleşir: darbeli dış levha enine bir kesme kuvvetine maruz kalır. Dış levha penetrasyona direnirse, darbe alan dış tabaka ile sınırlı geniş bir hasar vardır. Aralarındaki gerilme farklılığından dolayı darbe noktasındaki dış levha ile çekirdek arasında bir miktar ayrılma meydana gelebilir. Daha yüksek darbe enerjisinde, impaktör dış tabakaya nüfuz (penetre) eder ve çekirdek tabakaya ilerler, çekirdek hasarı; hücre ezilmesi, kesme hasarı ve dış tabakanın çekirdekten ayrılması (debonding) şeklindedir. İmpaktör tarafından yüklenen dış levhanın çekme tarafı arka yüzde çekme eğilmesine neden olur. Sonuç olarak, çekirdek ile arka tabaka arasındaki ayrılma alanı uzatılmış olur. İmpaktörün tam nüfuz etmesinden önce arka tabakada belirgin şekilde ayrılma meydana gelir.



Şekil 4.2: a) Mod-I açılma veya çekme (tension), b) Mod-II kayma (sliding/shear), c) Mod-III kesilme veya yırtılma (tearing) kırılma modları (Parton, 1992).

Bir sandviç kompozitin darbe hasarı modu panelin desteklenme durumuna, atılan cismin veya vuran impaktörün şekline, dış levhaların ve çekirdek malzemenin geometrik ve malzeme özelliklerine bağlıdır. Bir dış tabaka ince olduğunda (çekirdek kalınlığının onda birinden küçük), sehim büyük olma eğilimindedir (dış tabaka kalınlığının katları şeklinde) ve yüksek düzlem içi çekme kuvvetleri çekirdek tabakada Mod-I çekme çatlağına neden

olur (Şekil 4.2a). Dış tabaka kalın olduğunda (çekirdek kalınlığının yarısı ile beşte biri arasında), sehim küçüktür (dış tabaka kalınlığından az). Atılan cisim çevreleyen bölgelerdeki enine kayma kuvvetleri geniş, büyük ve çekirdek yapıda enine kayma çatlağına neden olur.

Yeni binalar, bir köpük çekirdek yapıyı saran kontrplak dış tabakaların sandviç tasarımlarını içeren yapısal yalıtımlı panellere (SIP) sahiptir. Bunlar, kasırgaların yüksek hızdaki rüzgârıyla gelen enkaz parçacıklarına karşı dayanıklı yapılar olarak pazarlanmaktadır. Fakat düşük hızda, SIP'ler, perforasyon gösterebilir. Kontrplak dış tabakalar, dış tabakaya kolayca nüfuz edebilen uçan ahşap kalıntılarına karşı hassastır. Polistiren köpük, darbe altında kademeli ezilmeye uğrar. SIP'ler yerine daha yeni bir gelişme ise polistiren köpük çekirdek ve E-cam/polipropilen (PP) dış tabakaya sahip olan kompozit yapısal yalıtımlı panellerdir (CSIP). E-cam/PP dış tabaka, SIP'lerde kullanılan kontrplaklara kıyasla penetrasyona karşı daha yüksek direnç gösterir. Aynı DHD yüklerinde, CSIP tasarımları darbeye daha etkin bir şekilde direnç gösterir (Şekil 4.3).



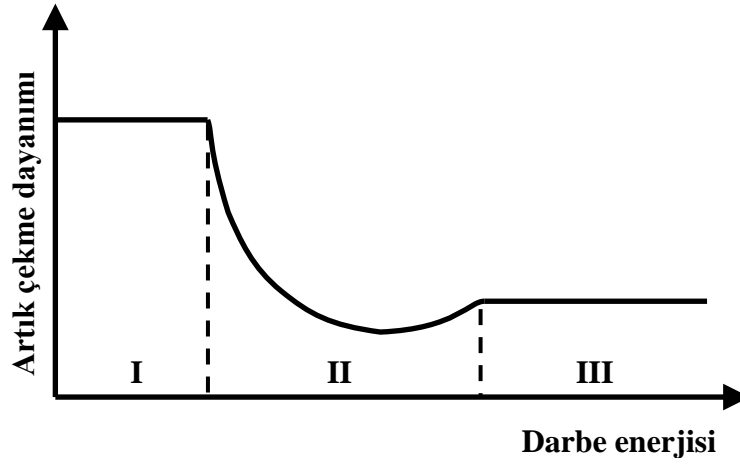
Şekil 4.3: Yapısal Yalıtımlı Panel (SIP).

4.3 Darbe Sonrası Dayanım

Kompozit malzemelerin darbe hasarı konusundaki hassaslığı nedeniyle, darbe sonrası dayanımda ve yapısal bütünlükte dramatik bir kayıp meydana gelebilir. Hasar toleransı terimi, kompozit malzemelerin darbe sonrası uygulama kabiliyetini ifade eder. Ancak açıkça görünür darbe hasarı (BVID) bile %50'ye varan oranda dayanım azalmasına neden olabilir. Çekme, basma, eğilme ve yorulmadaki artık kuvvetler, baskın hasar moduna bağlı olarak değişen derecelerde azalacaktır.

4.3.1 Artık Çekme Dayanımı

Artık gerilme dayanımı Şekil 4.4'te gösterildiği gibidir. I. bölgede, darbe enerjisi, hasar başlaması için eşik değerin altında olduğundan herhangi bir hasar meydana gelmez. Eşik değere ulaşıldığında, hasar derecesi büyüdükçe artık gerilme dayanımı II bölgesinde hızlı bir şekilde minimuma düşer. Çarpma hızı temiz bir delik açarak perforasyonun gerçekleştiği noktaya ulaştığından bölge III sabit bir artık dayanım değeri gösterir. Bu bölgede artık çekme dayanımı, impaktör çapındaki bir deliğe eşit olacak hasar dikkate alınarak tahmin edilebilir. Bölge II'deki minimum değer, bölge III'deki sabit değerden daha azdır çünkü daha noktasal (daha temiz bir delikle sonuçlanan) ve daha yüksek hızda oluşan hasardan daha geniş bir alana yayılır. Fiberler çekme yükünün büyük bir kısmını boylamasına taşıdıklarından, fiber hasarı kritik hasar modudur.



Şekil 4.4: Darbe sonrası artık çekme dayanımı.

4.3.2 Artık Basma Dayanımı

Darbe sonrası basma (DSB), kompozit laminatların artık özelliklerini değerlendirmenin en yaygın yollarından biridir. Bunun temel nedeni, basma mukavemetinde büyük düşümlere neden olan delaminasyondan kaynaklanan lokal dayanım azalmasıdır. Delaminasyon, düşük enerjili darbeler ile oluşabildiğinden, BVID için basma sırasında büyük kuvvet azalmaları meydana gelebilir. Delaminasyon, laminatı, orijinal lamineden daha düşük bir eğilme rijitliğine sahip olan ve eğilme yüklerine karşı daha az dirençli alt laminatlara böler. Basma yükü altında, bir delaminasyon üç modtan birinde burkulmaya neden olabilir: laminatın genel dayanım azalması/burkulma, lokal dayanım azalması (daha ince alt laminatın burkulması) veya ikisinin bir kombinasyonu şeklindedir. Hasar modu, delaminasyon uzunluğu arttıkça genelden, lokale, daha sonrada karma moda geçer. Bazı

durumlarda, genel burkulmayı önlemek için numuneyi destekleyici burkulma önleyici sistemler kullanılır, bu sırada lokal dayanımın azalmasını engellememelidir.

4.4 Darbe Hasar Toleransının Arttırılması

Kompozit malzemelerin hasar toleransını arttırmak için çeşitli yaklaşımlar kullanılmıştır.

- Fiber-matris arayüzey yapışma kontrolü.
- Matris modifikasyonları (kauçukla sertleştirme gibi).
- Laminasyon tasarımı (laminat istifleme dizisinin seçimi).
- Kalınlık boyunca örgü, üç boyutlu dokuma ve tabaka içi dikiş ile takviye yapılması.
- Fiber hibritlenmesi ve yüksek gerilimli fiberlerin kullanımı.

4.5 Düşük Hızda Darbe Etkisinde Hasar Mekanizmaları

Fiber takviyeli plastik (FRP) laminatların heterojen ve anizotropik doğası, farklı hasar modlarının oluşmasına katkıda bulunur. Çoğu durumda, bunlar; (1) çekme, basma veya kayma nedeniyle elyaflara paralel olarak meydana gelen matris çatlama, (2) interlaminar gerilmelerin bir sonucu olarak katların adezyon ayrılması ve/veya delaminasyonu; (3) elyaf kırılması ve burkulması ve (4) penetrasyon. Hasar modları arasındaki etkileşim hasar modunun başlamasını ve ilerlemesini etkiler.

Matris hasarı: Matris hasarı, enine DHD ile tetiklenir ve genellikle matris çatlama, fiber/matris ayrılması ve delaminasyon başlaması şeklinde olur. Düşük darbe enerji seviyelerinde (1 ila 5 J) ancak görülebilir veya minimum hasar oluşur. Matris çatlakları genellikle tek yönlü fiber kompozitlerde fiber yönüne paralel düzlemlerin doğrultusundadır. Üst tabakalardaki matris çatlakları, impaktörün temas ettiği kenarlarda başlar. Kayma çatlakları, malzemeden geçen çok yüksek enine kayma gerilmesiyle oluşur. Enine kayma gerilmeleri, temas kuvveti ve temas alanı ile ilgilidir. Çekme tarafındaki (darbenin zıt tarafı) çatlak, eğilme çatlakları olarak adlandırılır, çünkü çekme yönündeki yüksek eğilme gerilmeleri ile uyarılır ve karakteristik olarak laminata diktir. Eğilme gerilmesi, laminatın eğilme deformasyonu ile yakından ilgilidir. Matris kırılma tipi, etkilenen numunelerin genel özelliklerine bağlıdır. Uzun ince numuneler için, alt tabakalardaki eğilme çatlakları, aşırı enine sehim nedeniyle meydana gelir ve sonra membran etkileri baskın olur, oysa kısa kalın örnekler daha rijit ve dolayısıyla daha yüksek

pik temas kuvvetlerine, impaktörün altında darbe tarafı katmanlarında enine kayma çatlaklarına neden olur.

Delaminasyon: Delaminasyon, katmanların arasındaki reçine bakımından zengin alanda gerçekleşen katlardaki ayrılmadır. Delaminasyon, bitişik katmanlar arasındaki eğilme rijitliği uyumsuzluğunun, yani katmanlar arasındaki farklı elyaf yönelimlerinin bir sonucudur. Delaminasyon alanı genel olarak dikdörtgen şeklinde olup, ana eksen arayüzün altındaki katmanın elyaf oryantasyonu ile çakışmaktadır. 0/90 laminatlar için bir fıstık şekli hasarı tipik olarak oluşur. Eğilmeye bağlı gerilmeler delaminasyonun ana nedenidir. Bazı çalışmalar, iki bitişik laminat arasındaki bir eğilme uyumsuzluğu katsayısı tanımlamıştır. Uyuşmazlık ne kadar büyük olursa, delaminasyon alanı o kadar büyük olur. Bu aynı zamanda malzeme özelliklerinden, istifleme sırasından ve laminat kalınlığından da etkilenir.

Delaminasyonun başlangıcı ve matris kırılması ile etkileşimi: Enine darbenin neden olduğu delaminasyon, bir eşik enerjisine ulaşıldıktan sonra meydana gelir. Delaminasyon, bir matris çatlaklığı varlığında gelişir. Delaminasyonlar her zaman arayüz bölgesinde tam olarak ilerlememektedir, ancak arayüze bitişik olarak yayılabilmektedir. Delaminasyon, ağırlıklı olarak, matris çatlaklarının varlığının neden olduğu düzlem dışı normal gerilmeler ve arayüz boyunca yüksek interlaminar kayma gerilmeleri nedeniyle Mod I kırılması (karışık mod kırılması da olabilir) olarak başlatılmaktadır. Matris çatlaklığı ile başlatılan delaminasyon tipik olarak arayüzler içindeki interlaminar normal ve kayma gerilmelerinin oluşmasından kaynaklanmaktadır. Eğilme çatlakları ve kayma çatlakları, delaminasyonu başlatabilir, ancak kayma çatlaklarının neden olduğu delaminasyon, kararsızdır ve eğilme çatlaklarının neden olduğu delaminasyonlar, sabit bir şekilde ve uygulanan yük ile orantılı olarak büyür.

Delaminasyon büyümesi: Delaminasyon büyümesinin, birim alanı başına absorbe ettiği enerji sabittir. Interlaminar kırılma tokluğu, delaminasyon boyutundan bağımsızdır ve delaminasyon alanı, üretilen pik darbe kuvvetinden tahmin edilebilir. Pik kuvvet ve delaminasyon alanı doğrusal orantılıdır. Mod II kırığı dominant hasar ilerleme şeklidir (Şekil 4.2b).

Fiber hasarı: Fiber hasarı, matris çatlaması ve delaminasyonundan sonra ortaya çıkar. Fiber hasarı, lokal olarak yüksek gerilmeler ve impaktör batma etkileri (çoğunlukla kesme kuvvetleri tarafından yönetilir) ve yüksek eğilme gerilmeleri nedeniyle darbe almayan yüzde impaktörün hemen altında meydana gelir. Fiber hasarı, penetrasyon moduna öncülük eder.

Penetrasyon: Penetrasyon, makroskopik bir hasar şeklidir ve fiber hasarı kritik bir dereceye ulaştığında gerçekleşir ve impaktörün malzemeye tamamen nüfuz etmesini sağlar. Darbe enerjisi penetrasyon eşiği, numune kalınlığı ile birlikte hızla yükselir. Laminat penetrasyonu sırasında ana enerji absorbe etme formları; kesme (shear-out/shear plug), delaminasyon ve elastik eğilmedir. Bu mekanizmalardan “kesme” levha kalınlığına bağlı olarak %50-60'tır. Bükümsüz sürekli filamentler demeti (tow) ebadı, fiber ebadı, oryantasyon, dokuma mimarisi, matris tipi ve arayüz gibi çeşitli faktörlerin penetrasyon işlemi üzerinde etkisi vardır (Abrate, 2011).

4.6 Denizel Kompozitlerde Kullanılan Malzemelerin Darbe Performansları

FRP ve FRP sandviç malzemelerinin tekne endüstrisine girişi ile daha hafif, daha rijit ve daha hızlı teknelerin geliştirilmesinin yolu açılmıştır. Bu, genel olarak, darbe performansının düşmesine neden olmuştur. Daha yüksek hız, daha yüksek darbe enerjisi doğurmuştur. Daha rijit yapılar genellikle hasardan önce daha az darbe enerjisini emmektedir. Bu nedenle, modern FRP kompozit deniz yapılarında darbe yükleri önemli bir husustur.

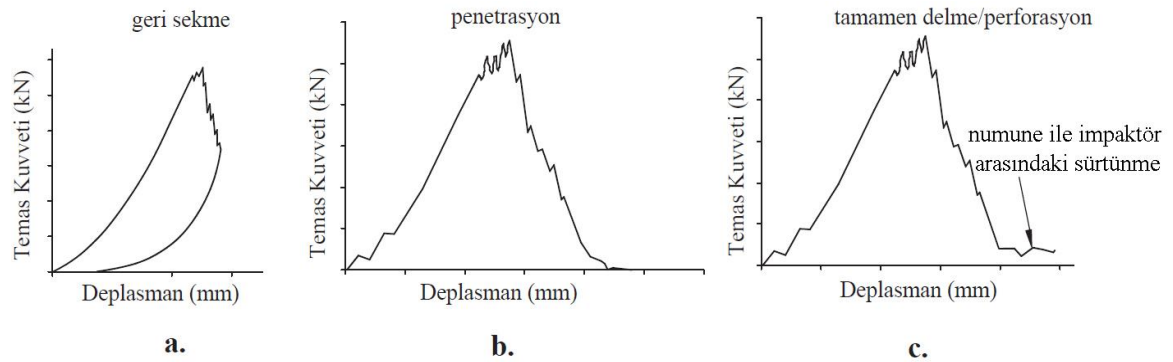
Teknenin darbe almasının karmaşıklığı ve değişkenliği, tasarım amaçları için bir darbe yükü tanımlamayı çok zorlaştırır. Ayrıca, FRP kompozit malzemelerin bir darbenin yüksek yük oranlarına maruz kalması durumunda davranışları hakkında bilgi eksikliği vardır ve analitik yöntemler şu anda nispeten çok gelişmemiştir. Dolayısıyla, darbe yüklerini yapısal analiz ve tasarım işlemlerine açıkça dâhil etmek zordur. Bunun yerine, darbe testleri ve yapısal tepkiler hakkında temel bilgiler, üstün darbe performansına sahip yapıların tasarlanmasında yol gösterici olarak kullanılmaktadır.

Kompozit bir yapının darbe cevabı dört kategoriye ayrılabilir. İlk olarak, etkinin tüm enerjisi elastik deformasyona uğrayan yapı tarafından emilir ve daha sonra yapı orijinal konumuna veya şekline döndüğünde serbest bırakılır. Daha yüksek enerji seviyeleri

yapının enerjii elastik olarak emme kabiliyetini açar. Bir sonraki seviyede enerjinin bir kısmı yapının elastik deformasyonu, geri kalanı da kalıcı plastik deformasyonu tarafından emilir. Daha yüksek enerji seviyeleri yapıya hasar verecek enerji emilimi ile sonuçlanır. Son olarak, darbe enerji seviyeleri yapının limitini açabilir ve bu da büyük bir hasara yol açabilir. Elastik deformasyonda emilebilecek maksimum enerji, malzemelerin rijitliğine ve yapının geometrisine bağlıdır. Katmanlı yapının zarar görmesi, reçine çatlaması, katmanlar arasındaki delaminasyon, reçine elyaf ara yüzünün ayrılması ve katı FRP tabakalar için elyaf kırılması ve ek olarak sandviç yapılarda dış tabakların çekirdek malzemeden ayrılması şeklinde olabilir; Katı bir tabakanın absorbe edebileceği enerji miktarı ve yapısal hasar, reçine özelliklerine, elyaf tiplerine, kumaş tiplerine, elyaf oryantasyonuna, imalat tekniklerine ve darbe oranına bağlıdır (Associates, 1999).

4.6.1 PVC Köpük ve Sandviç Yapıların Darbe Özellikleri

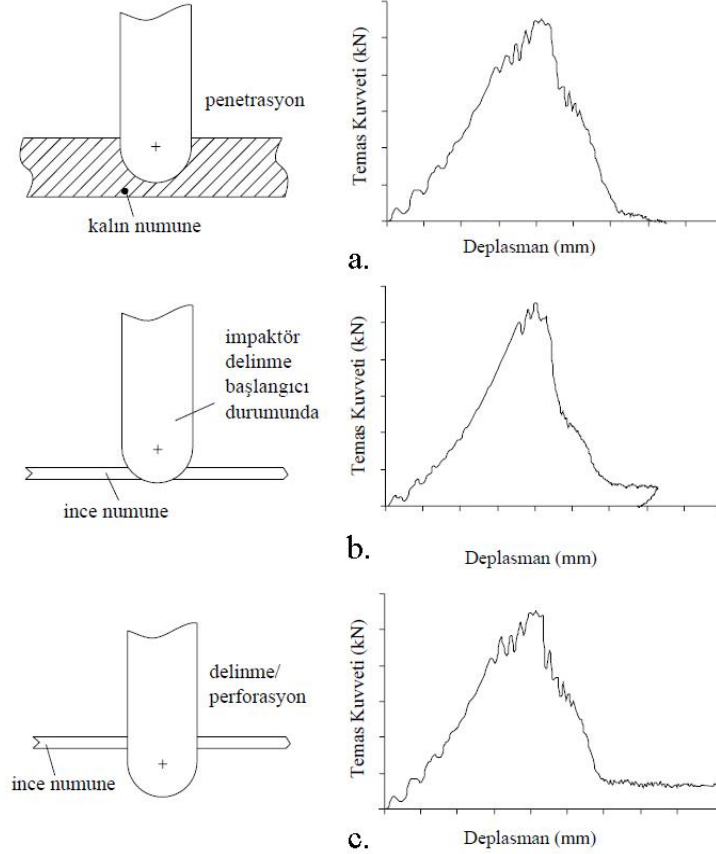
Deniz ortamlarındaki yüklenme koşulları nadiren statiktir ancak oldukça dinamiktir ve genellikle yerel olarak yoğunlaşır. Darbe testi, malzemelerin ve yapıların dinamik yüklemeye tepkisini belirlemek için kullanılan ortak bir laboratuvar tekniğidir. Kompozitler için en yaygın teknik, silindirik bir tüpe bağlı yük kullanan, ağırlık düşme tertibatıdır (impaktör). İmpaktör ucu (genellikle yarım küre veya düz), penslerle sabitlenmiş bir plaka örneğine darbe vurur ve darbe olayı boyunca ivmesi ölçülür. İvmelenme, darbe kuvveti, yer değiştirme ve emilen enerjiyi belirlemek için kullanılır.



Şekil 4.5: Düşük hızda darbe olayında tipik yük-deplasman eğrileri
a)geri sekme, b)penetrasyon, c)perforasyon (Atas & Sevim, 2010).

Darbe testlerinde gözlemlenen çeşitli tipik yük-deplasman eğrileri, geri sekme, penetrasyon, perforasyon durumları şekil 4.5 (a-c)'de gösterilmiştir (Atas & Sevim, 2010).

Şekil 4.5 (a) 'da, eğride deney sonunda deplasman azalmıştır, bu da impaktörün penetrasyondan (nüfuziyet) ziyade numuneden geri sektiğini gösterir. Şekil 4.5 (b) 'de impaktörün malzemeye nüfuz ettiği ve içinden geçip arka yüzünden çıkabileceği durumdaki tipik bir eğriyi gösterir. Şekil 4.5 (c) 'de malzemenin darbeden sonra delindiği durumu gösterir. Pik yaptığı noktaya kadar, bu eğri şekil 4.5 (b) ile aynı görünür, ancak pik sonrası davranışta farklılık gösterir. Numune delindikten sonra numune ile impaktör arasındaki sürtünme nedeniyle impaktör düzensiz bir şekilde yavaşlar.



Şekil 4.6: Düşük hızda darbe olayında impaktör ile temas kuvveti-deplasman ilişkisi a)kalın bir levhada penetrasyon, b)ince bir levhada delinme başlangıcı ve c) ince bir levhada tamamen delinme (Atas & Sayman, 2008).

