



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NANO-SİLİKA KATKILI CAM/PET SANDVIÇ
KOMPOZİTLERİN EĞİLME VE BASMA
KUVVETLERİ ALTINDA HASAR
DAVRANIŞLARINA OLAN ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Mertcan UZKALAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

OCAK-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mertcan UZKALAN

26/01/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANO-SİLİKA KATKILI CAM/PET SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN EĞİLME VE BASMA KUVVETLERİ ALTINDA HASAR DAVRANIŞLARINA OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Mertcan UZKALAN

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ

2024, 60 Sayfa

Jüri

**Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ
Prof. Dr. Abdullah Engin ÖZÇELİK
Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN**

Sandviç yapılar sağlamış oldukları dayanım/ağırlık performanslarından dolayı hava, deniz, uzay ve kara ulaşım araçlarında kullanımları oldukça yaygındır. Bununla birlikte, bu sandviç yapılar inşaat sektöründe de kullanılmaya başlanmıştır. Sandviç panel yapılarda kendi aralarında yüzey ve çekirdek malzemelerine ve geometrik yapılarına göre değişiklik göstermektedir. Gerçekleştirilecek bu çalışmada rüzgar türbin kanatlarında kullanılan cam elyaf tabakalı yüzeyli PET köpük kompozit sandviçlerin yüzey/çekirdek ara yüzey dayanımlarını arttırmak için nanosilika takviyesinden faydalanılması amaçlanmaktadır. Aynı zamanda hasarların gelişimine etkisinin de ortaya konulmasının önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, $\pm 45^\circ$ E-Cam kumaşların yüzey malzemesi olarak kullanılması tercih edilecektir. E-Cam kompozit yüzeyler üç tabaka olarak belirlenmiştir. Matris malzemesi olarak epoksi reçinenin kullanılmasının uygun olduğu belirlenmiştir. Çekirdek malzemesi olarak ise PET köpüklerin kullanılması tercih edilmiştir. El yatırma ve sıcak presleme yöntemleri ile kompozit sandviçlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. ASTM standartlarına göre üç nokta eğme, kenar ve basma deneyleri üretilerek numunelere uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar nanosilika katkılı ve katkısız kompozit sandviçlerin sonuçları birbirleri ile mukayese edilmiştir. Deneyler sonucunda, meydana gelen hasarlar mikroskop görüntüleri ile incelenmiştir. Oluşan hasarlar tipleri ve baskın hasarlar tespit edilerek, nanosilikanın hasar gelişimleri belirlenmiştir. Nanosilika katkısı, kompozit sandviçlerin eğilme kuvvetlerini %23.8, kenar basma kuvvetini %21.7 ve düzlem basma kuvvetini ise %19.3 artırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mekanik Testler, Nanosilika, Pet Köpük, Sandviç Kompozit,

ABSTRACT

MS/Ph.D THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF NANO-SILICA DOPED GLASS/PET SANDWICH COMPOSITES ON DAMAGE BEHAVIOR UNDER BENDING AND COMPRESSION FORCES

Mertcan UZKALAN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Doç.Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ

2024, 60 Pages

Jury

**Doç.Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ
Prof. Dr. Abdullah Engin ÖZÇELİK
Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN**

Sandwich structures are widely used in air, sea, space and land transportation vehicles due to the strength/weight performance they provide. However, these sandwich structures have also begun to be used in the construction industry. Sandwich panel structures vary among themselves according to their surface and core materials and geometric structures. In this study, it is aimed to benefit from nanosilica reinforcement to increase the surface/core interface strength of glass fiber layered PET foam composite sandwiches used in wind turbine blades. At the same time, it turns out that it is important to reveal the effect of damage on its development. In this study, it will be preferred to use $\pm 45^\circ$ E-Glass fabrics as surface material. E-Glass composite surfaces are determined as three layers. It has been determined that it is appropriate to use epoxy resin as the matrix material. It was preferred to use PET foams as the core material. Composite sandwiches were produced by hand laying and hot pressing methods. Three-point bending, edge and compression tests were produced and applied to the samples according to ASTM standards. The results obtained from composite sandwiches with and without nanosilica additives were compared with each other. As a result of the experiments, the damages that occurred were examined with microscope images. By determining the types of damages occurring and the dominant damages, the damage developments of nanosilica were determined. It was determined that nanosilica additive increased the bending forces of composite sandwiches by 23.8%, edge compression force by 21.7% and plane compression force by 19.3%.