Penetrasyon eşiği, impaktörün numuneye geri sekmeden çarptığı andaki darbe enerjisi olarak tanımlanır. Delme eşiği (perforation) ise, impaktörün silindirik kısmının ucunun numunenin arka yüzeyine ulaşmasına kadarki absorbe enerji olarak tanımlanır Şekil 4.6 (a)'da gösterildiği gibi, yarı-küresel şeklindeki ucu, yeterince kalın bir numuneye tamamen gömüldüğü zaman penetrasyon gerçekleşmelidir. Numune, impaktör ucunun yarıçapından daha ince olduğunda böyle bir penetrasyonun gözlemlenmesi zor olmaktadır. Penetrasyon gerçekleştiğinde numune delinmeye çok yakın olmalıdır. Şekil 4.6 (b)'de gösterildiği gibi, impaktörün, numunenin arka yüzeyinde çok sınırlı bir delik açtığı

zamanda geri sekme oluşmadığı gözlenmiştir. Şekil 4.6 (c)'de ise impaktör yarı-küresel ucunun arka tabakadan çıkmasıyla (tam delinme) açık bir kuvvet-deplasman eğrisi meydana gelmektedir (Atas & Sayman, 2008).

Beklenildiği gibi, daha yoğun köpükler daha yüksek temas kuvveti (pik noktası) ve enerji emilimi gösterir. Çoklu tepe noktalarının varlığı, düzensiz deformasyon ve hasar bölgesinin büyümesi nedeniyle çok aşamalı bir hasar sürecini gösterebilir. Görüntüleme ve ultrasonik muayeneye yapılan çarpma analizi sonrası, impaktörün düşük yoğunluklu köpüklere nüfuz ettiğini ortaya çıkarırken, daha yüksek yoğunluklu köpüklerde çarpma tertibatının kısmi penetrasyonuna bağlı olarak hasarlı bölgede kesme gözlenmiştir (Colloca, Dorogokupets, Gupta, & Porfiri, 2012).

Sandviçlerin darbe davranışının daha iyi anlaşılması, çekirdek ve dış tabakaların deformasyon hızı (strain-rate) duyarlılığı özellikleri ve hasar mekanizmaları bilgisi ile elde edilebilir. Sandviçlerdeki hasar, çekirdeğin kırılma özellikleri ve dış plakalara destek derecesi ile kontrol edilir. Gevrek çekirdek malzeme durumunda, kalınlık boyunca kayma çatlakları belirgindir. Daha sert çekirdek malzeme ile kayma çatlamasından kaçınılabılır. Bununla birlikte, daha sert çekirdek, düşük modüllü köpüklerde yaygın olarak görülen ön tabakada burkulma hasarına neden olur. Diğer durumlarda, dış tabakalarda çekme yırtılması arka yüzde meydana gelebilir. Delaminasyon hasarı, daha yüksek modüllü köpükler için hâkimdir. Yüksek hızlı fotoğraflar kullanılarak yapılan dikkatli gözlem, tüm bu hasar mekanizmalarının tek bir deneyde bulunabileceğini ortaya koymuştur. PVC köpük çekirdekli sandviç kirişlerin darbe tepkisi üzerine yapılan deneylerde, maksimum hasar arka tabakanın çekme yırtılmasından kaynaklanmış, eşzamanlı olarak çekirdek kırılması ve dış tabakaların delaminasyonu gözlenmiştir (Tagarielli, Deshpande, & Fleck, 2007).

4.6.2 Darbe Tasarım Hususları

Darbe tasarımının genel ilkeleri aşağıdaki gibidir. Bir darbenin kinetik enerjisi:

$$K. E. = \frac{mv^2}{2} \quad (4.1)$$

v=çarpışma hızı ve m, teknenin veya impaktörün (hangisi daha küçükse) kütlesidir.

Orta noktasından yüklenen izotropik kiriş tarafından absorbe edilen enerji:

$$K. E. = \int_0^L \frac{M^2}{2EI} ds \quad (4.2)$$

L= destek aralığı, M=Moment, E= Elastisite Modülü, I=Atalet Momenti

Kompozit plakadaki küçük deformasyonlar için ifade basitleştirilebilir:

$$K. E. = \frac{S^2 ALr^2}{6Ec^2} \quad (4.3)$$

S=Gerilme, A=kesit alanı, r= kirişin derinliği c= nötr eksenden kirişin en dış fibere olan mesafesi

Destek aralığının arttırılması, dış tabaka stres seviyelerini düşürecek ve darbe enerjisi emilimini arttıracaktır, ancak eğilme rijitliği azalır, böylece statik yük gerilme seviyeleri artar.

Sandviç yapı için:

$$M = \frac{SI}{d} \quad (4.4)$$

$$I \approx \frac{btd^2}{2} \quad (4.5)$$

S= Dış tabakadaki gerilme, d= çekirdek kalınlığı, b=kiriş genişliği, t=tabaka kalınlığı

Böylece bir sandviç kirişin enerji emilimi şöyledir:

$$K. E. = \frac{S^2 btL}{4E} \quad (4.6)$$

Bu ilişkiden, aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Dış tabakaların Elastik modülünün arttırılması, dış tabakaların gerilme seviyesinin yükselmesine neden olur. Ağırlık aynı kalır ve eğilme rijitliği artar;
- Dış tabaka kalınlığının t'nin arttırılması dış tabaka gerilme seviyesini azaltır, ancak aynı zamanda eğilme rijitliğini ve ağırlığı da arttırır;
- Destek aralığını L'yi arttırmak dış tabaka gerilme seviyesini azaltır. Ağırlık aynı kalır, ancak eğilme rijitliği azalır ve
- Tek başına çekirdek kalınlığı, darbe emilimini etkilemez.

Destek aralığının arttırılması, dış tabaka stres seviyelerini düşürecek ve darbe enerjisi emilimini arttıracaktır, ancak eğilme rijitliği azalır, eğilme rijitliği çekirdek kalınlığının arttırılmasıyla korunabilecektir.

Jones (1983), çalışmasında yüksek yoğunluklu köpük çekirdek panellerin, düşük yoğunluklu köpük çekirdekli özdeş panellere göre daha iyi performans gösterdiğini, balsa ve Nomex® gibi sert çekirdek yapıların da köpük kadar başarılı olmadığı görmüştür. Bu, mukavemetin çekirdek malzemelerin darbe performansı için modülden daha önemli bir özellik olduğunu gösterir. E-cam, kevlar ve karbon fiber kumaştan yapılmış panellerin

arasındaki performans farkı az olmuş, karbon diğer ikisinden biraz daha iyi performans göstermiştir. Araştırmacı daha yüksek eğilme rijitliğine sahip karbon fiber tabakanın darbe yükünü köpük çekirdeğin büyük bir alanına dağıttığını, dolayısıyla çekirdek malzeme hasarının bu panel için daha düşük olduğunu söylemiştir. Epoksi, polyester ve vinil ester reçineleri de karşılaştırıldığında performanstaki farklılıklar az olmuş, vinil ester en iyi performansı sağlarken, ardından polyester ve epoksi gelmiştir. Genel darbe tasarımı kavramları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Darbe enerjisi absorbe etme mekanizmaları;

- Elastik deformasyon;
- Matris çatlaması;
- Delaminasyon;
- Fiber kırılması;
- Arayüz ayrılması ve
- Çekirdek kesme hasarı.

Hasar mekanizması kompozit malzemeyi sınırlamaktadır. Farklı malzemeler arasındaki uyum bu performansı önemli ölçüde arttırabilir.

- Kevlar® ve S-cam, E-cam ve karbon fiberlerden daha iyidir;
- Vinil ester, epoksi ve polyesterden daha iyidir;
- Köpük çekirdek, Nomex® ve Balsa'dan daha iyidir;
- Yarı-izotropik tabakalar, ortotropik ten daha iyidir;
- Çok sayıda ince kumaş katlardan oluşan yapı daha az sayıdaki kalın kumaş katlardan oluşan yapıdan daha iyidir (Associates, 1999).

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1 Dişbudak, İroko ve Çam'ın Eğilme, Basma ve Darbe Testleri

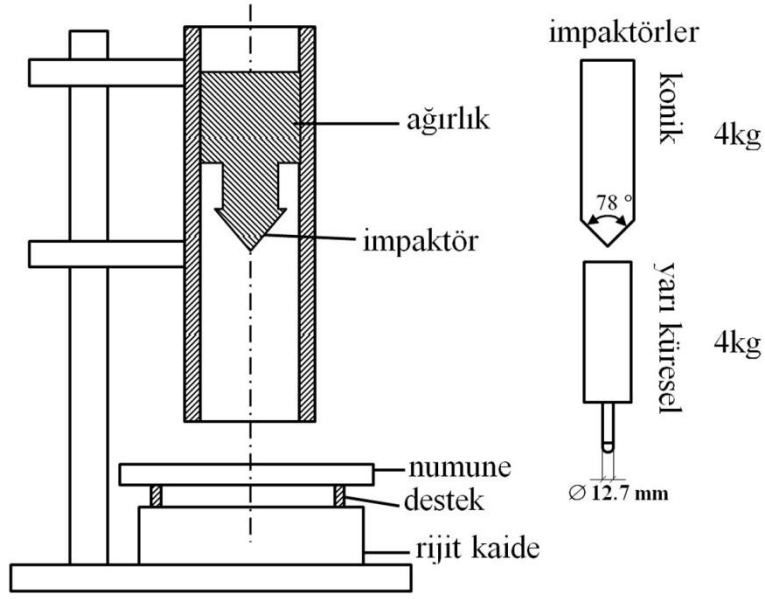
Bu çalışmanın ilk aşamasında, ısıl işlem görmüş dişbudak, iroko ve çamın mekanik ve darbe performansları karşılaştırılmıştır. Dişbudak, iroko ve çam malzemelerinin mekanik özellikleri DIN standartlarına göre ölçülmüş ve Tablo 5.1'de verilmiştir.

Hem basma hem de eğilme testleri için en az 5 numune test edilmiştir. 15 mm x 30 mm x 300 mm ebatlarında (kalınlık x genişlik x destek aralığı) ısıl işlem görmüş ahşap numunelere DIN EN 310 standardına göre üç nokta eğilme testi yapılmıştır. (DIN, 1993). Basma deney numunelerinin boyutları, DIN EN 52185 standardına göre 60 mm x 20 mm x 20 mm (lif yönüne paralel) olarak belirlenmiştir (DIN, 1976).

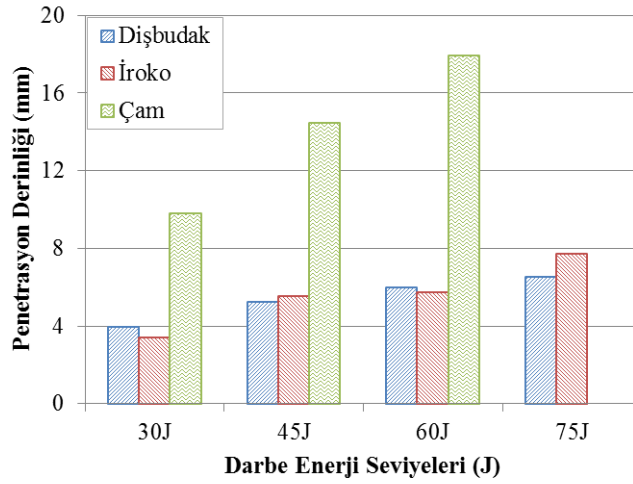
Tablo 5.1: Isıl işlem görmüş ahşap malzemelerin mekanik özellikleri.

Malzeme	Marka	Özgül Ağırlık (kg/m ³)	Basma Mukavemeti, Liflere paralel (MPa)	Eğilme Mukavemeti, Liflerle aynı yönde (MPa)	Eğilme Modülü (MPa)	Nem oranı (%)
DİŞBUDAK	Novawood	623	71.5	92.9	15782	4-6
İROKO	Novawood	675	70	107	14887	4-6
ÇAM	Novawood	480	36.9	59.1	7425	4-6

Ön çalışma olarak üç tip ısıl işlem görmüş masif dişbudak, iroko ve çam ahşap numuneler üzerinde düşük hızda darbe (30J, 45J, 60J, 75J) testleri yapılmıştır. 12.7 mm yarı-küresel (YK) uç çapına sahip 6 kg'lık çelik impaktör 0.5, 0.75, 1.0 ve 1.25 m yükseklikten bırakılarak darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Ağırlık düşme testleri, Nordtest test yöntemiyle (NT MECH 042) tanımlanan bir test cihazı ile yapılmıştır (Nordtest, 1998) (Şekil 5.1). Tüm enerji seviyelerinde iroko ve dişbudak numunelerin penetrasyon derinliklerinin çam numunelerden daha düşük olduğu ölçülmüştür (Şekil 5.2). Dişbudak ile iroko karşılaştırıldığında darbe, statik basma ve üç nokta eğilme testlerinde ölçülen değerlerinin yakın ve dişbudağın irokoya göre hafif olmasından yani spesifik mukavemetinden dolayı dış tabaka olarak dişbudak kullanılmasına karar verilmiştir. Hafifliğinden dolayı da ara tabaka olarak çam, dişbudak ile karşılaştırılmıştır.

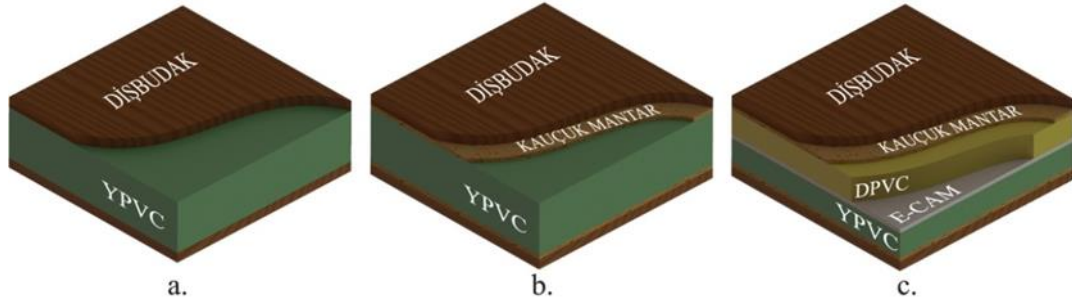


Şekil 5.1: Darbe test cihazı ve impaktörlerin şematik çizimleri.

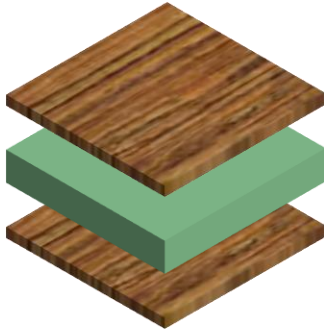


Şekil 5.2: Dişbudak, iroko, çam ahşap numunelerin farklı enerji seviyelerindeki penetrasyon derinlikleri.

5.2 TKS, TKSK, İKSK Tasarımlarında Kullanılan Malzemeler ve Üretim Yöntemi

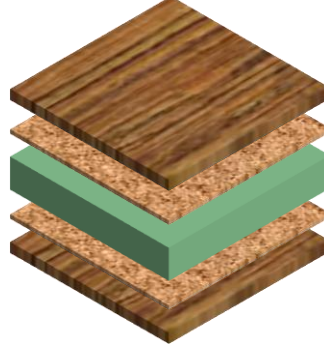


TKS tasarımı



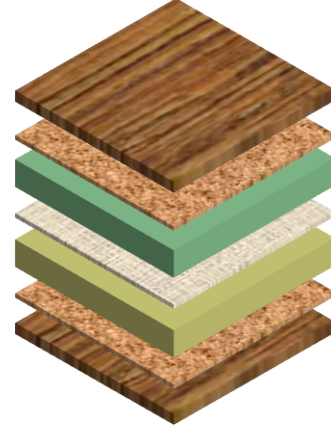
a. 15-25 mm kalınlıkta yüksek yoğunlukta PVC köpük, Y15 and Y25 numuneleri

TKSK tasarımı



b. 15-25 mm kalınlıkta yüksek yoğunlukta PVC köpük, 2-5 mm kauçuk-mantar tabaka Y15K2, Y15K5, Y25K2 numuneleri

İKSK tasarımı



c. 12 mm kalınlıkta yüksek ve düşük yoğunlukta PVC köpük, 2 mm kauçuk-mantar tabaka, 1 mm iç E-cam tabaka YYK2, DDK2, YDK2, DYK2 numuneleri

Şekil 5.3: Üç farklı sandviç tasarımın patlatılmış şematik çizimleri.

Farklı ahşap malzemeler arasında yapılmış olan statik ve düşme testlerinden sonra dış tabaka olarak ısıtılmış işlem görmüş dişbudak seçilmiş, düşük hızda darbe enerjisini emmek ve çarpma noktasında lokal köpük kırılmasını en aza indirmek için dış ahşap tabaka ile köpük çekirdek arasında kauçuk mantar kullanılmıştır. Kauçuk mantar tabakaları genellikle iyi darbe emme kabiliyetleri, %100 geri dönüşüm ve bakım kolaylığı nedeniyle zemin uygulamalarında kullanılmaktadır (Castro vd., 2010; Gil, 2009; Knapic, Oliveira, Machado, & Pereira, 2016).

Sandviç kompozit paneller elle yatırma metodu ile üretilmişlerdir. Tüm panellerde dış levha olarak 650 kg/m^3 yoğunluğa sahip 5 mm kalınlığında ısıtılmış işlem görmüş dişbudak

(ThermoWood®) malzemesi kullanılmıştır. Çekirdek malzeme olarak düşük ve yüksek yoğunluklu PVC köpükler tercih edilmiştir. Tablo 5.2 üreticiden alınan PVC köpüklerin fiziksel ve mekanik özelliklerini göstermektedir (Datasheet for Airex C70 PVC Foam). Dişbudağın ölçülen mekanik özellikleri ilgili standartlara göre ve Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.2: PVC köpük çekirdek malzemelerin özellikleri.

Kodu	Marka	Özgül ağırlık (kg/m ³)	Basma Mukavemeti (MPa)	Basma Modülü (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Çekme Modülü (MPa)	Kayma Mukavemeti (MPa)	Kayma Modülü (MPa)	Renk
D	Airex C70.55	60	0.9	69	1.3	45	0.85	22	Sarı
Y	Airex C70.75	80	1.45	104	2	66	1.2	30	Yeşil

Dişbudak tabaka ile köpük çekirdek arasına yerleştirmiş kauçuk-mantar malzemesine ek olarak farklı köpük tipleri, kalınlıkları ve konumları ile çeşitli sandviç tasarımları geliştirilmiştir. Kauçuk mantar malzemenin özellikleri Tablo 5.3 'te verilmiştir. (Abrate, 2011)

Tablo 5.3: Kauçuk mantar ara tabakanın özellikleri.

Malzeme	Marka	Özgül Ağırlık (kg/m ³)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Basılabilirlik (%)	Sertlik
Kauçuk-Mantar	TeknoCork	100-110	0.52	25-40	75 Shore A

Şekil 5.3 (a), referans olarak alınan sadece 25 mm ve 15 mm kalınlığındaki yüksek yoğunluktaki PVC köpüklerin kullanıldığı ahşap tabakalı tek köpüklü sandviç (TKS) tasarımını göstermektedir. TKS referansına dişbudak yapı altına 2 mm veya 5 mm kauçuk mantar ara tabakalarının eklenmesiyle, Şekil 5.3 (b) 'de gösterildiği gibi ikinci tasarım oluşturulmuş ve TKSK olarak adlandırılmıştır. Üçüncü tasarım iki adet PVC köpük arasına 1 mm kalınlığında bir kompozit tabakanın eklenmesiyle ahşap iki köpük katmanlı sandviç (İKSK) oluşturulmuştur, Şekil 5.3 (c). Panel kalınlığının sabit tutulması gereken yerlerde, yerel yükler altında panel direncini arttırmanın ve yerel deformasyonu azaltmanın uygun bir yolu, yumuşak çekirdeğin arasına bir iç tabaka yerleştirmektir (Jedari Salami vd., 2013). Bu kompozit tabaka, 600 g/m² [0/90] E-cam biaksiyal kıvrımsız kumaş ve matris malzemesi vinil ester reçine içermektedir (Tablo 5.4). ISO ve ASTM test standartlarına göre tabakanın düzlem içi mekanik özellikleri çekme testleri ile belirlenmiştir (ASTM-D6641/D6641M, 2016; ASTM-D7078/D7078M, 2012; ISO, 2012). Kompozit tabaka ile

PVC köpükler ayrı bir yapı olarak kabul edilip el yatırma yöntemi ile birleştirilmiştir. Bu yapı, dışbudak ve kauçuk mantar tabakalarına poliüretan bazlı tek bileşenli yanmayan bir yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiştir. 24 saatlik bir kürlenme süresinden sonra, sandviç paneller darbe testleri için 100 mm x 100 mm kare numuneler halinde kesilmiştir. Sekiz farklı sandviç numunesi tasarımının üretim matrisi Tablo 5.5'te listelenmiştir.

Tablo 5.4: E-cam/vinil ester iç tabakanın düzlem içi özellikleri

Malzeme Özellikleri	Değerler
Modül	
Boylamasına Young's modülü (GPa)	20.3
Enine Young modülü (GPa)	19.2
Poisson oranı	0.16
Düzlem içi kayma modülü (GPa)	3.4
Mukavemetler	
Boyuna çekme mukavemeti (MPa)	312
Boyuna basma mukavemeti (MPa)	112
Laminasyon kayma mukavemeti (MPa)	43.3

Tablo 5.5: Numunelerin üretim tasarımları

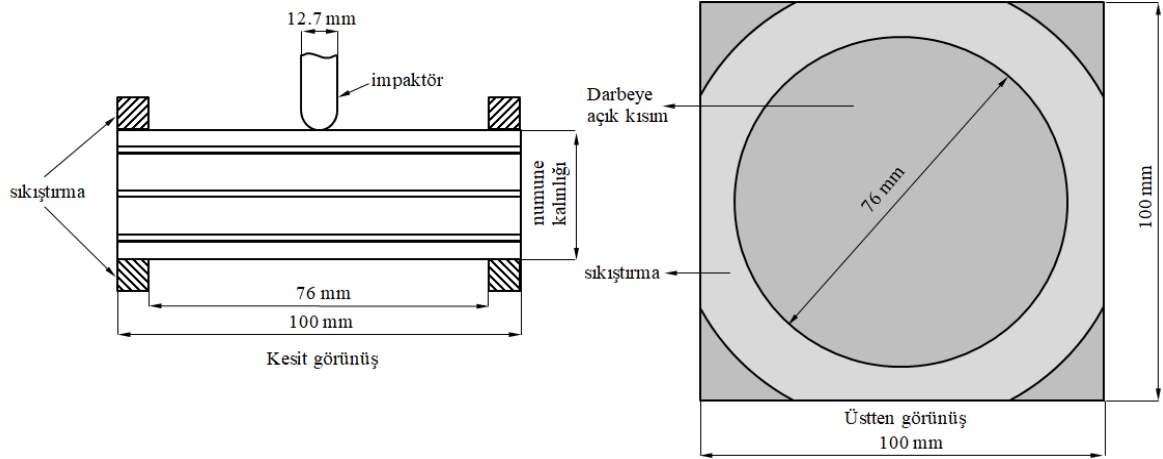
Tasarım	Numune Kodlama	Üst Tabaka	Ara Tabaka	ÇEKİRDEK				Ara Tabaka	Alt Tabaka	Numune Kalınlık (mm)	Numune Ağırlık (gr)	Geri Dönüşüm (Hacimce %)	Maliyet (€/m ²)
TKS	Y25	DA	---	---	Y25	---	---	DA	35	73	28.6	137	
	Y15	DA	---	---	Y15	---	---	DA	25	67	40	86	
TKSK	Y25K2	DA	K2	---	Y25	---	K2	DA	39	94	35.9	141	
	Y15K2	DA	K2	---	Y15	---	K2	DA	29	88	48.3	90	
	Y15K5	DA	K5	---	Y15	---	K5	DA	35	127	57.1	95	
İKSK	YYK2	DA	K2	Y12	E-CAM	Y12	K2	DA	39	134	35.9	157	
	DDK2	DA	K2	D12	E-CAM	D12	K2	DA	39	126	35.9	143	
	DYK2	DA	K2	D12	E-CAM	Y12	K2	DA	39	130	35.9	150	
	YDK2	DA	K2	D12	E-CAM	Y12	K2	DA	39	130	35.9	150	

Kısaltmalar

TKS: Tek köpük çekirdekli dışbudak dış tabakalı sandviç yapı,
TKSK: Tek köpük çekirdekli dışbudak dış tabakalı ve kauçuk-mantar ara tabakalı sandviç yapı,
İKSK: İki köpük çekirdekli dışbudak dış tabakalı ve kauçuk-mantar ara tabakalı sandviç yapı,
DA: Dışbudak Ağacı, **K2:** 2 mm Kauçuk-Mantar, **K5:** 5 mm Kauçuk-Mantar,
E-CAM: 1 mm kalınlıkta 600 gr/m² biaksiyal dokuma+vinily ester tabaka,
ÇEKİRDEK YAPISI;
Y25: 25 mm PVC 80kg/m³ AIREX C70.75 (Yeşil), Yüksek yoğunluklu PVC
Y15: 15 mm PVC 80kg/m³ AIREX C70.75 (Yeşil), Yüksek yoğunluklu PVC
Y12: 12 mm PVC 80kg/m³ AIREX C70.75 (Yeşil), Yüksek yoğunluklu PVC
D12: 12 mm PVC 60kg/m³ AIREX C70.55 (Sarı), Düşük yoğunluklu PVC
Maliyet (€/m²): Dışbudak tabakaları hariç tüm katmanların toplam maliyetini içerir.

5.3 TKS, TKSK, İKSK Tasarımlarının Ağırlık Düşme Testleri

Sandviç numuneler, Instron CEAST Fractovis Plus-7526 ağırlık düşme test makinesi kullanılarak düşük hızda darbe testine tabi tutulmuştur. Ağırlık düşme makinesi, impaktör hız sensörü, veri toplama sistemi ve impaktörün numuneden geri sekmesiyle oluşabilecek çoklu darbeleri önleyen sistemden meydana gelmektedir (Şekil 5.5). Darbeler numunelerin merkezine, 5 kg ağırlığındaki ve uç çapı 12.7 mm olan yarı-küresel çelik impaktör ile uygulanmıştır. Şekil 5.4 te görüldüğü gibi numuneler 76,2 mm delik çapına sahip bir pnömatik sistem ile sıkıştırılıp sabitlenmiştir. ASTM D3763 standardına (ASTM-D3763-15, 2015) uygun olarak, sabitlenmiş sandviç numunelere, oda sıcaklığında 15 J ila 75 J arasında değişen darbe enerjilerinde düşme testi yapılmıştır. 15, 30, 45 ve 75 J darbe enerji seviyeleri için test hızları sırasıyla 2.468, 3.49, 4.275 ve 5.518 m/s olmuştur. Her sandviç tasarımında her enerji seviyesi için üç örnek test edilmiş ve değerlerin ortalaması alınmıştır. Numunelerin düşük hızda darbe davranışlarını görmek ve sonuçlar çıkarmak için temas kuvveti, impaktörün deplasmanı ve emilen enerji miktarı gibi çeşitli parametreler veri toplama cihazı tarafından deney süresince kaydedilmiş ve ileriki bölümlerde detaylı bir şekilde verilmiştir.



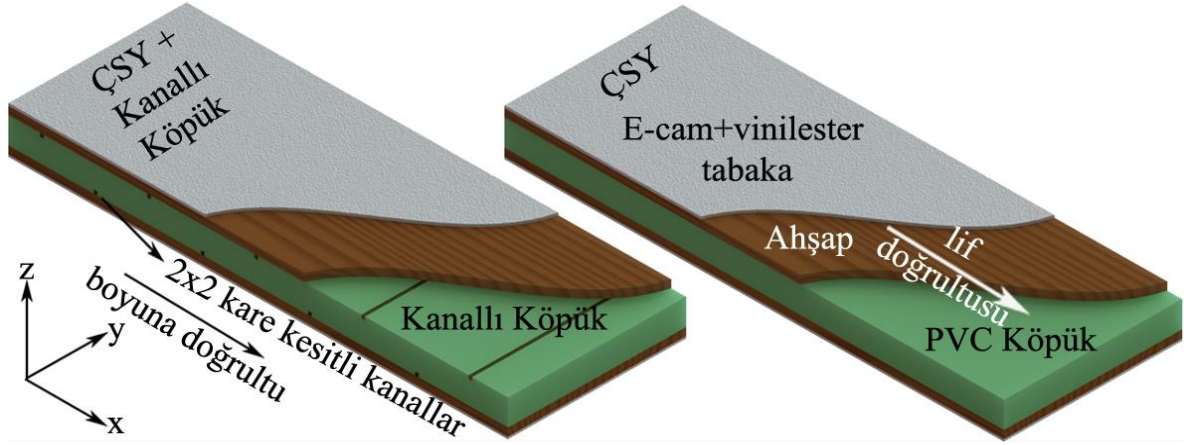
Şekil 5.4: Instron CEAST Fractovis Plus-7526 test cihazı numune sabitleme düzeneği.



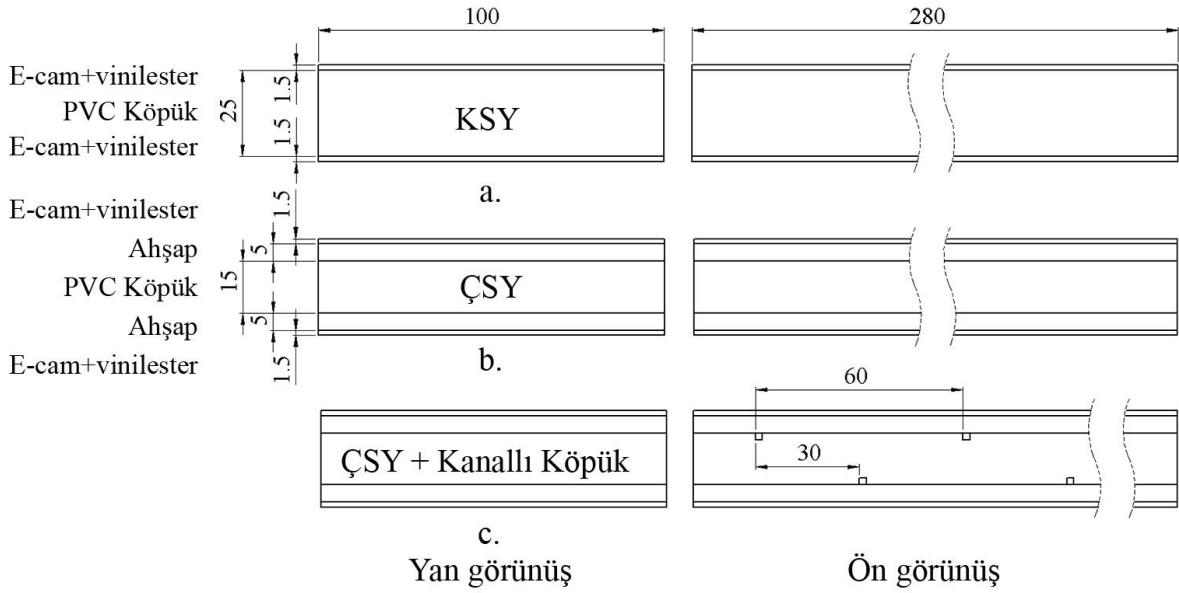
Şekil 5.5: Instron CEAST Fractovis Plus-7526 test cihazı kısımları.

5.4 KSY ve ÇSY Tasarımlarında Kullanılan Malzemeler ve Üretim Yöntemi

Darbe sonrası basma (DSB) testi yapılacak sandviç numuneler, vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) yöntemiyle üretilmiştir. Önceki çalışmalar, VARTM yönteminin çok katmanlı sandviç panel üretimi için uygun olduğunu göstermiştir (L. Wang vd., 2014; Zhang vd., 2015). Sandviç panel için kullanılan çekirdek malzeme, 80 kg/m^3 yoğunluğunda kapalı hücreli bir polivinil klorür (PVC) köpüğüdür (Airex AG Inc.'den temin edilen Airex C70.75). Üst ve alt tabakalarda 850 gr/m^2 E-cam [0/90]_s iki eksenli dikişli kıvrımsız kumaş, matris olarak bisfenol-A epoksi vinil ester reçinesi kullanılmıştır. Üst ve alt tabakanın nominal kalınlığı yaklaşık 1.5 mm olmuştur. Ara katman olarak ısı işlem görmüş 430 kg/m^3 yoğunluğa sahip çam ve 650 kg/m^3 yoğunluğa sahip dişbudak ağacı kullanılmıştır. Ahşap ara katmanlar, köpük çekirdek malzemeye kıyasla çok daha sert ve E-cam tabakalarına göre daha kalındırlar. Bu aynı zamanda Mamalis ve arkadaşları tarafından geliştirilen konsept ile de tutarlıdır (Mamalis vd., 2008). Ek olarak, ahşap ara tabakaların lif doğrultusu yönü, VARTM işlemi sırasında (Şekil 5.6) sandviç panellerin uzunlamasına eksenine paraleldir. Böylelikle bu ekseninde daha yüksek basınç dayanımı sağlanmıştır (Green, Winandy, & Kretschmann, 1999).



Şekil 5.6: ÇSY numuneleri.



Şekil 5.7: a) KSY, b) ÇSY, c) ÇSY+Kanallı köpük şematik çizimleri.

Klasik sandviç yapı (KSY) ve çok katmanlı sandviç yapılar (ÇSY) şematik olarak Şekil 5.7'de verilmiştir. Sandviç panellerin toplam kalınlıkları VARTM işleminden sonra ölçülmüştür. KSY numuneleri 1.5 mm kalınlıkta E-cam+vinil ester ve 25 mm kalınlıkta PVC köpükten oluşurken (Şekil 5.7a), ÇSY örnekleri 1.5 mm kalınlıkta E-cam+vinil ester tabakadan, 5 mm kalınlıkta bir ara ahşap tabaka ve 15 mm kalınlıkta PVC köpükten oluşmaktadır (Şekil 5.7 b, c). KSY ve ÇSY numuneleri için sandviç panellerin nominal kalınlığı 28 mm olmuştur. VARTM işlemi sırasında reçine akışını iyileştirmek ve ayrıca darbe sonrası mekanik performans üzerindeki etkisini araştırmak için, Şekil 5.7 (c)'de gösterildiği gibi, PVC köpük çekirdeğin üst ve alt yüzeylerine eni doğrultusunda 2mm x 2mm kesitli kanallar freze ile açılmıştır. Darbe testleri için, KSY ve ÇSY numunelerinin boyutları 280 mm (uzunluk) x 100 mm (genişlik) x 28 mm (kalınlık) dir.

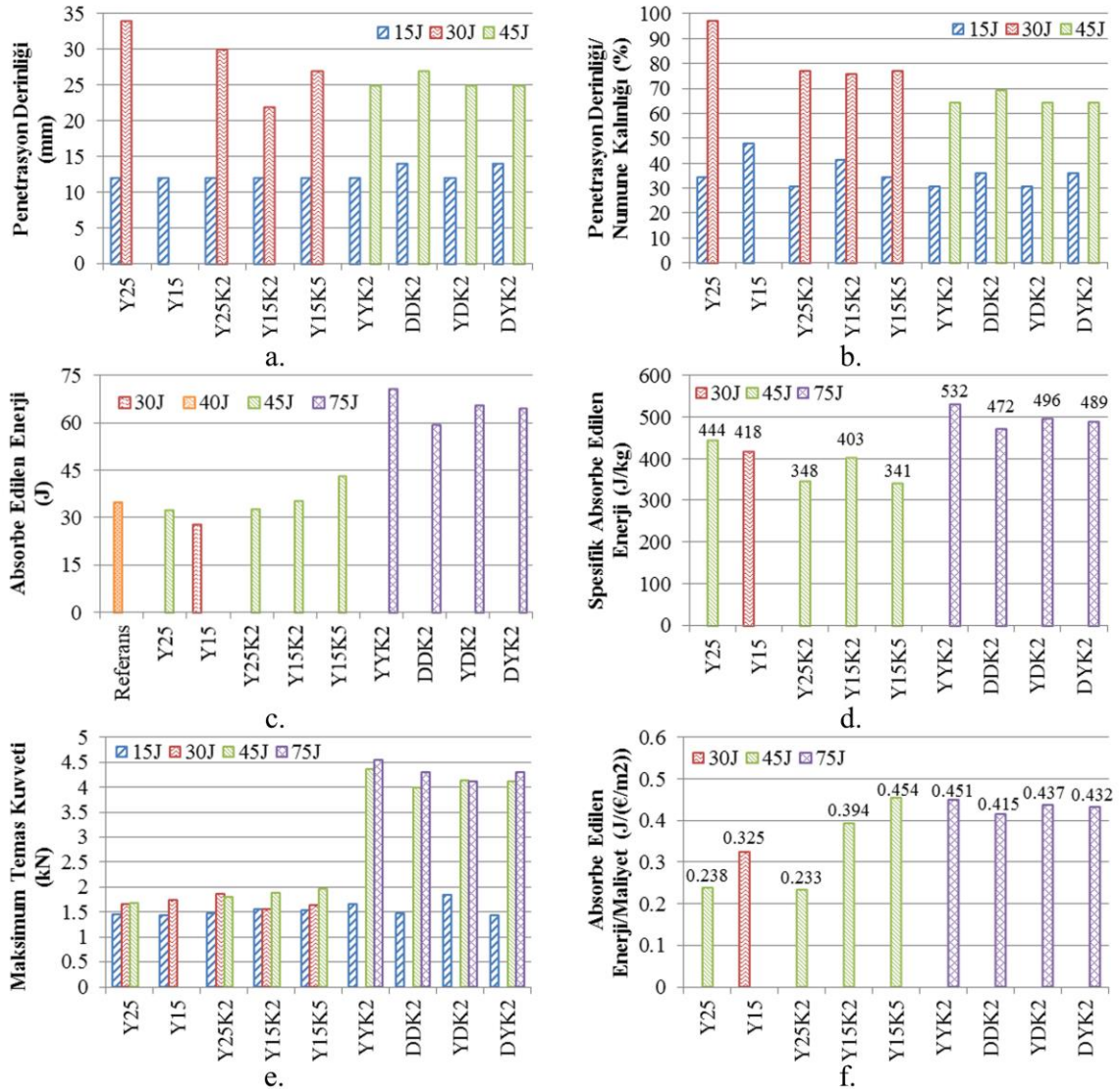
6. BULGULAR

6.1 TKS, TKSK, İKSK Tasarımlarının Darbe Testleri

Darbe testindeki yük-deplasman eğrisi, hasar süreci hakkında önemli bilgiler içermektedir. (Atas & Sevim, 2010). Bu çalışmada deplasman terimi, impaktörün çarpma anından sonraki gittiği mesafe olarak tanımlanmaktadır. Yükselen ve azalan bölümleri içeren yük deplasman eğrileri, açık ve kapalı eğriler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. (Atas vd., 2011; Atas & Sayman, 2008; Atas & Sevim, 2010). Darbe enerji seviyesine bağlı olarak eğrinin azalan kısmı geri tepme, penetrasyon ve perforasyon vakalarını temsil edebilir. Azalan bölüm tamamen konveks bir eğriyse, impaktörün numuneye nüfuz etmesi veya numuneyi delmesi nedeniyle yük-deplasman eğrisi açık bir eğri olabilir (Atas vd., 2011).

Şekil 6.2-6.10, her bir sandviç konfigürasyonu için seçilen temsili yük-deplasman grafiklerini ve numunelerin darbe sonrası kesit görüntülerini göstermektedir. Numunelerin kalınlık farkları göz önüne alındığında, penetrasyon derinlikleri ve penetrasyon derinliklerinin toplam kalınlığa oranı Şekil 6.1 (a-b) 'de verilmiştir.

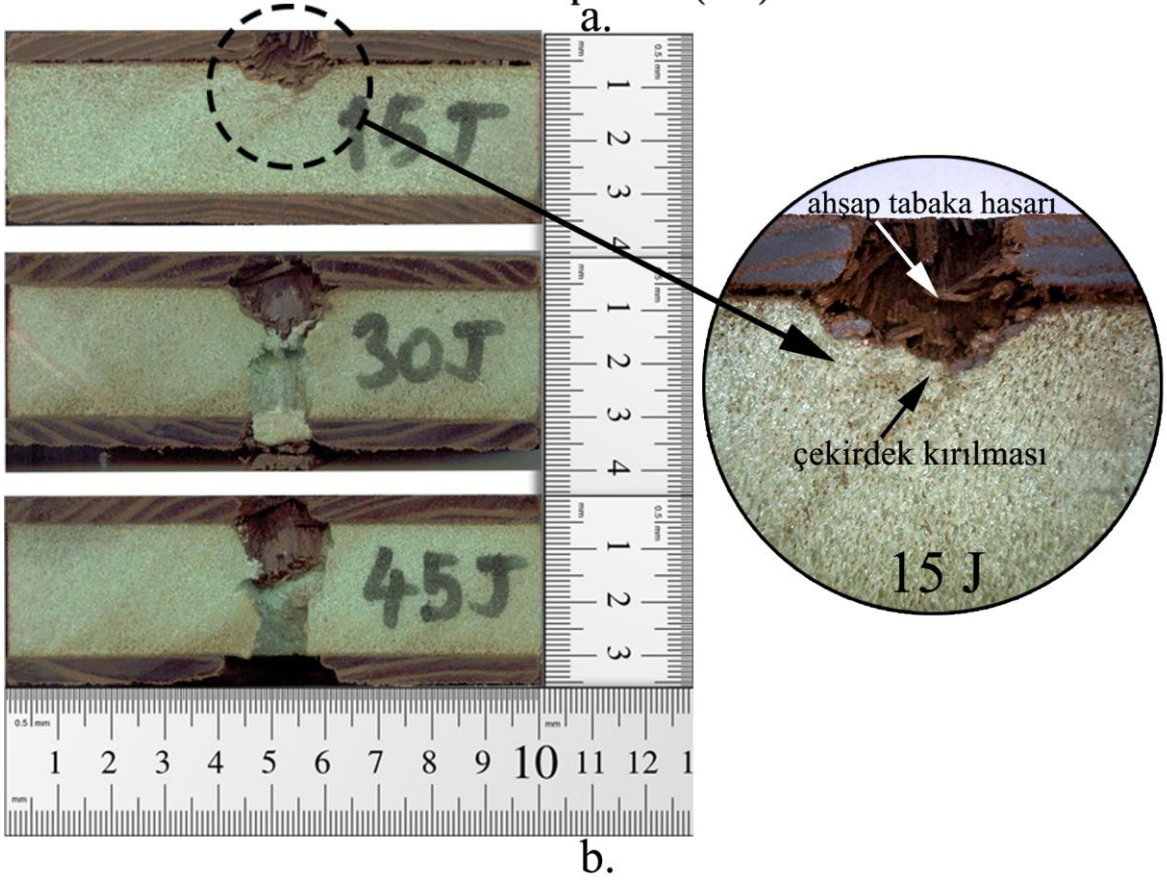
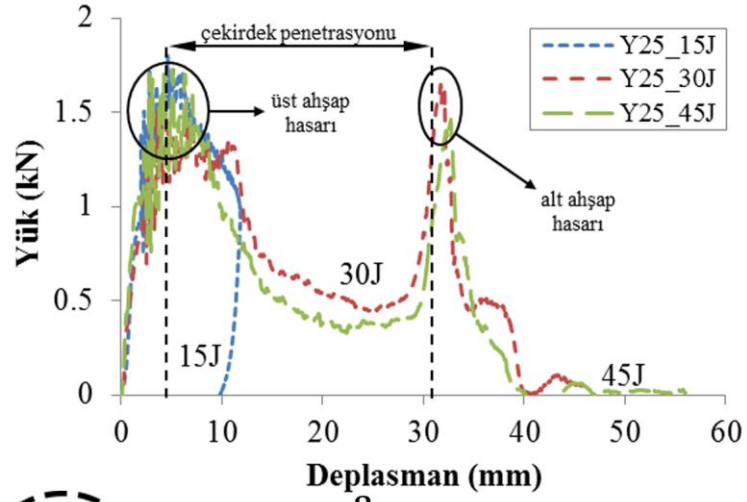
Darbe testi sırasında absorbe edilen enerji, yük-deplasman eğrisinin altındaki alanın integralinin alınmasıyla hesaplanır. Bu enerji, ahşap tabakanın delinmesine ve köpük çekirdek malzemenin ezilmesine, hasar görmesine harcanmıştır (Al-Shamary vd., 2016). Ekstra tabakaların ve köpük çekirdek malzemelerin farklı yoğunluklarının dikkate alınmasıyla sandviç numunelerinin toplam ağırlığı hesaba katılarak enerji absorpsiyonları analiz edilmiştir. Şekil 6.1 (c) ve (d), perforasyon (tam delme) durumu için absorbe edilen enerjiyi ve sandviç numunelerinin spesifik enerji absorpsiyonlarını özetlemektedir. Farklı darbe enerjilerine maruz kalan tüm sandviç numunelerin maksimum temas kuvvetleri, Şekil 6.1 (e) 'de verilmiştir. Absorbe edilen enerji-maliyet oranı, absorbe edilen enerjinin, Şekil 6.1 (f) 'de görüldüğü gibi, her tasarımın birim maliyetine bölünmesiyle hesaplanmıştır. Birim alansal maliyet m^2 başına kullanılan her bir bileşenin maliyetlerinin toplanmasıyla hesaplanmıştır. Tüm sandviç numunelerde dışbudak geometrisi sabit tutulduğundan ve dışbudak maliyeti yapıların arasında anlamlı bir fark yaratmayacağından hesaplamaya katılmamıştır.