Keywords: Nanosilika, Mechanical Tests, PET Foam, Sandwich Composite

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum tez çalışmamda; çalışmalarına yön veren, tüm yardım ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ' ye teşekkürü borç bilirim. Ayrıca tez çalışmasında kullanılan malzemeleri bizlere sağlayan Metyx Composites firmasına, test numunelerini hazırlamamda yardımcı olan İbrahim DEMİRCİ'ye maddi, manevi destekleriyle hayatım boyunca hep yanımda olan ablam Seda UZKALAN ve değerli annem ve babama teşekkür ederim.

Mertcan UZKALAN
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	2
2.1. Kompozit Malzemeler	2
2.2. Kompozit Malzemelerin Günlük Ve Ticari Hayatta Kullanımı	4
2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılma	5
2.3.1. Metal Matrisli Kompozitler	5
2.3.2. Seramik Matrisli Kompozitler	5
2.3.3. Plastik Matrisli Kompozitler.....	6
2.3.4. Elyaf Takviyeli Kompozitler	7
2.3.5. Bazalt Elyaf.....	11
2.3.6. Tabakalı Kompozitler	12
2.4. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemler	13
2.4.1. El Yatırma Yöntemi.....	13
2.4.2. Püskürtme Yöntemi	15
2.4.3. Elyaf Sarma Yöntemi.....	16
2.4.4. Profil Çekme (Pultrüzyon) Yöntemi.....	18
2.4.5. Reçine Transfer (RTM) Yöntemi	19
2.4.6. Vakum Torbalama Yöntemi	21
2.4.7. Vakum İnfüzyon Yöntemi	22
2.4.8. Otoklav Yöntemi.....	23
2.5. Sandviç Paneller	24
2.5.1. Sandviç Panellerin Özellikleri	25
2.6. Literatür Araştırması.....	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	34
3.1. Kompozit Sandviçlerin Üretiminde Kullanılan Malzemeler	34
3.2. Kompozit Sandviçleri Üretimi	34
3.3. Kompozit Sandviçlere Uygulanan Testler	36
3.3.1. Üç Nokta Eğme Deneyleri	37
3.3.2. Kenar ve Düzlem Basma Deneyleri.....	38
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	40
4.1. Kompozit Sandviçlerin Üç Nokta Eğme Deney Sonuçları.....	40
4.2. Kompozit Sandviçlerin Kenar Basma Deney Sonuçları.....	42
4.3. Kompozit Sandviçlerin Düzlem Basma Deney Sonuçları.....	44
4.4. Kompozit Sandviçlerin Hasar Analizleri	47

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	54
5.1 Sonuçlar	54
5.2 Öneriler	55
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	60



1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler mukavemetin yüksek, hafifliği bulunan yorulma, aşınma değerleri yüksek rijitlik, ve korozyona karşı dirençli, yüzey kalitesi ve estetik yüzey görünümü gibi özellikleri bir arada barındırabilen, en az iki veya daha fazla malzemenin fiziki olarak birleşmesiyle oluşmaktadır(Demirci, 2015).

Kompozitler sandviç ve tabakalı kompozit olarak gruplara ayrılır. Tabaka sayısının çoğaltılmasıyla oluşturulan üretimlerde ağırlıkların artması sorunu sandviç panellerin üretimde kullanılarak çözülmesi çalışılmıştır. Bal peteği (honeycomb) sandviç plakalar kompozit üretimlerinin en önemli yapısal mühendislik icatlarından biridir. 1940'lı yıllarda ilk olarak uçak gövdelerinde daha sonra kanat kısımlarında ve kuyruk kısımlarında cam elyaflar takviyeleriyle birlikte kullanılmaya başlanmıştır(Sahin, 2000).

Kompozit malzemelerde maksimum hafiflik çalışmalarında kullanılan önemli bir parça olan bal peteği yapıların kullanımını her geçen gün yükselmektedir. Bu yapıların geometrisi altıgen olarak üretilmektedir. Geometrik şekilleri ile en yüksek dayanıma ve yapısı ile hafifliğe sahiptirler. Bal peteği yapılar, bal peteği çekirdeği ile alt ve üst tabakalar arası ara yüzey dayanımı düşük olmasından kaynaklı tabakalar arası ayrılmalar yani delaminasyon hasarı, yük arttığı zaman artmaktadır. Bu düşük ara yüzey bağ kuvvetinin giderilmesi gerekmektedir(Garip, 2010).

Takviye olarak kullanılan elyaflar istenilen malzeme özelliklerine iplik cinsi, örgüsü, dokuma sıklığına göre değişiklik gösterebilir. Geniş kullanım alanı olarak elyaf türleri; karbon elyaf, cam elyaf, bor elyaf ve aramid elyafıdır. Ülkemizde son yıllarda doğal olarak bulunan, bazalt kayaçlardan üretilmiş ve üzerinde devamlı olarak çalışılan bir diğer elyaf türünde bazalt elyaflardır(Bekem ve ark., 2011).