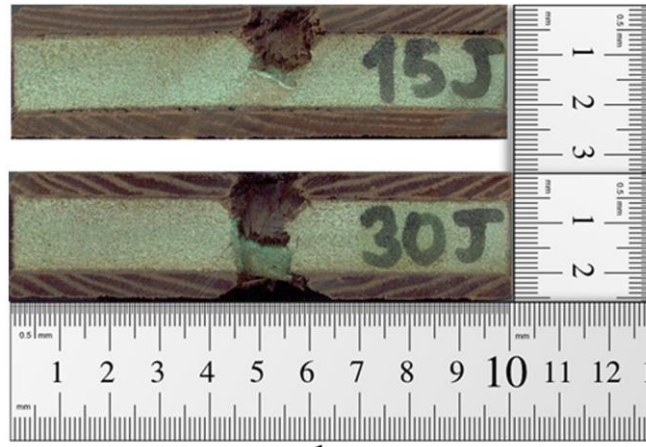
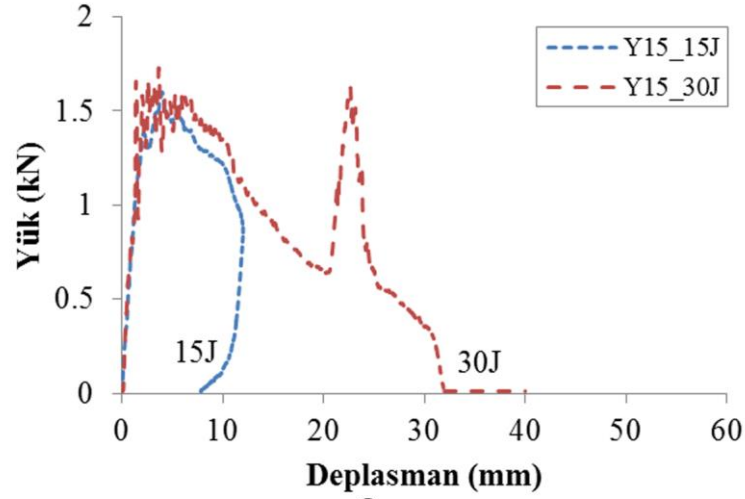
Şekil 6.1: DHD test sonuçları; a) penetrasyon derinliği, b) penetrasyon derinliği/numune kalınlığı, c) absorbe edilen enerji, d) spesifik absorbe edilen enerji, e) maksimum temas kuvveti ve f) absorbe edilen enerji/maliyet.

6.1.1 Tek Köpük Çekirdekli (TKS), Dişbudak Dış Tabakalı Sandviç Yapı

Şekil 6.2 (a)'da Y25 ve şekil 6.3 (a) 'da Y15 örneklerinin yük deplasman grafiklerini göstermektedir. Bu grafiklerde düşük hızda darbe yapan impaktörün üst ve alt ahşap tabakayı delmesi ile iki ayrı tepe noktası meydana gelmiştir.



Şekil 6.2: a) Yük deplasman eğrileri ve b) Y25'in kesit hasar görüntüsü.



Şekil 6.3: a) Yük deplasman eğrileri ve b) Y15'in kesit hasar görüntüsü

Tek köpük çekirdek yapıları sandviç yapılarında penetrasyon ve/veya perforasyon eşikleri aşıldığında tabakalı yapıların aksine dağ benzeri iki tepe noktası olan grafikler elde edilir (Atas & Potoğlu, 2016; Atas & Sevim, 2010; Ozdemir vd., 2018). Bu tepe noktaları arasında (sadece en üst tabakanın penetre olduğu 15 J haricinde) kuvvetin, impaktörün köpük çekirdek boyunca yer değiştirmesine karşılık gelen, plato oluşturduğu bir bölge vardır. Bu örnekler için birinci ve ikinci tepe noktalarının kuvvet değerleri, delinen üst ve alt ahşap tabakanın aynı özellikte olmasından dolayı yakın çıkmıştır.

15 J darbe enerjisinde, 15 mm ve 25 mm kalınlığında köpük çekirdek içeren her iki numunede de üst ahşap tabaka hasarı ve çekirdek kırılması gözlemlenmiştir. Penetrasyon derinlikleri hemen hemen aynıdır. (Şekil 12a). Ancak penetrasyon derinliğinin numune kalınlığına oranında, Y15 numunesinde yüksek yoğunluktaki PVC köpük çekirdeğin daha

düşük kalınlıkta olmasından dolayı %48 iken, Y25 örneğinde %34.3 olmuştur. (Şekil 6.1b).

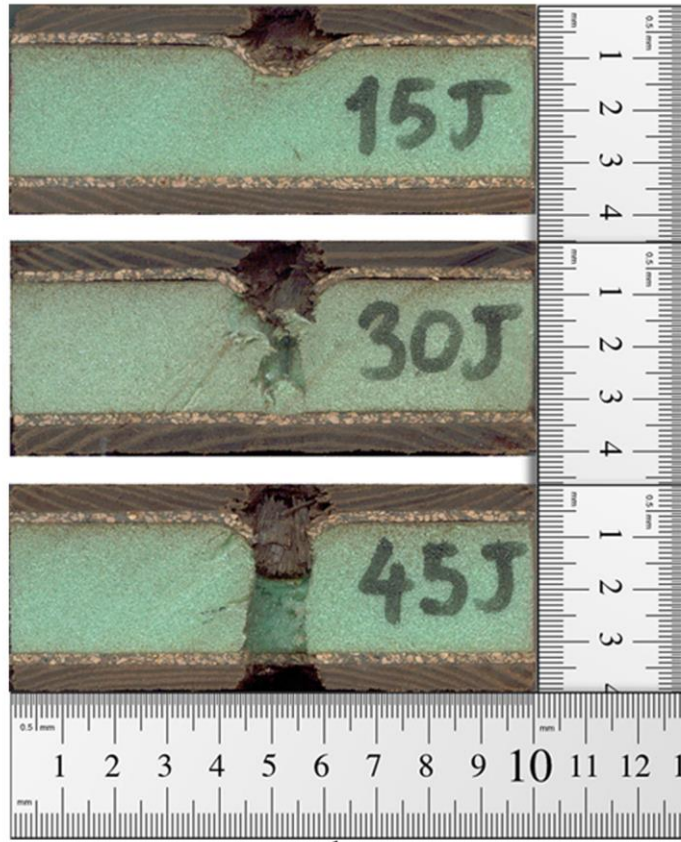
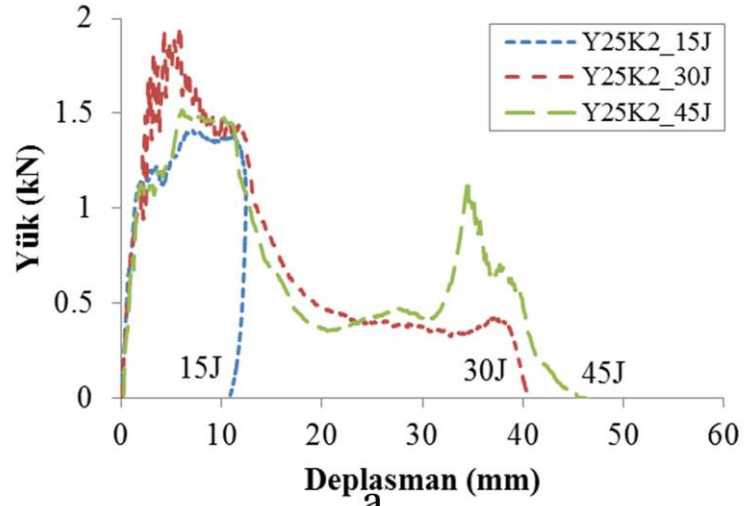
Darbe enerjisi 30 J'ye çıkarılmasıyla, grafiklerde ikinci tepe gözlenmiş olup, bu da şekil 6.2 ve 6.3'te görüldüğü üzere Y25'in alt dışbudak tabakasının kısmi perforasyonu ve Y15'in ise tam delinmesi ile neticelenmiştir.

Y25 numuneleri, 45 J' luk darbe enerjisinde tamamen delinmiştir. Bu darbe enerjisinde uzun bir plato bölgesi sergilediği yük-yer değiştirme eğrilerinden görülebilir. Uzun plato, Şekil 6.1 (c) 'de görüldüğü gibi daha yüksek enerji emilimi ile sonuçlanır ve delinme durumunda Y15 örnekleri ile karşılaştırıldığında impaktörün Y25'teki daha kalın olan köpükte ilerlemesi ile ilgilidir. Bu tür sonuçlar önceki çalışmalarda gözlenmiştir (Ozdemir vd., 2015; Ozdemir vd., 2018). Yazarlar çekirdek kalınlığının artmasıyla penetrasyon durumunun düşük hızda darbe (DHD) altında daha geniş bir enerji aralığında olabileceğini bildirmişlerdir (Ozdemir vd., 2015). Ayrıca, çekirdek kalınlığı artmasıyla, numunelerin daha fazla elastik davranış gösterdiği ve maksimum temas kuvveti değerinin azaldığı, temas süresinin ve maksimum sehim değerlerinin arttığı gözlenmiştir. 30 J enerji seviyesinde Y15 ve Y25 numuneleri karşılaştırıldığında, köpük çekirdek kalınlığındaki azalma Şekil 6.1 (e)'de görüldüğü gibi maksimum temas kuvvetini arttırmıştır. Benzer sonuçlar farklı çekirdekli yapılarda, örneğin balsa çekirdekli sandviçte elde edilmiş, çekirdek kalınlığındaki artış perforasyon eşiğinde bir artışa neden olmuştur (Ozdemir vd., 2018).

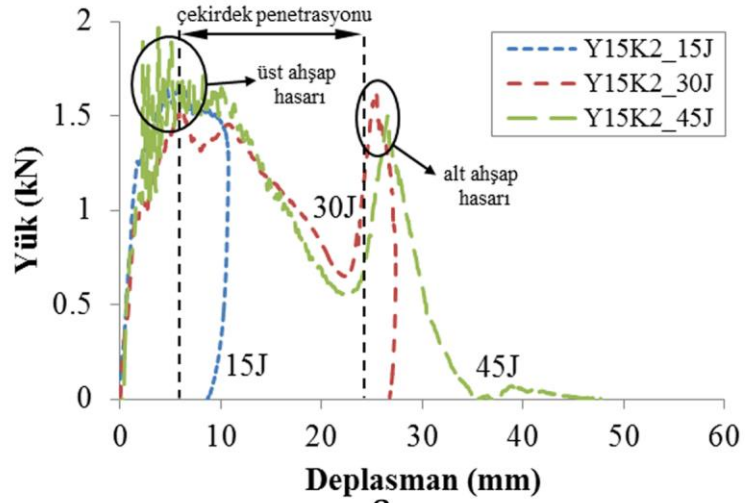
Y25 numunesi daha ağır olmasına rağmen, Y15 örneğinden daha yüksek özgül enerji absorbe etmiştir. Bu sonuç başka bir çalışmada daha gözlenmiştir (Loganathan & Shivanand, 2015). Yazarlar, aynı tabakaya sahip sandviç kompozitlerin köpük çekirdek kalınlığındaki artışın darbe esnasında daha yüksek özgül enerji absorbe ettiklerini bulmuşlardır.

6.1.2 Tek Köpük Çekirdekli, Dışbudak Dış Tabakalı ve Kauçuk-Mantar Ara Tabakalı Sandviç Yapı (TKSK)

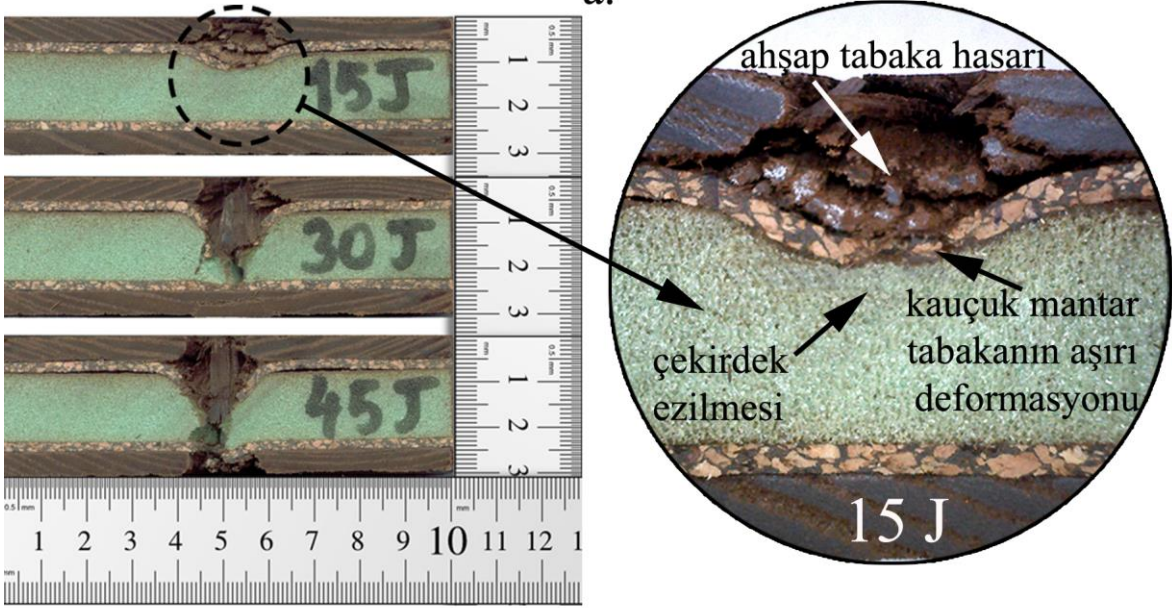
Şekil 6.4-6.6, TKSK örneklerinin yük-deplasman eğrilerini ve enine kesit görüntülerini göstermektedir.



Şekil 6.4: a) Yük deplasman eğrileri ve b) Y25K2'in kesit hasar görüntüsü.

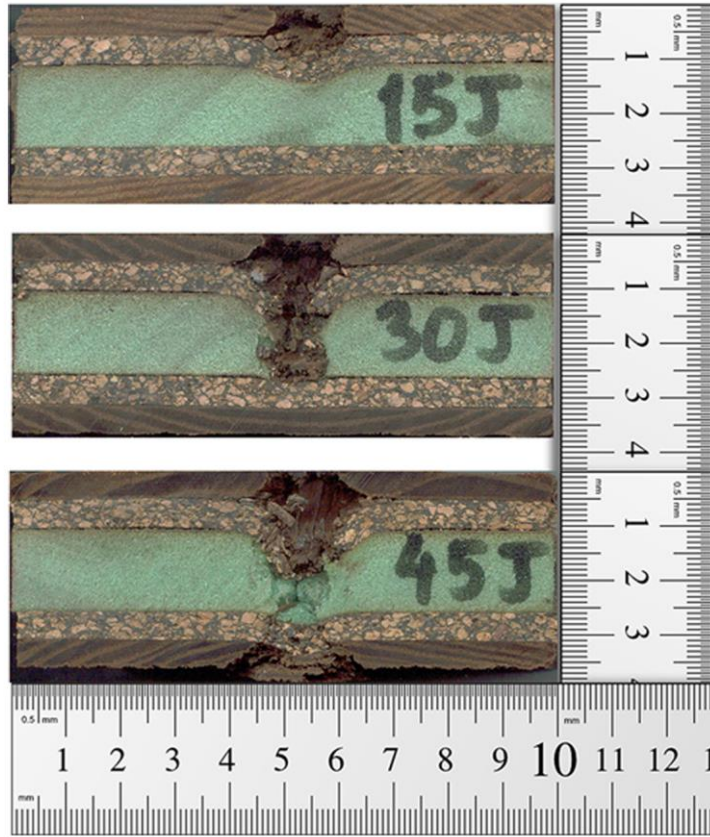
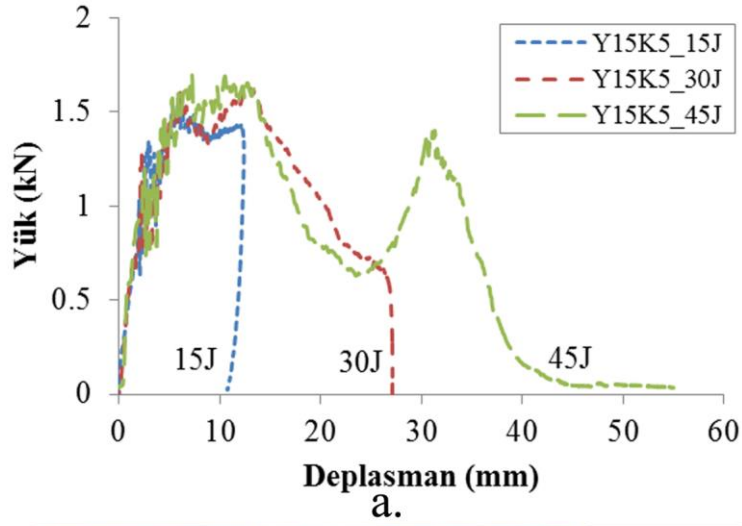


a.



b.

Şekil 6.5: a) Yük deplasman eğrileri ve b) Y15K2'in kesit hasar görüntüsü.



Şekil 6.6: a) Yük deplasman eğrileri ve b) Y15K5'nin kesit hasar görüntüsü.

Kauçuk mantar ara tabakası 15 J darbe enerjisinde penetrasyon derinliği üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir. Bununla birlikte, kauçuk mantar tabakasının deformasyonu, impaktörün köpük çekirdek yapıya ulaşmasını engelleyerek çekirdek malzemeye daha az zarar vermesini sağlamıştır. Şekil 6.1 (b)'de gösterildiği gibi, Y25K2 örneğine kauçuk mantar ara tabakasının eklenmesiyle penetrasyon derinliğinin kalınlığa oranı %34.3'ten %30.8'e azalmıştır. Bu azalma, Y15K2 örneğinde %48'den %41.4'e olmuştur. Y15K2 ve

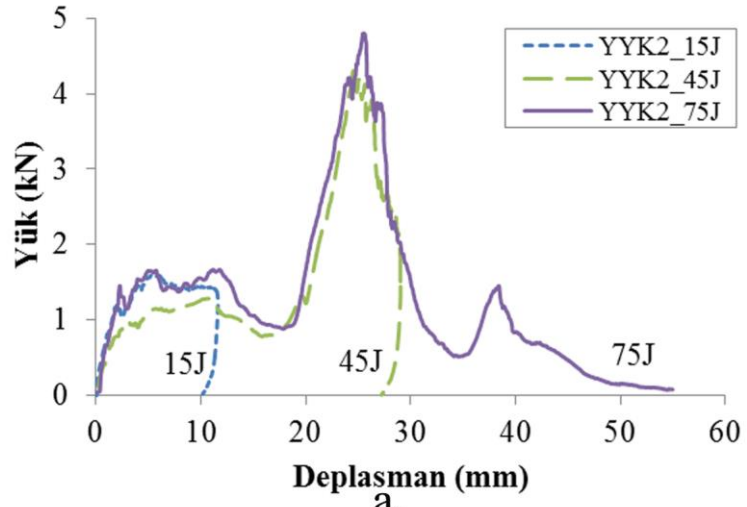
Y15K5 numuneleri arasındaki bir karşılaştırma yaparsak, penetrasyon derinliğinin kalınlığa oranı daha kalın kauçuk mantar nedeniyle %41.4'ten %34.3'e düşmüştür.

Darbe enerjisi 30 J'ye yükseltildiğinde, TKSK örneklerinde Y15K2 dışında ikinci tepe noktası oluşmamıştır. Y25 ve Y15 numuneleriyle kıyaslandığında Y25K2 ve Y15K2 numunelerinin penetrasyon derinliği azalmıştır. Ayrıca, penetrasyon derinliğinin kalınlığa oranı TKS emsalleriyle kıyaslandığında yaklaşık %20 azalmıştır. Y25K2 ile Y25 karşılaştırıldığında bu oran, %97.1'den %76.9'a düşmüştür. Y15K2 örneği %75.9'luk bir oran gösterirken, Y15 ise 30J enerji seviyesinde tamamen delinmiştir. Daha kalın kauçuk mantarlı Y15K5 numuneleri, Y15K2 numunelerine kıyasla daha yüksek penetrasyon derinliği sergilemiştir (Şekil 6.1a) ve sandviç panelin kalınlığının artmasından dolayı penetrasyon derinliğinin kalınlığa oranları neredeyse aynı olmuştur. Bu, kauçuk mantar malzemesinin düşük rijitliğinden dolayı olabilir.

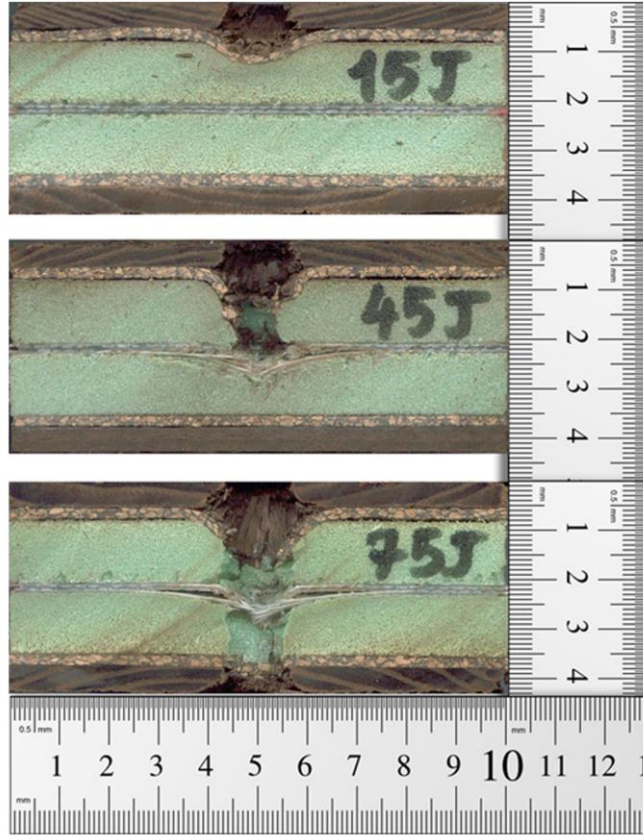
TKSK örneklerinin tümü 45 J darbe yükünde tamamen perfore olmuşlardır. Şekil 6.3 (a) ile Şekil 6.5 (a) 'yı karşılaştırdığımızda, Y15K2 numunesi Y15 numunesinden daha yüksek darbe direnci göstermektedir. Aynı eğilim Y25K2 ve Y25 numuneleri arasında da gözlenmiştir. Bu, 2 mm kalınlığındaki kauçuk-mantar ara katmanının, çalışmada kullanılan enerji seviyelerindeki perforasyon eşiğini arttırdığını göstermektedir. Benzer şekilde, kauçuk-mantar kalınlığının artırılması, absorbe edilen enerjiyi arttırmıştır ancak artan ağırlıktan dolayı spesifik absorbe edilen enerjiyi azaltmıştır. “Referans” örneğe, Ozdemir vd. (2015) kıyasla, TKSK numunelerinde absorbe edilen enerji değerleri karşılaştırılabilir ve daha yüksektir, ancak TKS numunelerinde değer düşüktür. Ara katmanın sağladığı gelişme, Şekil 6.1 (c)' de görülmektedir.

6.1.3 İki Köpük Çekirdekli, Dışbudak Dış Tabakalı ve Kauçuk-Mantar Ara Tabakalı Sandviç Yapı (İKSK)

İKSK örneklerinin yük deplasman grafikleri şekil 6.7-6.10'da verilmiştir. Alternatif yüksek ve düşük yoğunluktaki PVC köpük çekirdek sıralamalarının etkisini değerlendirmek için, sandviç tabakanın dışbudak ve 2 mm lik kauçuk-mantar tabakaları aynı konumda kalırken, Tablo 5.5'te gösterildiği gibi dört farklı tasarım durumu için testler yapıldı. Bu örneklerle, 15J, 45J ve 75J darbe enerjisinde düşük hızda düşme testi yapıldı. Beklendiği gibi, yük deplasman eğrileri, köpük çekirdek arasında bulunan lamine E-cam tabakanın varlığından dolayı TKS ve TKSK tasarımlarından önemli ölçüde farklı olmuştur.

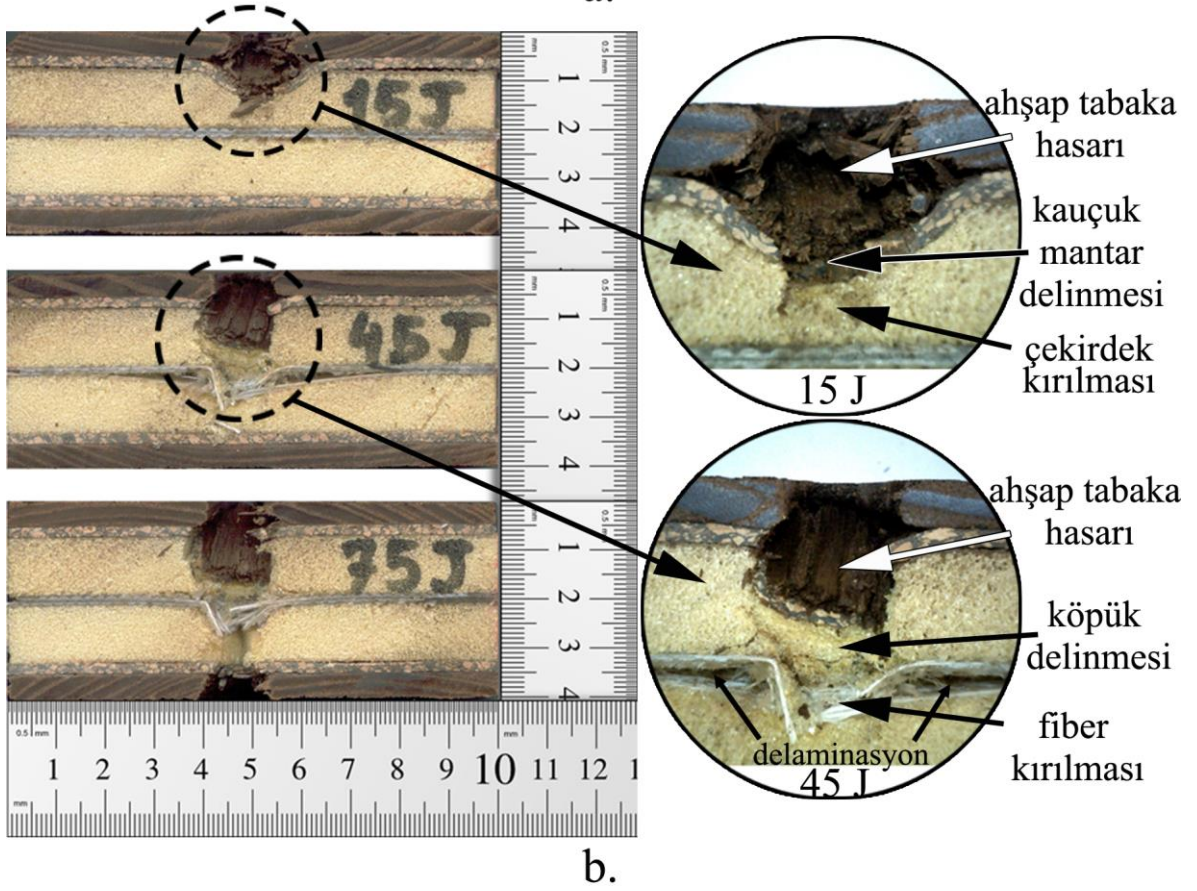
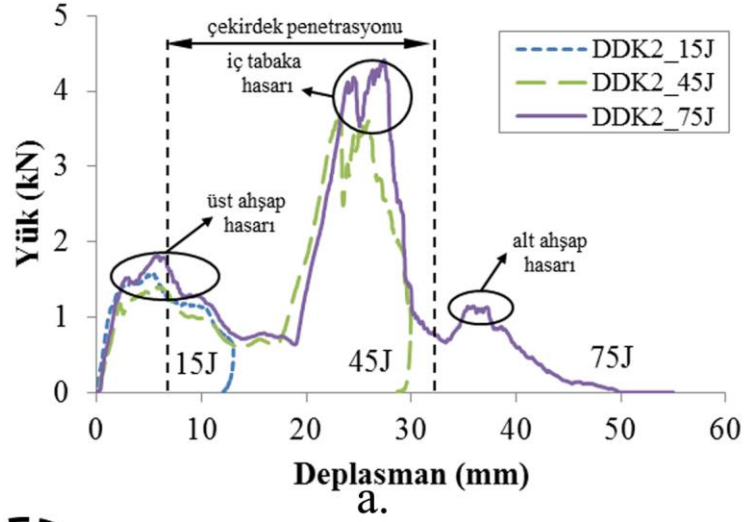


a.

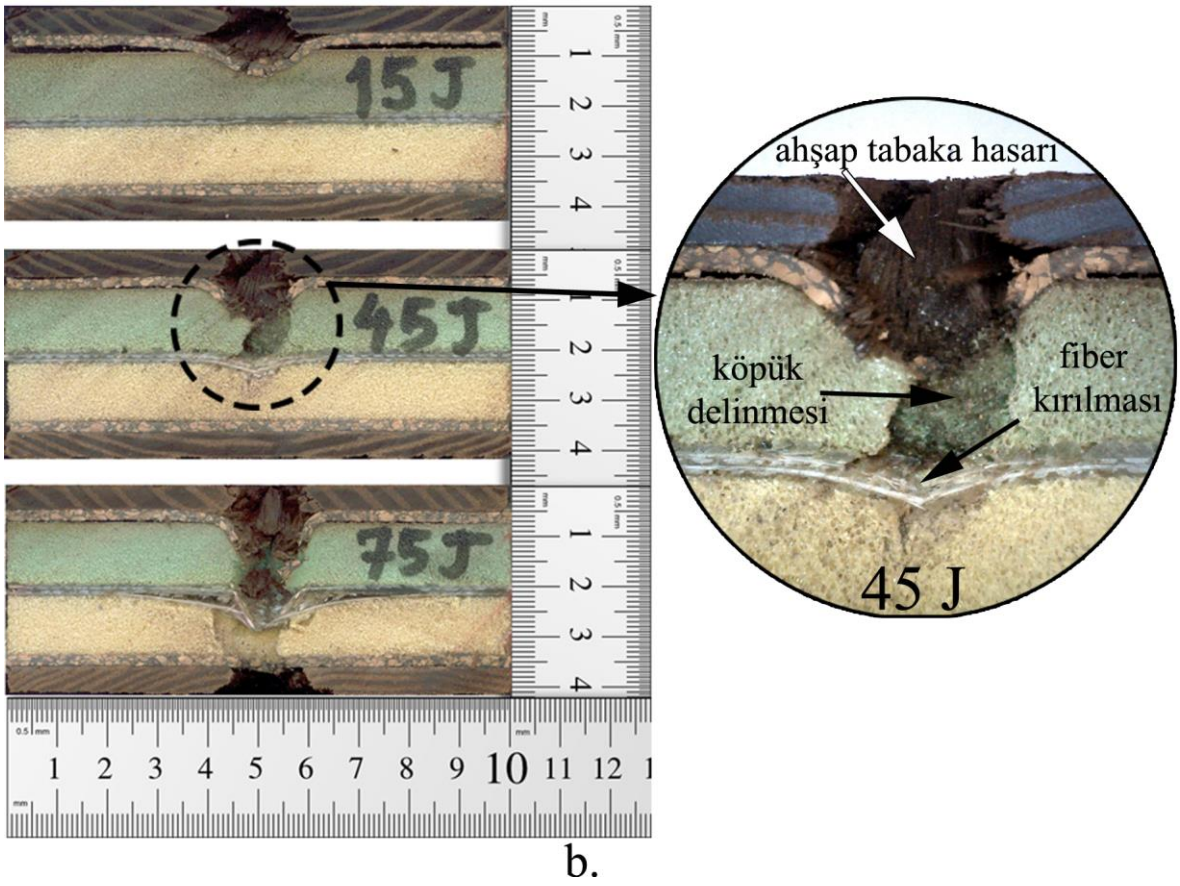
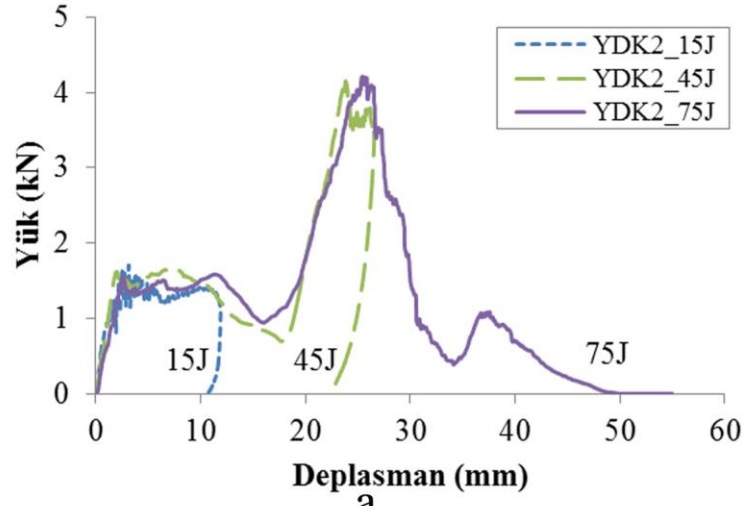


b.

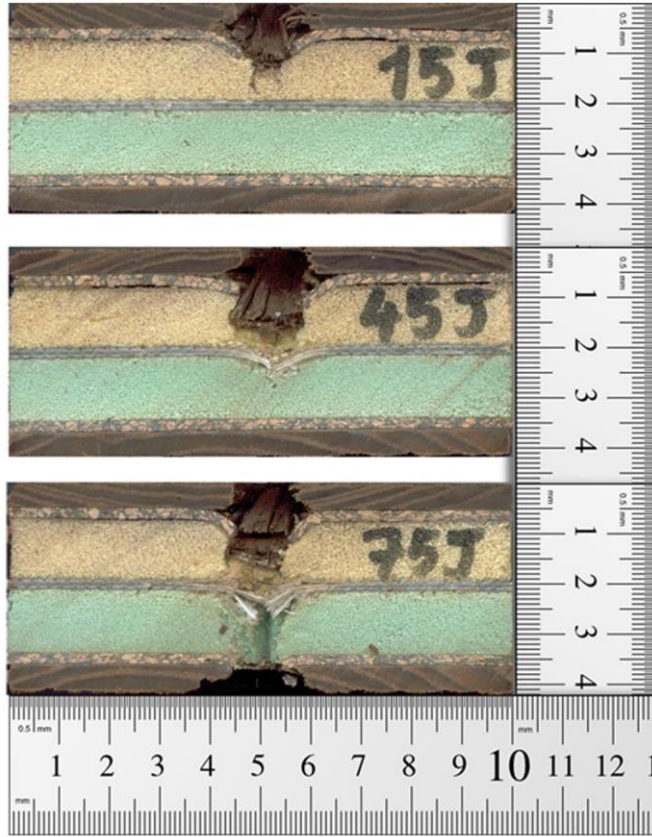
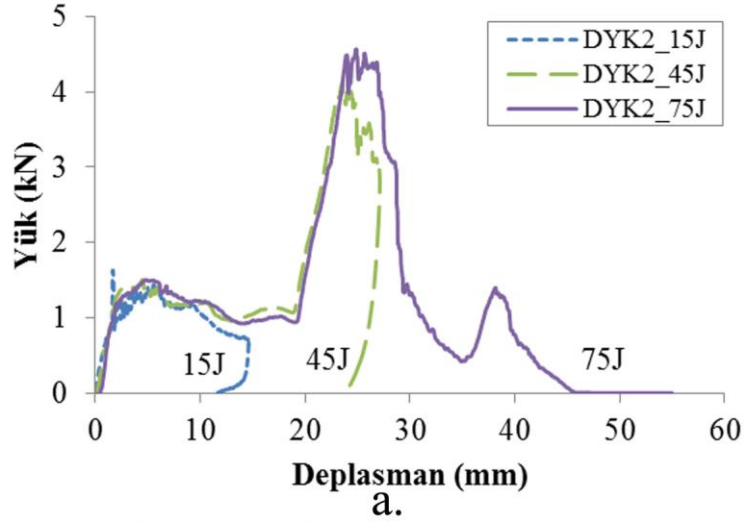
Şekil 6.7: a) Yük deplasman eğrileri ve b) YYK2'nin kesit hasar görüntüsü.



Şekil 6.8: a) Yük deplasman eğrileri ve b) DDK2'nin kesit hasar görüntüsü.



Şekil 6.9: a) Yük deplasman eğrileri ve b) YDK2'nin kesit hasar görüntüsü.



Şekil 6.10: a) Yük deplasman eğrileri ve b) DYK2'nin kesit hasar görüntüsü.

Darbe vurulan bölgedeki yüksek yoğunluktaki PVC'ye sahip YYK2 ve YDK2 örneklerinde çekirdek ezilmesi olurken, düşük yoğunlukta PVC içeren DDK2 ve DYK2 örneklerinde çekirdek kırılması olmuştur. Köpük malzemesinin, düşük enerji seviyelerinde darbe yönündeki yoğunluğunun, hasar durumunu etkilediği söylenebilir. 15J enerji seviyesinde,

YYK2 ve YDK2 numunelerinin penetrasyon derinliğinin kalınlığa oranı %30.8, DDK2 ve DYK2 numuneleri için %35.9 olmuştur. (Şekil 6.1b).

Darbe enerjisi 45 J'a çıktığında, impaktör E-cam iç tabaka ile temas etmiş ve yük deplasman eğrilerinde bir kuvvet tepe noktası ortaya çıkarmıştır (Şekil 6.7-6.10). Bu temas, E-cam tabakasındaki elyaf kırılmasına ve delaminasyona neden olmuştur. Kumpas yardımıyla hasarlı numunelerin delaminasyon genişlikleri ölçülmüştür. Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de, ortadaki E-cam tabakanın üstüne ve altına yüksek yoğunlukta PVC köpük çekirdek eklenerek delaminasyonun azaltıldığı da görülmektedir (Şekil 6.7b). Düşük yoğunluktaki PVC köpüğünün daha yüksek deformasyona uğrayabilmesi ve daha az rijit olmasından dolayı E-cam tabakasındaki delaminasyonun daha büyük bir delaminasyon oluşturmuştur (Şekil 6.8b). 45J enerji seviyesinde, DDK2 örneğindeki delaminasyon genişliği yaklaşık 60 mm, YYK2 örneğinde yaklaşık 40 mm olmuştur. YDK2 ve DYK2 numunelerinde, iç E-cam tabaka bu enerji seviyesinde kırılmıştır (Şekil 6.9b, 6.10b). DDK2 numunelerinde penetrasyon derinliğinin kalınlığa oranı %69.2 olurken, diğerlerinde %64.1 ile aynı seviyede kalmıştır (Şekil 6.1b).

75 J darbe enerjisi için, tüm eğriler açık formda olup dışbudak, iç E-cam tabakaları ve köpük çekirdek malzemeleri için tam perforasyona karşılık gelen durum oluşmuştur. Bu enerji seviyesinde, birinci, ikinci ve üçüncü tepe noktalarının sırasıyla üst dışbudak, iç E-cam ve alt dışbudak tabakalarındaki hasarı temsil ettiği açıkça görülmektedir. Düşük yoğunluklu PVC'den oluşan DDK2 numuneleri en düşük enerjiyi, yüksek yoğunluklu PVC'den oluşan YYK2 ise en yüksek enerjiyi absorbe etmiştir. (Şekil 6.1c). Bu, daha sert (rijit) köpük çekirdek malzemesinin çok katmanlı sandviç panellerde darbeye bağlı hasarı azalttığını gösteren daha önceki sonucu doğrulamaktadır (Jedari Salami vd., 2013; Jiang & Shu, 2005). YDK2 ve DYK2'nin absorbe ettiği enerji değerleri karşılaştırıldığında, yüksek yoğunluktaki köpüğü en üste yerleştirmek, perforasyon direncinde hafif bir artışa neden olmuştur (Şekil 6.1c). Bu sonuçlar, sınıflandırılmış köpük sandviç yapıların darbe davranışlarında gözlenmiştir (Zhou vd., 2013). İKSK örneklerinin enine kesitlerinden, yüksek yoğunluklu bir PVC köpük çekirdek malzemenin kullanılmasının düşük hızda darbe altında daha dayanıklı bir yapı oluşturduğu görülmektedir.

6.2 KSY, ÇSY Tasarımlarının Darbe ve Darbe Sonrası Basma Testleri

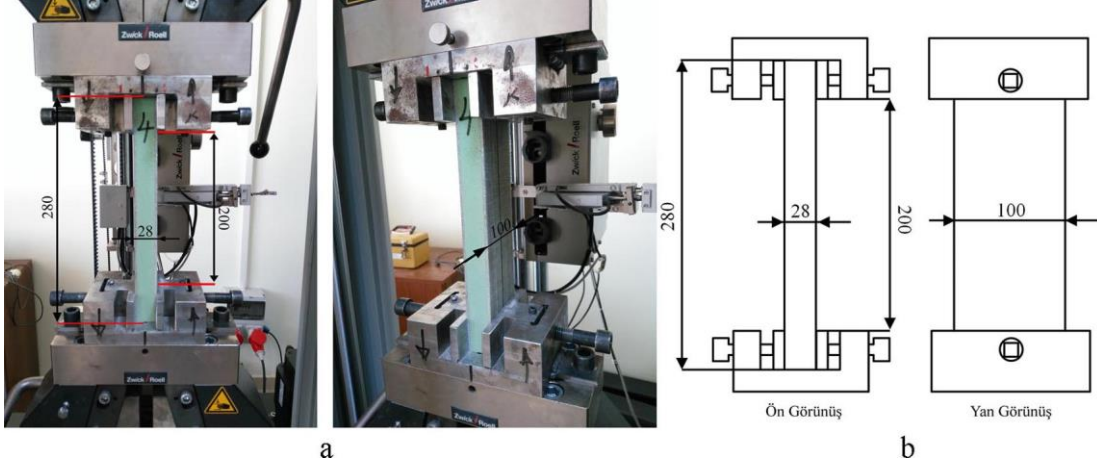
Sandviç panellerin düşük hızda darbe testlerinde 0.75 ve 1.5 m yüksekliğinden 4 kg impaktörün serbest bırakılmasıyla 30 J ve 60 J darbe enerjisi elde edilmiştir. Ağırlık düşme testleri, Nordtest yönteminde (NT MECH 042) tanımlanan bir test cihazı ile yapılmıştır. 12.7 mm çapında yarı küresel uçlu (YK) ve 78° lik tepe açılı uç yarıçapı 3 mm olan konik (KO) iki farklı impaktör kullanılmıştır. İki farklı uç geometrisinin farkını görebilmek ve değişkenleri azaltmak için her iki impaktör aynı enerji seviyelerinde kullanılmıştır. Yüksek enerji seviyesinde (60 J), 12.7 mm yarı küresel impaktör, bütün numunelerde konik impaktörden daha derin penetrasyona neden olmuştur (Tablo 6.1).

Tablo 6.1: Sandviç panellerin kesit görünümünde darbe hasar boyutları.

İmpaktör tipi	Hasar Boyutları	30J Darbe		60J Darbe		
		Vurulan Numuneler DAD	ÇAD	KSY	DAD	ÇAD
Konik (KO)	Hasar genişliği (mm)	18	18	22	24	28
	Penetrasyon derinliği (mm)	9	9	12.5	9	12
Yarı Küresel (YK)	Hasar genişliği (mm)	15	15	18	22	22
	Penetrasyon derinliği (mm)	5	7.5	24	13	14

Not: “Hasar genişliği” ve “Penetrasyon derinliği” Şekil 6.13'te gösterilmektedir.