Yapılan bu çalışmada, rüzgar türbini kanatlarında maliyetleri oldukça düşük olan PET çekirdek malzemelerinin kullanılması ve kompozit sandviçleri oluşturan alt ve üst kompozit yüzeylere $\pm 45^\circ$ cam elyaf kumaşların nanosilika ile takviyelendirilmesi amaçlanmıştır. Tez çalışması kapsamında kompozit yüzeylerin cam elyaf takviyeleri nanosilikalar ile takviyelendirilerek yüzeylerin eğme ve basma dayanımına karşı dirençlerinin artırılması hedeflenmiştir. Bununla birlikte çekirdek

yapı ile kompozit yüzeylerin yapısal bütünlüğünün artırılması için yüzeyler arasındaki yapıştırma cam kumaşların reçine ile ıslatılma işlemi gerçekleştirildikten sonra çekirdek ıslatılmış üst ve alt kumaşlar arasına yerleştirilerek sıcak preste kürlenme işlemi yapılmıştır. Bu işlem sayesinde reçine malzemesi ile tabakalı kompozit yüzeyler, çekirdek ara yüzeylerin yapıştırılması ile bir bütün halinde gerçekleştirilerek, hem yapısal bütünlükle ara yüzeyler ve kompozit yüzeylerin matris malzeme ile birarada olacak şekilde sağlanması hedeflenmiş hem de fazla ilave yapıştırma prosesi ihtiyaç duymadan üretim zamanı kısalmıştır. Yüzeylerin matris malzemesi olan epoksi reçineye ve aynı zamanda ıslatılmış olarak yerleştirilen elyaflardan dolayı ara yüzeyde nanosilika takviye yapılarak yüzeylerin mekanik dayanımları ve ara yüzeyin ara yüzey dayanımı artırılması sağlanmıştır.

Hazırlanan kompozit sandviç panel numunelerine test standartlarına uygun olarak üç nokta eğme ve kenar basma, düzlem basma deneyleri uygulanmıştır. Deney sonrasında oluşan hasarlar mikroskop ve makro yapı analizleri ile incelenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit kelime anlamı, iki veya daha çok parçaların bir araya gelmesiyle oluşan malzeme olarak tanımlanır. Kompozit malzemeler literatürde küçük ölçüde birbirinin aynısı olmayan iki veya daha çok unsur bir ara alan boyunca bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelerin tanımı diye ifade edilebilir. Kompozit malzemeleri oluşturan unsurlar özelliklerini fazlasıyla korumaktadırlar(Rosato, 1997).

Tarihsel süreçte, kompozit malzemeler bulunmadan yıllar önce, evlerin inşasında kerpiç samanla takviyeli bloklardan faydalanılmıştır. Günümüze gelindiğinde teknolojinin gelişmesiyle bu malzemelerin üretimlerde yeterli gelmediği veya sahip olduğu faydaların artırılması gerektiği düşünülmüştür. 1930 yıllarında Amerika'da cam elyafın keşfi gerçekleşmiştir. Cam elyafın keşfedilmesi ile kompozitin modernleşmiş üretimi başlayarak dünya pazarında cam elyaf takviyeli kompozit ürünler önemli bir yer almaya başlamıştır. Malzeme bilimi bakımından kompozit malzemeler incelendiğinde ileri teknolojiye sahip malzemeler ve yeni bir

tür olduğu gör÷lmektedir. Kompozit malzemelerdeki en önemli özellik olarak homojenliğin mikro seviyede olmasıdır(Kaya, 2016).

Kompozit malzemelerin çoğunlukla talep edilen koşulları aşağıdaki gibidir.

1. Kimyasal unsurları birbiriyle aynı olmayan belirli ara alanlarda bölünmüş iki veya daha çok malzemenin bir arada toplanmış olması,
2. Birbiriyle aynı olmayan malzemelerin üç boyutlu olarak bir arada toplanmış olması,
3. Unsurlarının bir tanesinin bile tek başına ait olmadığı nitelik taşıması. Bu yüzden malzeme, mikroskobik olarak farklı özellikler taşıyan bir malzeme niteliği göstererek heterojen, fakat malzeme makroskobik olarak aynı özellikleri taşıyan bir malzeme niteliği göstererek homojen bir malzeme gibi gözükmetedir(Işık, 2008).