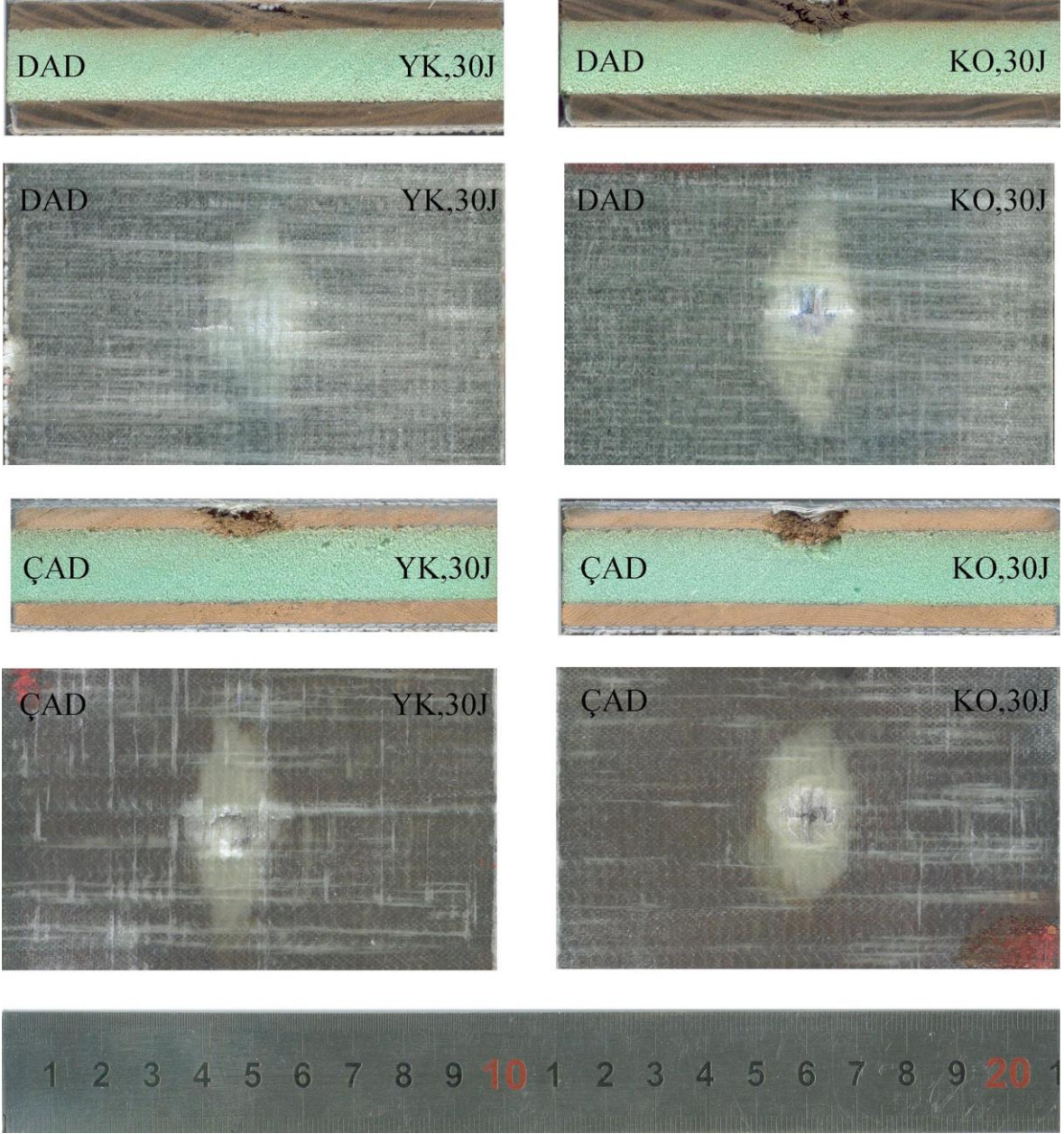
Tüm katmanlardaki hasar durumunu görebilmek için numuneler darbe alan kısımdan kesilmiştir. DSB testleri, ASTM C364/C364M standardına göre yapılmıştır (C364/C364M—07, 2007). Deplasman kontrollü tek eksenli (0° yönündeki) basma yükü, Şekil 6.11 (a)'da gösterildiği gibi 2mm/dak yükleme hızında Zwick Roell 250 kN test makinesinde numunelere uygulanmıştır. Test aparatı ve numune boyutları ile enine dik (edgewise) basma testinin ayrıntılı görünümü şematik olarak Şekil 6.11 (b)'de verilmiştir. Numunenin yükleme kafasına temas eden yüzeylerinde iyi bir yük aktarımı sağlamak ve lokal gerilme yığılmasından kaçınmak için bu bölgeler düz bir şekilde kesilmiştir (Shipsha, Hallström, Zenkert, & Materials, 2003; Shipsha & Zenkert, 2005). Dişbudak ara tabakaları olan ÇSY numuneler, düz köpük çekirdekli “DAD” ve kanallı köpük çekirdekli “DAK” olarak kısaltılmıştır. “ÇAD” düz köpük çekirdekli çam ara katmanlara sahip numuneler için kullanılmıştır.



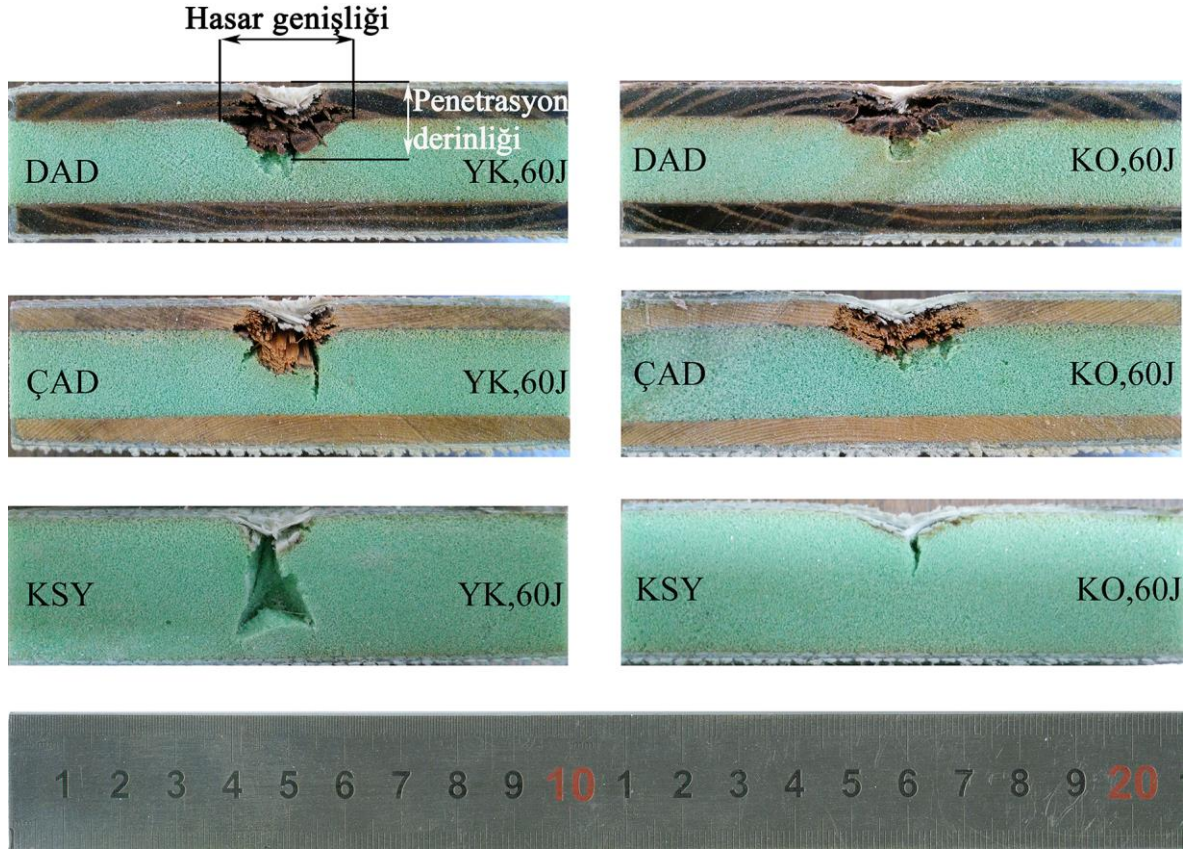
Şekil 6.11: a) Enine dik basma testi öncesi sandviç kompozitin fotoğrafı, b) enine dik basma test aparatı şematik görünümü ve numune boyutları.

6.2.1 Kesit Alma

Sandviç panellerin kesitinde görülen hasarlı bölgenin genişliği ve yüksekliği kumpas vasıtasıyla ölçülmüştür. Tablo 6.1, sandviç panellerin kesit görünüşlerindeki hasar boyutlarını özetlemektedir. 30 J darbeden sonra tüm numunelerin en üst tabakasının yüzeyinde oluşan “beyazlıklar” lokal delaminasyon hasarını göstermektedir (Şekil 6.12). 30 J enerji seviyesinde darbe alan DAD ve ÇAD numunelerinde, konik impaktör elyaf kırılmasına ve yarı-küresel impaktör üst cam elyaf tabakalarda delaminasyona ve matris kırılmasına neden olmuştur (Şekil 6.12). 60 J enerji seviyesinde darbe alan KSY ve ÇSY numunelerinin hasarlı bölgeleri şekil 6.13 de kesit olarak gösterilmektedir. En üst tabakadaki penetrasyon ve çarpma bölgesinin altındaki çöküntü ile ezilen köpük, görsel incelemeler ile tespit edilmiştir. Çam ve dişbudak ara tabakaları içeren ÇSY örneklerinin hasar genişliği, Tablo 6.1'de görüldüğü gibi yarı-küresel impaktör için aynı bulunmuştur. Ayrıca, yarı küresel impaktörün KSY numunesindeki penetrasyonu ÇSY numunelerinden iki kata yakın daha derin olurken, konik impaktör tüm numunelerde neredeyse aynı hasar derinliğine yol açmıştır. Beklendiği gibi, ÇSY panelleri, her iki impaktör için KSY numunelerine kıyasla lokal darbe hasarına karşı daha fazla direnç göstermiştir.



Şekil 6.12: DAD ve ÇAD sandviç panellerinin YK ve KO impaktörlerin 30 J darbesinden sonraki kesit hasar görüntüleri.



Şekil 6.13: Sandviç panellerinin YK ve KO impaktörlerin 60 J darbesinden sonraki kesit hasar görüntüleri.

Tablo 6.2: Kontrol ve darbe sonrası panellerin basma testi sonuçları.

Numuneler	KSY		DAD		ÇAD		DAK		
	25 mm PVC		15 mm PVC		15 mm PVC		15 mm Kanallı-PVC		
	F_{max} (N)	σ_{fmax} (MPa)	F_{max} (N)	σ_{fmax} (MPa)	F_{max} (N)	σ_{fmax} (MPa)	F_{max} (N)	σ_{fmax} (MPa)	
Kontrol (Darbe almamış)	29693	99	93023	77.5	89399	74.5	94510	78.8	
YK impaktör	30 J	test edilmedi	78520	65.4	68639	57.2	92920	77.4	
	60 J	26937	89.8	72244	60.2	62842	52.4	83081	69.2
KO impaktör	30 J	test edilmedi	etkisiz	etkisiz	72750	60.6	etkisiz	etkisiz	
	60 J	25079	83.6	etkisiz	etkisiz	59639	49.7	etkisiz	etkisiz

6.2.2 Darbe Sonrası Basma (DSB)

Darbe sonrası hasar mekanizmaları ve sandviç panellerin darbe sonrası artık basma dayanımı deneysel olarak incelenmiştir. Darbe almış ve kontrol (darbe almamış) KSY ve ÇSY numuneleri uçlarından dikine yüklemek koşulu ile kolon basma testleri yapılmıştır. Kontrol numunelerinin enine dik basma test sonuçları sandviç panellerin basma dayanım

değerleri ile karşılaştırmak için kullanılmıştır. Kontrol ve hasarlı panellerin basma testi sonuçları Tablo 6.2'de özetlenmiştir. DSB testleri sırasında, düzlem içi basma yükünün büyük bir kısmı en üst ve en alt cam elyaf tabakalar tarafından taşınmıştır. Sandviç numunenin yüzeylerindeki basma gerilmesi, σ_f , aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır ASTM-C364/C364M-07 (2007):

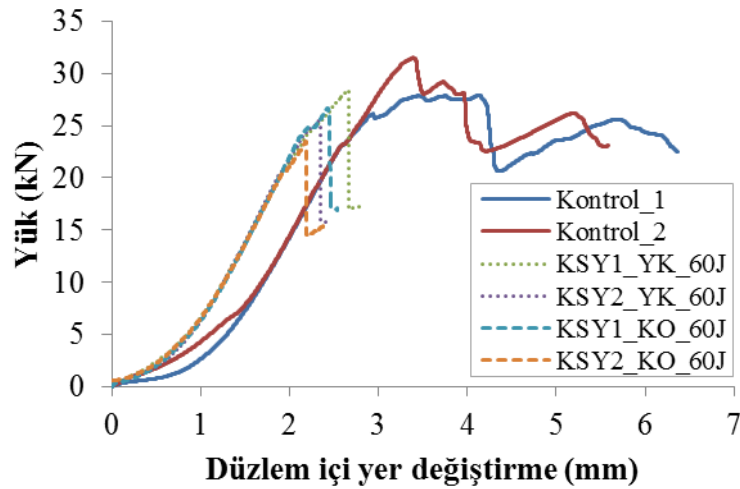
$$\sigma_f = P/2t_f b \quad (6.1)$$

burada t_f , yüzey levha kalınlığı ve b , sandviç tabakanın genişliğidir.

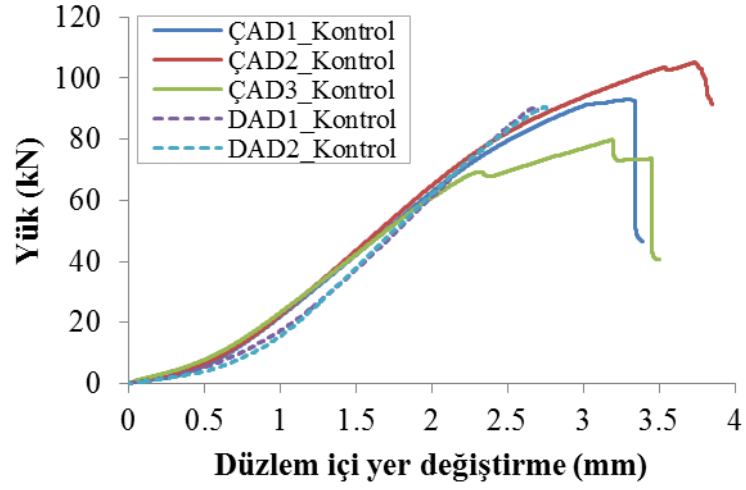
Darbe uygulanmamış KSY numuneleri, kolon burkulmasından dolayı hasar almış ve çekirdek hasarı oluşmamıştır. Darbe sonrası KSY ve ÇSY numunelerinde, üst cam elyaf tabakasındaki darbe hasarlı bölgeden panellerin her iki kenarına da uzayan çatlaklar görülmüştür. (Şekil. 6.19 a, d, f, i). KSY numunelerinin basma yükü - düzlem içi yer değiştirme eğrileri, Şekil 6.14 'te gösterilmiştir. Her durum için iki test yapılmıştır. KSY numunelerinin DSB mukavemeti, (darbe almamış) kontrol KSY numunesine kıyasla 60 J darbe enerjisinde yarıküresel (YK) impaktör ile %9.3 ve konik (KO) impaktör ile %15.5 oranında düşmüştür. Konik impaktörün neden olduğu hasarda mukavemet düşüşünün fazla olmasının, üst tabakadaki yoğun delaminasyondan kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Basma hasar yükleri KSY ile ÇSY kontrol numuneleri kıyaslandığında ÇAD 3.01 kat ve DAD 3.13 kat daha fazla olmuştur. Şekil 6.15'te gösterildiği gibi hasar yükleri karşılaştırıldığında DAD numunesi ÇAD numunesine göre biraz daha yüksek yük görmüştür.

Şekil 6.16 ve 6.17 de, yarı-küresel (YK) ve konik (KO) impaktörler tarafından darbe alan ÇAD numunelerinin yük - düzlem içi yer değiştirme eğrilerini göstermektedir. Beklendiği gibi, DSB mukavemeti darbe enerjisi arttıkça azalmıştır. 60 J enerji seviyesinde konik impaktör tarafından hasar görmüş ÇAD numunelerinin DSB mukavemeti en düşük olup, darbe almamış kontrol numunelerininle karşılaştırıldığında %33.3 oranında düşmüştür. DSB testleri sırasında, ÇAD örnekleri genel olarak içe doğru burkularak kırılmışlardır. Şekil 6.19 (b-f)'de görüldüğü gibi, darbe alan üst tabaka altındaki çam ağacı ara katmanı bası altında kırılmış ve çekirdek hasarı tespit edilmemiştir.

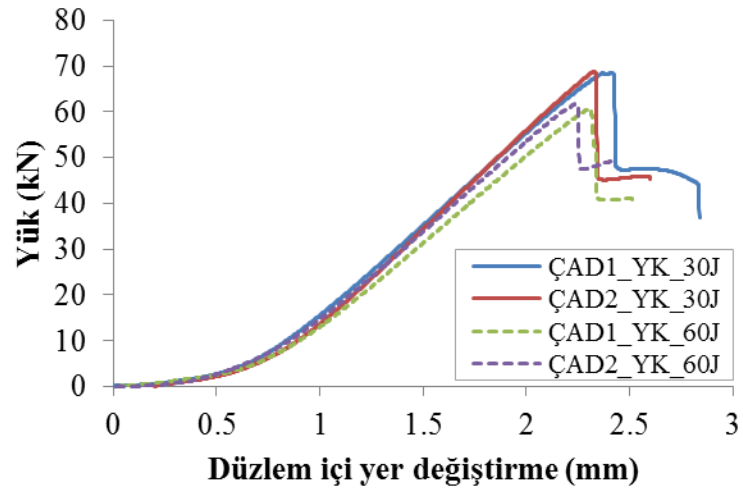
Darbe almamış DAD ve DAK kontrol numuneleri neredeyse aynı basma yükünde kırılmış ve tüm numuneler arasında en yüksek DSB mukavemetini göstermiştir (Tablo6.2). Her iki numune de içe doğru burkularak kırılmıştır. DAD 'lara kıyasla, DAK kontrol numunelerinde oluklu PVC köpüğün kullanılmasının basma mukavemet değerlerini önemli ölçüde değiştirmedini göstermiştir. Şekil 6.18 yarı-küresel (YK) impaktör tarafından darbe alan DAD ve DAK numunelerinin yük - düzlem içi yer değiştirme eğrilerini göstermektedir. Oluklu çekirdek yapısının kullanılması, kayma çatlaklarının ilerlemesini ve burkulmayı geciktirmiştir. Yarı küresel impaktör ile yapılan darbe testlerinde, DAD numunelerinin DSB mukavemeti kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında 30 J için %15.6 ve 60 J için %22.3 oranında azalmıştır. Ayrıca, konik impaktör ile gerçekleştirilen 30J ve 60 J darbe testleri, DAD ve DAK numunelerinin DSB performansını etkilememiştir. Bu örnekler Tablo 6.2' de görüldüğü gibi “etkisiz” olarak adlandırılmıştır. Benzer şekilde, 30 J enerji seviyesindeki yarı küresel impaktör tarafından uygulanan darbeye bağlı hasarın, DAK numunelerinin DSB mukavemeti üzerinde küçük bir etkisi olmuştur. Darbe alan dışbudaklı numuneler, çam ağacı benzerlerine göre daha iyi bir basma mukavemeti göstermiştir (Tablo 6.2). Hasar modları bakımından, Şekil 6.19 (g-l)'de gösterildiği gibi dışbudaklı numunelerde, basma yükünden dolayı ara tabakalarda kayma burkulması ve çöküntü gözlenmiştir. Genel DSB verileri göz önüne alındığında, DAK örnekleri ÇAD ve DAD' tan daha iyi performans göstermiştir. Şekil 6.19 'da görüldüğü gibi DSB testleri sırasında, kontrol ve hasarlı DAD, ÇAD ve DAK numunelerin ahşap tabakaları ile köpük çekirdek arasında bir ayrılma gözlenmemiştir.



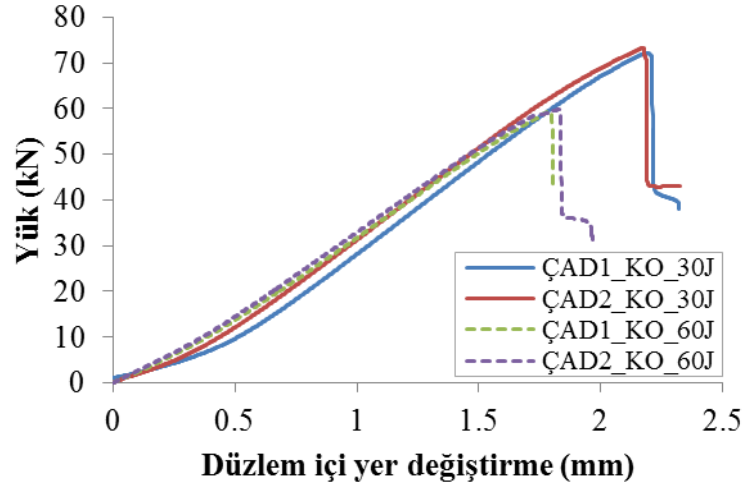
Şekil 6.14: YK ve KO impaktörler ile uygulanan 60 J darbeden sonra kontrol ve KSY numunelerinin yük düzlem içi yer değiştirme eğrileri.



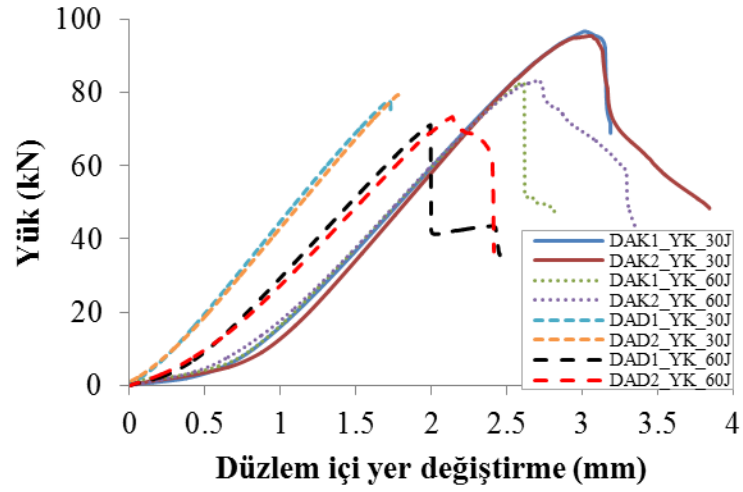
Şekil 6.15: ÇAD ve DAD Kontrol numunelerinin yük düzlem içi yer değiştirme eğrileri.