Kompozit malzemenin nitelikleri;

1. Elyafların ve geometrisinin dizilişlerine
2. Takviye malzemesinin özelliklerine
3. Matris ve elyaf malzeme oranına
4. Matris malzemesinin özelliklerine

bağlıdır.

Kompozit malzemelerin avantajlarının ve dezavantajları bulunmaktadır(Sahin, 2000).

Kompozit malzemelerin avantajlarının aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Bir aşamada yapılan şekillendirme,
- Çekme, eğilme, yorulmada yüksek mukavemeti,
- Isı ve yanmaya dayanım,
- Elektrik özellikleri (elektriksel iyi iletkenlik ve direnç),
- Titreşim sönümlenme ve bu nedenle çatlak ilerlemesini durdurabilme,
- Korozyona, aşınmaya ve kimyasal reaksiyonlara karşı korunmaları,
- Kalıcı renklendirme özellikleri.

Kompozit malzemelerin dezavantajlarının aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Hammadde fiyatının yüksek olması,

- Mekanik özellikler her zaman aynı olmaması,
- Malzeme kalitesinde üretime bağlı değişkenlik göstermesi,
- Gevrek yapıda olmaları,
- Servis ömürleri sınırlı olması.

2.2. Kompozit Malzemelerin Günlük Ve Ticari Hayatta Kullanımı

En genel şekilde cam elyafı, dokuma cam ve keçe ile reçinesi polyesterden olarak yapılan bir çok üretim ürünlerinde de tercih edilmektedir. Cam elyaf katkı oranı % 30–40 değerindedir. Küvet, çay tepsisi, masa–sandalye, otomotiv ve tekne, marin, bot sanayi olarak denizcilikte bu kompozitlerin uygulamadaki alanlarına örneklerdir. Ayrıca araç şarjı, formika, spor malzemeleri, kaynak takımı, elektrikçi fiberleri, yarış kanoları, tenis raketi, farklı tür kompozit malzemelerden yapılan ürünlerdir(Gülmez, 2018).

Savunma olarak askeri alanında kompozit malzemeleri yaygın olarak kişisel zırh üretiminde kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de bu alanda kullanılan yapılara örnek gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kompozit Malzemelerin Askeri Alanda Kullanım Örnekleri(Gülmez, 2018).

2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılma

2.3.1. Metal Matrisli Kompozitler

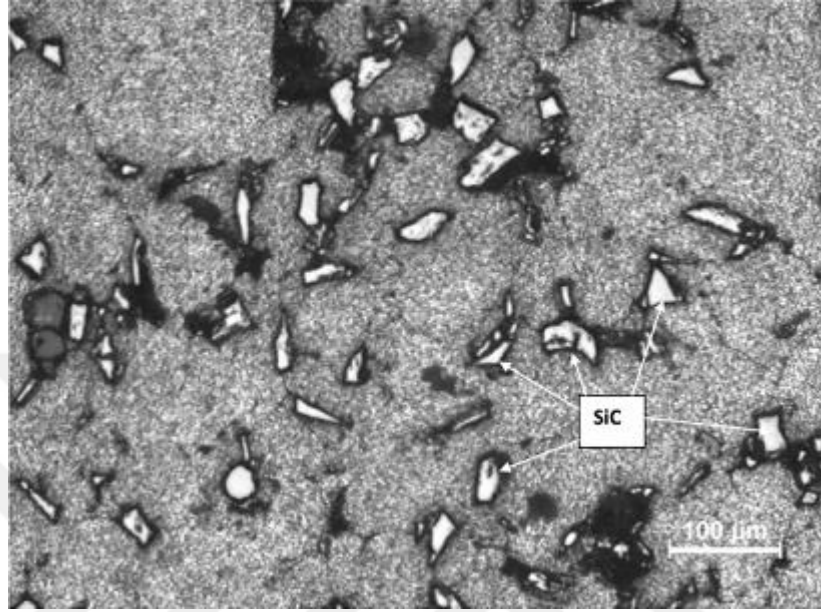
Metal matrisli kompozitler de birçok metal matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak; çelik, dökme demir, bakır, bronz ve alüminyum gibi metaller verilebilir. Takviye elemanı kullanılmadığında metal bağlayıcılar tercih edilebilir. Bu tarz kompozitlerde takviye malzemesi kullanıldığında, pudra, metal, seramik, plastik, ağaç tozu, yaygın olarak tercih edilir(Şahin, 2023).