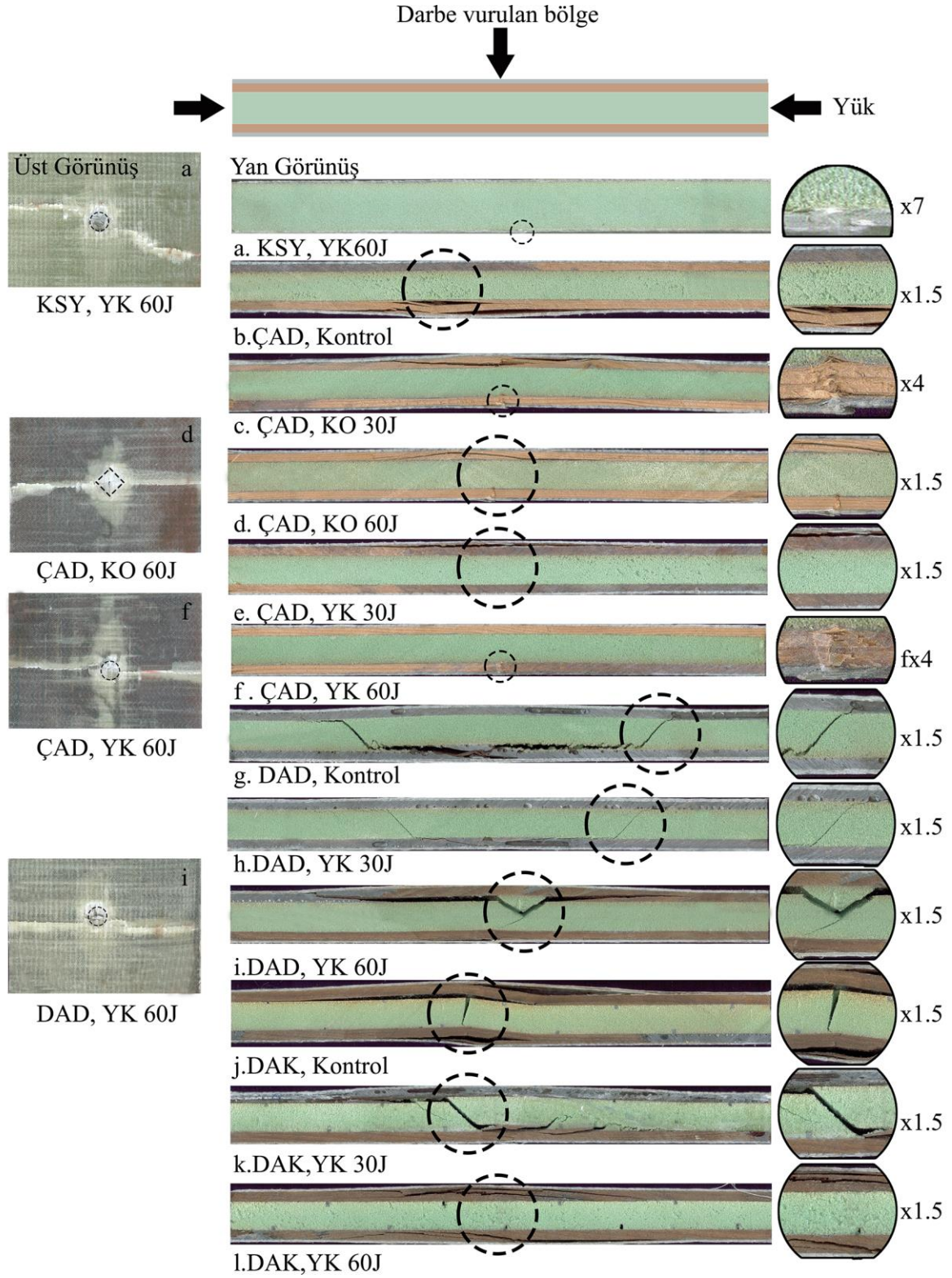
Şekil 6.16: Yarı küresel (YK) impaktör ile hasar görmüş ÇAD numunelerinin yük düzlem içi yer değiştirme eğrileri.



Şekil 6.17: Konik (KO) impaktör ile hasar görmüş ÇAD numunelerinin yük düzlem içi yer değiştirme eğrileri.



Şekil 6.18: Hasarlı DAD ve DAK numunelerinin yük düzlem içi yer değiştirme eğrileri.



Şekil 6.19: DSB testlerinden sonra hasarlı KSY, ÇAD, DAD ve DAK sandviç panellerinin fotoğrafları.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1 TKS, TKSK, İKSK Tasarımlarının Darbe Sonuçları

Endüstriyel ahşap malzemelerin doğal olarak gevrek bir şekilde kırılması darbe yükleri altında daha duyarlı olmasına neden olmaktadır. Bu zayıflığa rağmen, geri dönüştürülebilir olmaları nedeniyle çevre dostu malzemeler olarak kabul edilirler ve darbe dirençlerini artırmak için alternatif uygulamalar geliştirilmektedir.

Bu çalışmada, geri dönüşümlü ve uzun ömürlü, ısı işlem görmüş ahşap ve kauçuk-mantar malzemeleri kullanılarak yenilikçi, çevre dostu ve darbelere dayanıklı sandviç yapı tasarımları geliştirilmiştir. Düşük hızda darbe yükü altında performanslarını değerlendirmek için üç farklı tasarım sunulmuştur. Hasar görmüş numunelerin enine kesit görüntülerinden, iç kısımdaki hasarlar ve penetrasyon derinlikleri incelenmiştir. Temel bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Yük-deplasman grafikleri altındaki alana eşit olan absorbe edilen enerji değerleri test verilerinden elde edilmiştir. 15 J darbe enerjisi için üst ahşap katman delinmiş ve darbe enerjisinin %34.8'ini emmiş, kalan %59.2'si ise köpük çekirdek ve/veya yapıya bağlı olarak kauçuk mantardaki hasara harcanmıştır. 12 mm penetrasyonda, darbe enerjisinin %94'ü emilmiş ve %6'sı geri tepme olarak harcanmıştır.
- Kauçuk mantar ara katmanın eklenmesi, enerji emilimini artırarak 30 J darbe enerjisi için penetrasyon derinliğinin azalmasına neden olmuştur. Düşük darbe enerjisinde, kauçuk mantar köpüğün kırılmasını önlemiş ve bu nedenle hasar sadece geri dönüştürülebilir malzemeler ile sınırlı kalmıştır. Bu, onarım işlemleri için bir avantaj olmuştur ve daha sonraki tekrarlı yüklemelerde köpüğün çatlak ilerlemesinin önüne geçilmiştir.
- Sert köpük çekirdek yerine daha esnek kauçuk mantar malzemesinin kullanılmasına bağlı olarak kauçuk mantar kalınlığının artırılması penetrasyon derinliği artmıştır. Bununla birlikte, absorbe edilen enerji yaklaşık %10 artarken, sandviç yapının ağırlığının artmasıyla spesifik absorbe edilen enerji azalmıştır.
- TKS ve TKSK yapıları için maksimum temas kuvveti değerleri 1.5 ile 2 kN arasında olmuştur. İKSK yapılarında, yüksek rijitlikteki E-cam iç kompozit katmanının eklenmesi nedeniyle 4.5 kN'ye yükselmiştir. Daha yüksek temas kuvveti, daha yüksek perforasyon eşiği ve absorbe edilen enerji ile sonuçlanmıştır.

Perfore olmayan enerji seviyeleri için, İKSK tasarımlarından darbe tarafında yüksek yoğunluklu köpük çekirdek kullanılması yapının önemli ölçüde hafiflemesini sağlamıştır.

- Ekonomik açıdan bakıldığında, spesifik absorbe edilen enerji ve absorbe edilen enerjinin maliyete oranlarına dayanarak, YYK2'nin önerilen tasarım alternatifleri arasında en iyisi olduğu bulunmuştur.
- Kauçuk mantar malzemesinin eklenmesi, sandviç yapıların geri dönüşüm oranını %57'ye kadar arttırmıştır. İKSK tasarımlarında geri dönüşüm oranı %35.6'dır.

Önerilen ahşap tabakalı sandviç kompozit tasarımların, değerli estetik görünülerinin yanı sıra üretimi, onarımı ve geri dönüşümü kolaydır. Bu yapılandırmalar, güverte ve kabin gibi zemin uygulamalarında, perde panellerinde ve iç ve dış tasarım uygulamalarında kullanılabilir.

7.2 KSY, ÇSY Tasarımlarının Darbe ve Darbe Sonrası Basma Sonuçları

Darbe hasarını en aza indirmek ve klasik sandviç yapıların hasar sonrası davranışını iyileştirmek için ince cam elyaf tabaka ve köpük çekirdek arasında çam ve dışbudak kullanılmasıyla çok katmanlı sandviç paneller geliştirilmiştir. Basma yükü yönüne paralel liflere sahip ahşap ara tabakalarının kullanılması, KSY numunelerine kıyasla çok katmanlı sandviç panellerin (ÇSY) darbe sonrası basma mukavemetini arttırmıştır. Genel olarak, DAD, ÇAD ve DAK numuneleri, düzlem içi basma yükü altında iyi bir performans göstermişler ve sandviç güverte ve bölme panelleri gibi tekne yapım endüstrisindeki iç uygulamalarında kullanılma potansiyeline sahip olabilirler.

Bu araştırma, önerilen çok katmanlı kompozit yapıların uygulanabilirliğini göstermiştir. Isıl işlem görmüş ahşap tabakanın kalınlığının sandviç panellerin mekanik performansı üzerindeki etkisi daha ayrıntılı olarak araştırılmalıdır.

8. KAYNAKLAR

- Abrate, S. (2011). *Impact engineering of composite structures* (Vol. 526): Springer Science & Business Media.
- Adams, W. W., & Eby, R. (1987). High-performance polymer fibers. *MRS Bulletin*, 12(8), 22-26.
- Al-Shamary, A. K. J., Karakuzu, R., & Özdemir, O. (2016). Low-velocity impact response of sandwich composites with different foam core configurations. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 18(6), 754-768.
- Amato, I. (1999). Leo Baekeland. *Time New York*, 153, 80-87.
- Anderson, T., & Madenci, E. (2000). Experimental investigation of low-velocity impact characteristics of sandwich composites. *Composite Structures*, 50(3), 239-247.
- Ashby, M. F., Evans, T., Fleck, N. A., Hutchinson, J., Wadley, H., & Gibson, L. (2000). *Metal foams: a design guide*: Elsevier.
- Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (2012). *Engineering materials 1: an introduction to properties, applications and design* (Vol. 1): Elsevier.
- Associates, E. G. (1999). *Marine composites*: Eric Greene Associates.
- ASTM-C364/C364M-07. (2007). Standard test method for edgewise compressive strength of sandwich constructions. In. West Conshohocken, PA.
- ASTM-D3763-15. (2015). Standard Test Method for High Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors. In. West Conshohocken, PA.
- ASTM-D6641/D6641M. (2016). Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture. In. West Conshohocken, PA.
- ASTM-D7078/D7078M. (2012). Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method. In. West Conshohocken, PA.

- ASTM. (1999). ASTM C274-99, ASTM standard terminology of structural sandwich constructions. In. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Atas, C., Akgun, Y., Dagdelen, O., Icten, B. M., & Sarikanat, M. (2011). An experimental investigation on the low velocity impact response of composite plates repaired by VARIM and hand lay-up processes. *Composite Structures*, 93(3), 1178-1186.
- Atas, C., & Potoğlu, U. (2016). The effect of face-sheet thickness on low-velocity impact response of sandwich composites with foam cores. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 18(2), 215-228.
- Atas, C., & Sayman, O. (2008). An overall view on impact response of woven fabric composite plates. *Composite Structures*, 82(3), 336-345.
- Atas, C., & Sevim, C. (2010). On the impact response of sandwich composites with cores of balsa wood and PVC foam. *Composite Structures*, 93(1), 40-48.
- Atkinson, R. (1997). Innovative uses for sandwich constructions. *Reinforced Plastics*, 41(2), 30-33.
- Barbero, E. J. (2017). *Introduction to composite materials design*: CRC press.
- Bhatt, A. T., Gohil, P. P., & Chaudhary, V. (2018). *Primary Manufacturing Processes for Fiber Reinforced Composites: History, Development & Future Research Trends*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Bozkurt, A. Y., & Erdin, N. (1997). *Ağaç teknolojisi*.
- Bull, P. H., & Edgren, F. (2004). Compressive strength after impact of CFRP-foam core sandwich panels in marine applications. *Composites Part B: Engineering*, 35(6-8), 535-541.
- C364/C364M—07, A. (2007). Standard test method for edgewise compressive strength of sandwich constructions.

- Calabrese, L., Di Bella, G., & Fiore, V. (2016). Manufacture of marine composite sandwich structures. In *Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites* (pp. 57-78): Elsevier.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2007). *Materials science and engineering: an introduction* (Vol. 7): John Wiley & Sons New York.
- Carleton, E. (1940). Unsaturated acid glycol resin complex and process of making same. In: Google Patents.
- Carlsson, L. A., & Kardomateas, G. A. (2011). *Structural and failure mechanics of sandwich composites* (Vol. 121): Springer Science & Business Media.
- Cassis, F. A., & Talbot, R. C. (1998). Polyester and vinyl ester resins. In *Handbook of Composites* (pp. 34-47): Springer.
- Castro, O., Silva, J. M., Devezas, T., Silva, A., & Gil, L. (2010). Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. *Materials & Design*, 31(1), 425-432.
- Chalmers, D. (1994). The potential for the use of composite materials in marine structures. *Marine structures*, 7(2-5), 441-456.
- Chawla, K. K. (2012). *Composite materials: science and engineering*: Springer Science & Business Media.
- Clegg, N. (2006). *How to Paint Your Boat: Painting-Varnishing-Antifouling*: Sheridan House, Inc.
- Clyne, T., & Hull, D. (2019). *An introduction to composite materials*: Cambridge university press.
- Colloca, M., Dorogokupets, G., Gupta, N., & Porfiri, M. (2012). Mechanical properties and failure mechanisms of closed-cell PVC foams. *International Journal of Crashworthiness*, 17(3), 327-336.

- Conrardy, W. P. (1971). *Accelerating Utilization of New Materials*. Washington, National Academy of Sciences – National Academy of Engineering, Springfield, Va, 1971.
- Craugh, L., & Kwon, Y. (2013). Coupled finite element and cellular automata methods for analysis of composite structures with fluid–structure interaction. *Composite Structures*, 102, 124-137.
- Cremonini, C., Negro, F., Properzi, M., & Zanuttini, R. (2008). *Wood-based composites in marine craft: The state of the art in Italy*. Paper presented at the COST E49 conference: Lightweight wood-base composites. Production, properties and usage, Bled, 23rd-25th June.
- Crupi, V., Epasto, G., & Guglielmino, E. (2013). Comparison of aluminium sandwiches for lightweight ship structures: honeycomb vs. foam. *Marine Structures*, 30, 74-96.
- Daniel, I., Abot, J., Schubel, P., & Luo, J. (2012). Response and damage tolerance of composite sandwich structures under low velocity impact. *Experimental Mechanics*, 52(1), 37-47.
- Daniel, I. M., Ishai, O., Daniel, I. M., & Daniel, I. (1994). *Engineering mechanics of composite materials* (Vol. 3): Oxford university press New York.
- Daniels, I., & Ishai, O. (2006). *Engineering mechanics of composite materials*. In: New York: Oxford University Press.
- Datasheet for Airex C70 PVC Foam. Retrieved from <http://www.airexbaltekbanova.com/airex-c70-pvc-foam.html>
- De Bruyne, N. A. (1965). *Adhesion and adhesives*: Elsevier Publishing Company.
- Di Bella, G., Calabrese, L., & Borsellino, C. (2012). Mechanical characterisation of a glass/polyester sandwich structure for marine applications. *Materials & Design*, 42, 486-494.

- DIAB. (2002). *Vacuum infusing processing with DIAB core materials. A guide to resin infusion of fiber-reinforced composites. Technical bulletin.*
- DIN. (1976). 52185-Testing of wood; compression test parallel to grain. In. Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin: German Institute for Standardization.
- DIN. (1993). EN 310-Wood-based panels; determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. In. Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin: German Institute for Standardization.
- Donald, D. (1995). *American Warplanes of World War II*: Grange Books.
- Dvorak, G. J., & Suvorov, A. P. (2006). Protection of sandwich plates from low-velocity impact. *Journal of Composite Materials*, 40(15), 1317-1331.
- Echtermeyer, A. T., Gagani, A., Krauklis, A., & Mazan, T. (2018). Multiscale modelling of environmental degradation—First steps. In *Durability of Composites in a Marine Environment 2* (pp. 135-149): Springer.
- Edgren, F., Asp, L. E., & Bull, P. H. (2004). Compressive failure of impacted NCF composite sandwich panels-Characterisation of the failure process. *Journal of Composite Materials*, 38(6), 495-514.
- Edwards, K. (1998). An overview of the technology of fibre-reinforced plastics for design purposes. *Materials & Design*, 19(1-2), 1-10.
- Egglestone, G., & Turley, D. (1994). Flammability of GRP for use in ship superstructures. *Fire and Materials*, 18(4), 255-260.
- ‘End Grain’ ve ‘Edge Grain’ Kesme Tahtası. (2019). Retrieved from <https://ormandakimarangoz.com/2018/11/08/end-grain-ve-edge-grain-kesme-tahtasi/>

- Fang, H., Sun, H., Liu, W., Wang, L., Bai, Y., & Hui, D. (2015). Mechanical performance of innovative GFRP-bamboo-wood sandwich beams: Experimental and modelling investigation. *Composites Part B: Engineering*, 79, 182-196.
- Frank Woodring, S. W. (2007). *Images of Aviation Fairchild Aircraft*.
- Galanis, K. (2002). *Hull construction with composite materials for ships over 100 m in length*. Massachusetts Institute of Technology,
- Games, S. (1938). Method and apparatus for making glass wool. In: Google Patents.
- Gil, L. (2009). Cork composites: a review. *Materials*, 2(3), 776-789.
- Goubalt, P., & Mayes, S. (1996). Comparative analysis of metal and composite materials for the primary structures of a patrol craft. *Naval Engineers Journal*, 108(3), 387-397.
- Graham-Jones, J., & Summerscales, J. (2015). *Marine applications of advanced fibre-reinforced composites*: Woodhead Publishing.
- Green, D. W., Winandy, J. E., & Kretschmann, D. E. (1999). Mechanical properties of wood. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL; GTR-113: Pages 4.1-4.45, 113.
- Guillermin, O. (2010). Composites put wind in the sails of all kinds of vessels. *Reinforced Plastics*, 54(4), 28-31.
- Hadcock, R. N. (1998). Aircraft Applications. In *Handbook of Composites* (pp. 1022-1043): Springer.
- Handbook, T. (2003). Helsinki: Finnish ThermoWood Association.
- Handbook, W. (1999). Wood Handbook-Wood as an engineering material. *US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, USA. Gen. Tech. Rep. FPLGTR-113*.

- Hartley, J. C., Day, H. I., & Wilson, J. L. (1958). Composite firearm barrel comprising glass fibers. In: Google Patents.
- Hazizan, M. A., & Cantwell, W. (2002). The low velocity impact response of foam-based sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*, 33(3), 193-204.
- Hellbratt, S., & Vallbo, S. (1998). Practical Aspects on Structural Analysis of a Weight Optimized FRP-Sandwich Stealth Corvette. *Sandwich Construction*, 4, 14-29.
- Herranen, H., Pabut, O., Eerme, M., Majak, J., Pohlak, M., Jaan, K., . . . Aruniit, A. (2012). Design and testing of sandwich structures with different core materials. *Materials Science*, 18(1), 45-50.
- Hightower, B. E., & Brenner, W. (1984). *Historic Properties Report: Saginaw Army Aircraft Plant, Fort Worth, Texas*. Retrieved from
- Hoge, J., & Leach, C. (2016). Epoxy resin infused boat hulls. *Reinforced Plastics*, 60(4), 221-223.
- How Tree Trunks Are Cut to Produce Wood With Different Appearances and Uses. (2019). Retrieved from <https://www.archdaily.com/894449/how-tree-trunks-are-cut-to-produce-wood-with-different-appearances-and-uses>
- Iejavs, J., & Spulle, U. (2013). Compression strength of three layer cellular wood panels. *Drewno*, 56.
- ISO. (2012). International Standard. Plastics – ISO 527-1-determination of tensile properties – part 1: general principles.
- Jedari Salami, S., Sadighi, M., Shakeri, M., & Moeinfar, M. (2013). An investigation on low velocity impact response of multilayer sandwich composite structures. *The Scientific World Journal*, 2013.
- Jiang, D., & Shu, D. (2005). Local displacement of core in two-layer sandwich composite structures subjected to low velocity impact. *Composite Structures*, 71(1), 53-60.

- Job, S. (2015). Why not composites in ships? *Reinforced Plastics*, 59(2), 90-93.
- Jones, D. E. (1983). *Dynamic Loading Analysis and Advanced Composites*. Lazzara Marine Corporation, Tampa, FL.
- Karger-Kocsis, J., Mahmood, H., & Pegoretti, A. (2015). Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites. *Progress in Materials Science*, 73, 1-43.
- Karlsson, K. F., & TomasÅström, B. (1997). Manufacturing and applications of structural sandwich components. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 28(2), 97-111.
- Kassapoglou, C., Jonas, P. J., & Abbott, R. (1988). Compressive strength of composite sandwich panels after impact damage: an experimental and analytical study. *Journal of Composites, Technology Research*, 10(2), 65-73.
- Katzman, H. A. (1987). Fiber Coatings for the Fabrication of Graphite-Reinforced Magnesium Composites. *Journal of Materials Science*, 22(1), 144-148. doi:Doi 10.1007/Bf01160563
- Kaw, A. K. (2005). *Mechanics of composite materials*: CRC press.
- Kimpara, I. (1991). Use of advanced composite materials in marine vehicles. *Marine Structures*, 4(2), 117-127.
- Knapic, S., Oliveira, V., Machado, J. S., & Pereira, H. (2016). Cork as a building material: a review. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(6), 775-791.
- Kolat, K., Neşer, G., & Özes, Ç. (2007). The effect of sea water exposure on the interfacial fracture of some sandwich systems in marine use. *Composite Structures*, 78(1), 11-17.

- Kootsookos, A., & Burchill, P. (2004). The effect of the degree of cure on the corrosion resistance of vinyl ester/glass fibre composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(4), 501-508.
- Kootsookos, A., & Mouritz, A. (2004). Seawater durability of glass-and carbon-polymer composites. *Composites Science and Technology*, 64(10-11), 1503-1511.
- Korkut S., K. M. (2019). Hafif Sandviç Panellerde Yeni Ekolojik Bir Ürün: DendroLight. Retrieved from <http://www.sabittuncel.com/dendrolight/>
- Kropa, E. L., & Bradley, T. F. (1942). Maleic anhydride-ethylene glycolmethallyl alcohol resin. In: Google Patents.
- Kumar, S., & R, R. (2015). *Development and Testing of Coir Fiber Reinforced Sandwich Panel*.
- Kwoleck, S. (1974). Wholly aromatic carbocyclic polycarbonamide fiber having orientation angle of less than about 45°. In: Google Patents.
- Lakreb, N., Bezzazi, B., & Pereira, H. (2015). Mechanical behavior of multilayered sandwich panels of wood veneer and a core of cork agglomerates. *Materials & Design (1980-2015)*, 65, 627-636.
- Le Duigou, A., Deux, J.-M., Davies, P., & Baley, C. (2012). PLLA/flax mat/balsa bio-sandwich-environmental impact and simplified life cycle analysis. *Applied Composite Materials*, 19(3-4), 363-378.
- Loganathan, S. B., & Shivanand, H. K. (2015). Effect of Core Thickness and Core Density on Low Velocity Impact Behavior of Sandwich Panels with PU Foam Core. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 3(03), 164.
- Lonno, A., & Hellbratt, S. (1996). *Use of carbon fibre in a 63M high speed vessel, YS2000, for the Swedish Navy*. Paper presented at the Sandwich Constructions 3, Proceedings of 3 rd International Conference on Sandwich Constructions.

- Mack, P. (2008). Sandwich construction and the infusion process. *JEC Composites*(39), 54-56.
- Mäkinen, K.-E., Hellbratt, S.-E., & Olsson, K.-A. (1998). The development of sandwich structures for naval vessels during 25 years. In *Mechanics of Sandwich Structures* (pp. 13-28): Springer.
- Mamalis, A., Spentzas, K., Pantelelis, N., Manolakos, D., & Ioannidis, M. (2008). A new hybrid concept for sandwich structures. *Composite Structures*, 83(4), 335-340.
- Marsh, G. (2006). 50 years of reinforced plastic boats. *Reinforced Plastics*, 50(9), 16-19.
- Marsh, G. (2007). Vinyl ester—the midway boat building resin. *Reinforced Plastics*, 51(8), 20-23.
- Marsh, G. (2010). Marine composites—drawbacks and successes. *Reinforced Plastics*, 54(4), 18-22.
- Material properties. (2019). Retrieved from <http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/properties/default.html>
- Matos, M., & Simplicio, M. (2006). Innovation and sustainability in mechanical design through materials selection. *Materials & Design*, 27(1), 74-78.
- Mazumdar, S. (2001). *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*: CrC press.
- Mitra, N. (2010). A methodology for improving shear performance of marine grade sandwich composites: sandwich composite panel with shear key. *Composite Structures*, 92(5), 1065-1072.
- Mitrevski, T., Marshall, I. H., & Thomson, R. (2006). The influence of impactor shape on the damage to composite laminates. *Composite Structures*, 76(1-2), 116-122.
- Mouritz, A., Gellert, E., Burchill, P., & Challis, K. (2001). Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Composite Structures*, 53(1), 21-42.

- Mouritz, A. P., & Mathys, Z. (1999). Post-fire mechanical properties of marine polymer composites. *Composite Structures*, 47(1-4), 643-653.
- Mouritz, A. P., Mathys, Z. (2001). Post-fire mechanical properties of glass-reinforced polyester composites. *Composites Science Technology*, 61(4), 475-490.
- Murphy, J. (1998). *The reinforced plastics handbook*: Elsevier.
- Negro, F., Cremonini, C., Zanuttini, R., Properzi, M., & Pichelin, F. (2011). A new wood-based lightweight composite for boatbuilding. *Wood Res*, 56(2), 257-265.
- Neşer, G. (2017). Polymer based composites in marine use: history and future trends. *Procedia Engineering*, 194, 19-24.
- Nordtest. (1998). Sandwich panels: Local impact strength of frp-sandwich panels. In Espoo, Finland.
- Ozdemir, O., Karakuzu, R., & Al-Shamary, A. K. J. (2015). Core-thickness effect on the impact response of sandwich composites with poly (vinyl chloride) and poly (ethylene terephthalate) foam cores. *Journal of Composite Materials*, 49(11), 1315-1329.
- Ozdemir, O., Oztoprak, N., & Kandas, H. (2018). Single and repeated impact behaviors of bio-sandwich structures consisting of thermoplastic face sheets and different balsa core thicknesses. *Composites Part B: Engineering*, 149, 49-57.
- Palucka, T., & Bensaude-Vincent, B. (2002). Composites overview. *History of Recent Science Technology*.
- Parton, V. Z. (1992). *Fracture mechanics: from theory to practice*: CRC Press.
- Pemberton, R., Summerscales, J., & Graham-Jones, J. (2018). *Marine Composites: Design and Performance*: Woodhead Publishing.
- Plywood vs Solid wood. (2019). Retrieved from <http://blog.positiveindians.in/plywood/plywood-vs-solid-wood.html>

- Powers, W. F. (2000). Automotive materials in the 21st century. *Advanced Materials & Processes*, 157(5), 38-41.
- Reis, L., & Silva, A. (2009). Mechanical behavior of sandwich structures using natural cork agglomerates as core materials. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 11(6), 487-500.
- Reuterloev, S. (2003). Grooved Core Materials Aid Resin Infusion- Influence on Mechanical Properties. *SAMPE Journal*, 39(6), 57-64.
- Reuterlöv, S. (2002). Cost effective infusion of sandwich composites for marine applications. *Reinforced Plastics*, 46(12), 30-34.
- Rheinfrank, Q., & Norman, W. (1944). Molded glass fiber sandwich fuselage for the BT-15 Airplane. *Army Air Corps Technical Report No. 5159*.
- Russell, C. (2005). Composites: long-term viability and benefits. *Reinforced Plastics*, 49(9), 36-42.
- Sabah, S. A., Kueh, A., & Al-Fasih, M. (2017). Comparative low-velocity impact behavior of bio-inspired and conventional sandwich composite beams. *Composites Science and Technology*, 149, 64-74.
- Sabah, S. A., Kueh, A., & Al-Fasih, M. (2018). Bio-inspired vs. conventional sandwich beams: A low-velocity repeated impact behavior exploration. *Construction and Building Materials*, 169, 193-204.
- Sanderson, S. (2017). Fiberglass, SMC, and Carbon Fiber: History, Construction, and Beyond.
- Schubel, P. M., Luo, J.-J., & Daniel, I. M. (2007). Impact and post impact behavior of composite sandwich panels. *Composites Part A: Applied Science Manufacturing*, 38(3), 1051-1057.

- Seemann III, W. H. (1990). Plastic transfer molding techniques for the production of fiber reinforced plastic structures. In: Google Patents.
- Seidl, R. J. (1956). Paper-honeycomb cores for structural sandwich panels. *Forest Products Laboratory Madison*, 5.
- Selvaraju, S., & Ilaiyavel, S. (2011). Applications of composites in marine industry. *J. Eng. Res. Stud.*, II, 89-91.
- Shahdin, A., Mezeix, L., Bouvet, C., Morlier, J., & Gourinat, Y. (2009). Fabrication and mechanical testing of glass fiber entangled sandwich beams: A comparison with honeycomb and foam sandwich beams. *Composite Structures*, 90(4), 404-412. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.04.003>
- Shin, K. B., Lee, J. Y., & Cho, S. H. (2008). An experimental study of low-velocity impact responses of sandwich panels for Korean low floor bus. *Composite Structures*, 84(3), 228-240.
- Shindo, A. (2000). Polyacrylonitrile (PAN)-based carbon fibers. In (Vol. 1, pp. 1-33).
- Shipsha, A., Hallström, S., Zenkert, D., & Materials. (2003). Failure mechanisms and modelling of impact damage in sandwich beams-a 2D approach: part I- experimental investigation. *Journal of Sandwich Structures*, 5(1), 7-31.
- Shipsha, A., & Zenkert, D. (2005). Compression-after-impact strength of sandwich panels with core crushing damage. *Applied Composite Materials*, 12(3-4), 149-164.
- Singh, M., Summerscales, J., & Wittamore, K. (2010). Disposal of composite boats and other marine composites. In *Management, Recycling and Reuse of Waste Composites* (pp. 495-519): Elsevier.
- Strong, A. B. (2008). *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications*: Society of Manufacturing Engineers.

- Summerscales, J. (2018). Materials selection for marine composites. In *Marine Composites: Design and Performance*: Elsevier/Woodhead imprint.
- Summerscales, J., & Searle, T. (2005). Low-pressure (vacuum infusion) techniques for moulding large composite structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 219(1), 45-58.
- Summerscales, J., Singh, M., & Wittamore, K. (2016). Disposal of composite boats and other marine composites. In *Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites* (pp. 185-213): Elsevier.
- Susainathan, J., Eyma, F., De Luycker, E., Cantarel, A., & Castanie, B. (2018). Experimental investigation of impact behavior of wood-based sandwich structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 109, 10-19.
- Sutherland, L. (2018a). A review of impact testing on marine composite materials: Part I—Marine impacts on marine composites. *Composite Structures*, 188, 197-208.
- Sutherland, L. (2018b). A review of impact testing on marine composite materials: Part II—Impact event and material parameters. *Composite Structures*, 188, 503-511.
- Sutherland, L. (2018c). A review of impact testing on marine composite materials: Part III—Damage tolerance and durability. *Composite Structures*, 188, 512-518.
- Suvorov, A. P., & Dvorak, G. J. (2005). Enhancement of low velocity impact damage resistance of sandwich plates. *International Journal of Solids and Structures*, 42(8), 2323-2344.
- Tagarielli, V., Deshpande, V., & Fleck, N. (2007). The dynamic response of composite sandwich beams to transverse impact. *International Journal of Solids Structures*, 44(7-8), 2442-2457.
- Tech, H. P. P. (2013). Publication No. *FGU 017c*, January.
- Trueman, C. N. (17 March 2015). Plastic. Retrieved from The History Learning Site

- TS46. (1986). Kontrplaklar. In *(Soyma Plakalı)–Genel Amaçlar İçin*. T.S.E. , Ankara.
- Turgut, T., Kayran, A., Alemdaroğlu, N., & Ceylan, M. (2007). Vakum torbalama yöntemi ile kompozit malzemeden yapı üretimi örnek bir havacılık uygulaması. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 48(566), 14-21.
- Türkiye Kompozit İhracatı, (2018). *Composites Turkey*, 19, 30-33.
- Ulven, C., & Vaidya, U. (2006). Post-fire low velocity impact response of marine grade sandwich composites. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, 37(7), 997-1004.
- Vallbo, S. (2005). Material selection considerations for polymer composite structures in naval ship applications. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 7(5), 413-429.
- Varriale, C. (1968). *Application of glass fiber laminates in aircraft*. Paper presented at the SPE Journal.
- Vinson, J. R. (1999). *The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials*: CRC Press.
- Wang, J., Waas, A. M., & Wang, H. (2013). Experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of foam-core sandwich panels. *Composite Structures*, 96, 298-311.
- Wang, L., Liu, W. Q., & Hui, D. (2014). Compression strength of hollow sandwich columns with GFRP skins and a paulownia wood core. *Composites Part B-Engineering*, 60, 495-506. doi:10.1016/j.compositesb.2014.01.013
- Wang, Y., & Grove, S. M. (2008). Modelling microscopic flow in woven fabric reinforcements and its application in dual-scale resin infusion modelling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(5), 843-855. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.01.014>

- Wu, C., & Sun, C. (1996). Low velocity impact damage in composite sandwich beams. *Composite Structures*, 34(1), 21-27.
- Yang, N., Das, P., Blake, J., Sobey, A., & Shenoi, R. (2013). The application of reliability methods in the design of tophat stiffened composite panels under in-plane loading. *Marine Structures*, 32, 68-83.
- Yaşamın Özel Kimyası Kompozit Sektörü, (2016). *Moment Expo, Ocak*, 92, 38-49.
- Zenkert, D. (1995). *An introduction to sandwich structures*.
- Zenkert, D. (1997). *The handbook of sandwich construction: Engineering Materials Advisory Services*.
- Zenkert, D., Shipsha, A., Bull, P., & Hayman, B. (2005). Damage tolerance assessment of composite sandwich panels with localised damage. *Composites Science Technology*, 65(15-16), 2597-2611.
- Zhang, F. B., Liu, W. Q., Wang, L., Qi, Y. J., Zhou, D., & Fang, H. (2015). Flexural behavior of hybrid composite beams with a bamboo layer and lattice ribs. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(7), 521-533.
doi:10.1177/0731684415573811
- Zhou, J., Guan, Z., & Cantwell, W. (2013). The impact response of graded foam sandwich structures. *Composite Structures*, 97, 370-377.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Tayfur Kerem Demircioğlu

Doğum tarihi ve yeri : 24/03/1980, Bursa

e-posta : keremdemircioglu@hotmail.com

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Makine Mühendisliği Bölümü	2004-2007
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Makine Mühendisliği Bölümü	1999-2003
Lise	Bursa Anadolu Lisesi	1991-1998

Yayın Listesi

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Balıkoğlu F., Arslan N., Demircioğlu T.K., İnal O., İren M., Ataş A. (2019). Improving four-point bending performance of marine composite sandwich beams by core modification. *Journal of Composite Materials*, Article number: 874502 Kabul edildi.
2. Demircioğlu T. K., Balıkoğlu F., İnal O., Arslan N., Ay İ., Ataş A. (2018). Experimental investigation on low-velocity impact response of wood skinned sandwich composites with different core configurations. *Materials Today Communications*, 17, 31-39., Doi: 10.1016/j.mtcomm.2018.08.003 [**Tezden türetilmiştir**]
3. Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Yıldız M., Arslan N., Ataş A. (2018). Mechanical performance of marine sandwich composites subjected to flatwise compression and flexural loading: Effect of resin pins. *Journal Of Sandwich Structures Materials*, 109963621879267, Doi: 10.1177/1099636218792671
4. Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., İnal O., Arslan N., Ataş A. (2018). Compression after low velocity impact tests of marine sandwich composites: Effect of intermediate wooden layers. *Composite Structures*, 183(183C), 636-642., Doi: 10.1016/j.compstruct.2017.08.003 [**Tezden türetilmiştir**]

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

1. Efe M.O., Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Ay İ., Arslan N., Ataş A. (2019). Finite Element Analysis On The Flexural Behaviour Of Grid-Scored Foam Cored Marine Sandwich Composite Beams. VI. Uluslararası Fen, Mühendislik ve Mimarlık Bilimlerinde Akademik Çalışmalar Sempozyumu, 1(1), 772-789.
2. Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Arslan N. (2018). The Low-Velocity Impact Behaviour of Wood Skinned Sandwich Composites with Different Core Configurations. *The International Forest Products Congress Orenko* [**Tezden türetilmiştir**]

3. Balıkoğlu F., Yıldız M., Demircioğlu T. K., Ataş A., Arslan N. (2018). Compressive And Flexural Behaviour Of Pin Reinforced Marine Composite Sandwich Beams. *4th International Symposium on Composite Materials (KOMPEGE 2018)*
4. Demircioğlu T. K., Balıkoğlu F., İnal O., Ataş A., Arslan N. (2018). Flexural behaviour of balanced and unbalanced marine sandwich beams with different span-to depth ratios: Experimental and numerical study. *ICCS21*, 11-12., Doi: 10.15651/978-88-938-5079-7
5. Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., İnal O., Ataş A., Arslan N. (2018). FEM analysis of flexural behaviour of grooved, perforated and web-foamed marine sandwich composite beams: Effects of core machining configuration. *ICCS21*, 11-12., Doi: 10.15651/978-88-938-5079-7
6. Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Ataş A., Beyaz S., Arslan N. (2017). Investigation of The Effects of Recycled Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Waste Ratio on Mechanical Properties of Bulk Moulding Compound (BMC). *IPC 2017 5th International Polymeric Composites Symposium and Workshops*
7. Ataş A., Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., İnal O. (2017). Scaling Effect on Tensile Properties of Glass Non-Crimp Fabric/Epoxy Composites. *8th International Advanced Technologies Symposium*
8. Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Ataş A., Arslan N. (2017). Effect of Face Sheet Lay-up on the Static Behavior of Balanced and Unbalanced Sandwich Beams with Different Span-to-Depth Ratios. *8th International Advanced Technologies Symposium*
9. Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., İnal O., Ataş A., Arslan N. (2017). Bending Performance of Grooved-foam-web Core Marine Sandwich Panels: Four-point bending (4PB) Testing Results. *20th International Conference on Composite Structures*
10. Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., İnal O., Ataş A., Arslan N. (2017). Mechanical performance of perforated-web-foam core marine sandwich panels in four-point bending: Experimental and Finite Element Analysis Results. *20th International Conference on Composite Structures*
11. Demircioğlu T. K., Balıkoğlu F., Yıldız M., Ataş A., Arslan N. (2017). Drop weight impact Behaviour of sandwich composites with wooden intermediate layers. *20th International Conference on Composite Structures*
12. Demircioğlu T. K., Balıkoğlu F., İnal O., Ataş A., Sakin R. (2017). The Effects of Strain Rate on Tensile Behaviour of Hybrid Composite Laminates Reinforced with Kevlar/Carbon/Glass Woven Fabrics. *ICCS20 20th International Conference on Composite Structures*, Doi: 10.15651/978-88-938-5041-4
13. İnal O., Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Ataş A. (2017). Pinned joints in quasi-unidirectional glass-fibre NCF /epoxy composite laminates. *3rd International Conference on Mechanics of Composites (MechComp3)*, 131-131., Doi: 10.15651/978-88-938-5029-2
14. Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Arslan N. (2016). Çapraz Oluklu Sandviç Kompozitlerin Eğilme Basma Ve Kayma Performansları. *16. Uluslararası Malzeme Sempozyumu*, Pamukkale
15. Demircioğlu T. K., Balıkoğlu F., Arslan N., Özbey F. (2016). Sandviç Kompozitlerin Darbe Sonrası Basma Dayanım Testleri Ahşap Ara Tabaka Etkisi. *16. Uluslararası Malzeme Sempozyumu [Tezden türetilmiştir]*

16. Yıldız M., Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Arslan N. (2016). Delik Açılmış Pvc Köpük İçeren Denizel Sandviç Kompozitlerin Mekanik Performanslarının Değerlendirilmesi. *16. Uluslararası Malzeme Sempozyumu*, Pamukkale
17. İnal O., Demircioğlu T. K., Balıkoğlu F., Ataş A., Arslan N. (2016). Bending performance of marine sandwich composites after low velocity impact LVI. *19 th International Conference on Composite Structures*
18. Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Arslan N. (2015). Çapraz oluklu ve kesik PVC kor içeren sandviç kompozitlerin eğilme davranışlarının deneysel ve nümerik incelenmesi. *III. Uluslar Arası Katılımlı Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu* .
19. Balıkoğlu F., Yıldız M., Demircioğlu T. K., Arslan N. (2015). Delik açılmış PVC kor içeren sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi. *III. Uluslar Arası Katılımlı Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu*.
20. Akman Y., Candan C., Akdaş D, Demircioğlu T. K., Pekdur Ö. (2012). Para aramid Malzeme Kullanılarak Üretilmiş Kompozit Zırh Tabakasının Üzerinden Kademeli Olarak Talaş Kaldırmanın Terminal Balistik Performansta Meydana Getirdiği Değişimin İncelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi*, 944-952.

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Ataş A., Beyaz S., Arslan N. (2018). Termoset Matrisli Cam Elyaf Takviyeli Polimer (CTP) Atıkların Mekanik Geri Dönüşüm Ürünlerinin Sıcak Pres Kalıplama Bileşiminde (BMC) Tekrar Değerlendirilmesi. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 8(2), 168-180., Doi: 10.7212/zkufbd
2. Balıkoğlu F., Demircioğlu T. K., Yıldız M., Arslan N. (2016). Oluklu PVC köpük içeren denizel sandviçkompozitlerin darbe test performansları. *Balıkesir Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*
3. Ataş A., Soutis C., Demircioğlu T. K. (2008). İki eksenli gerilme altındaki kompozit plakalarda dairesel delik çevresindeki gerilme dağılımları. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(2), 60-72.
4. Kumru N., Artan K., Demircioğlu T. K., Ay İ. (2007). Soma B Termik Santralında Kullanılan Fanlı Kömür Kırıcı Değirmenlerde Görülen Aşınmanın İncelenmesi. *Celal Bayar Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 1(7), 60-66.
5. Kumru N., Demircioğlu T. K., Ay İ. (2006). Cıvata ve Vida Dişi İmalatında Kullanılan Ovalama Yöntemi Çeşitleri. *Metal Makina Dergisi*(160), 438-443.
6. Kumru N., Demircioğlu T. K., Ay İ. (2006). Ovalama Yöntemi ile Cıvata ve Vida Dişi İmalatı Yapılan Malzemelerde Aranılan Özellikler. *Metal Dünyası*(158), 100-102.
7. Ay İ., Demircioğlu T. K. (2005). Kesme ve Ovalama Yolu ile Cıvata Vida Dişi İmalat Yöntemlerinin Kıyaslanması. *Makina Magazin Dergisi*(10), 64-67.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

1. Demircioğlu T. K., Candan C., Ay İ. (2011). Organik Matrisli Kompozit Malzeme Kullanılarak Oluşturulan Hibrit Zırh Plakasının Terminal Balistik Özelliklerinin İncelenmesi. *Ege Üniversitesi*
2. Ataş A., Demircioğlu T. K., Arslan N., Soutis C. (2010). Cıvata Bağlantılı Karbon Epoksi Kompozit Plakaların Kademeli Hasar Analizi. *2.Ulusal Tasarım-İmalat-Analiz Kongresi Bildiriler Kitabı*(2), 138-148.

Projelerde yaptığı görevler:

1. Termoset kompozit atıklar ve bitkisel atıkların sandviç kompozit yapılarda kor ara dolgu malzemesi olarak değerlendirilmesi ve elde edilecek sandviç yapının yorulma davranışlarının incelenmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı, 01/03/2013 - 26/12/2016 (ULUSAL)
2. Kıvrımsız-Dikişli Cam Elyaf Kompozit Plakaların Cıvata Bağlantıları için Progresif Hasar Analizinin Değerlendirilmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi Araştırma Projesi, Araştırmacı, 15/01/2017-22/08/2018 (ULUSAL)