Bir metalik fazı takviye malzemeleri ile difüzyon kaynağı veya sıcak presleme gibi bir takım ileri teknikler üretimlerde tercih edilerek metal matrisli kompozitlerden yapılmış ürünler elde edilirler. Metal matrisli kompozitler havacılık ve uzay sektörlerindeki alanlarda daha çok kullanılmaktadır. Örneğin: platform taşıyıcı parçalar, uzay teleskopu, uzay haberleşme cihazlarında kullanılır. Metallerin dizaynı lineer esasında olup küçük esnek uzamalar ürünün içinde gerinim ve uzama dağılımları formüllerle hesaplandığında izotropik nitelik göstermektedir. Eğilme, özelleri malzemenin poisson oranına, esneklik sabitlerine ve kayma modülüne bağlıdır. Bu ürünler genellikle izotropik nitelik göstermektedirler. Bu tür malzemeler, yükleme miktarlarına ve sıcaklıklara bağlı değildirler. Metallerin esneklik modülleri fazla ise buna istinaden uzamalar, deformasyonlar ufak ve dizayn da akma gerilmesi sınırına bağlıdır (Yılmazoğlu, 2004).

2.3.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Nitelikli ve yüksek teknoloji de seramik matrisli kompozitler kullanılmaktadır. Başlıcaları B₄C, Al₂O₃, CbN, Si₃N₄, TiB, TiC, AlN, TiN' dir. Bu unsurlar değişik konstrüksiyonlarda olmaktadır ve amacına göre bir ya da birden fazlası birlikte kullanılarak seramik matrisli kompozitler meydana gelir. Sandviç zırhlara örnek olarak türlü maksatlarla askeriye üretilen yapılar ile uzaya gönderilen aletlerin yapımında bu ürünler başlıca kullanılmaktadır. Metal olmayan malzemelerin veya metal malzemelerin bileşmesiyle oluşturulan seramik matrisli kompozitler, çok yüksek sıcaklık derecelerine karşı çok iyi direnç sağlamakla birlikte

sert ve kırılğan bir yapıya sahip olmasından dolayı elektriksel özellik bakımından da çok iyi bir elektrik geçirmezlik niteliği göstermektedir. Sekil 2.2’de Seramik matrisli kompozit örneği gösterilmiştir (Kalemtaş, 2015).



Şekil 2.2. SiC takviyeli kompozitin mikro yapısı(Işık ve USTA, 2004)

2.3.3. Plastik Matrisli Kompozitler

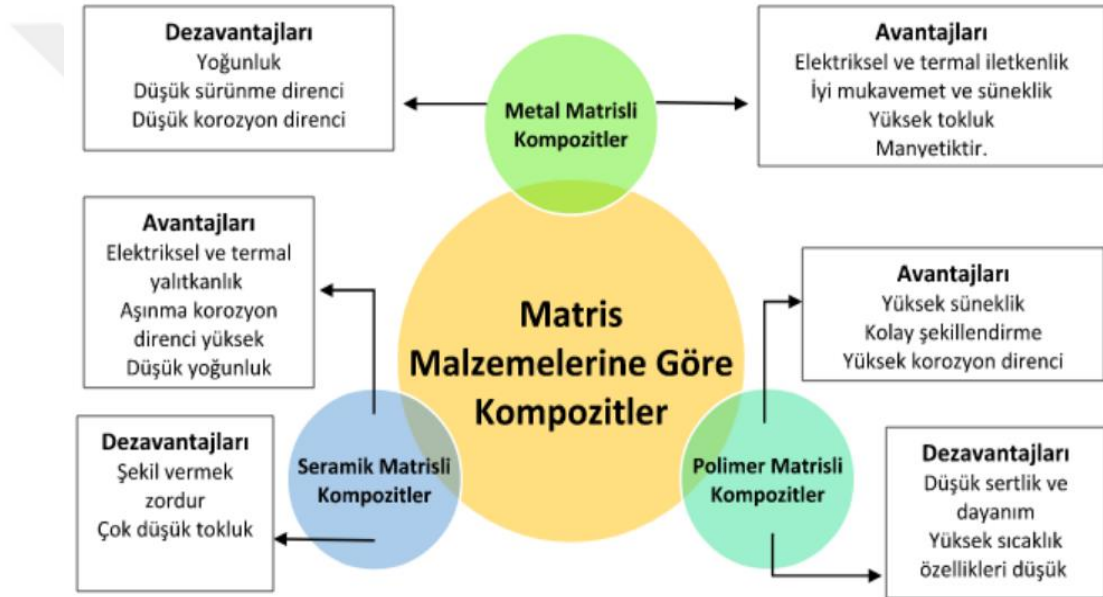
Polimerler matris malzemesi tercih edilmektedir. Bağlayıcı olarak başka kimyasal bağlayıcıların ve polimerlerin kullanımına olanak sağlamaktadır. Takviye malzemelerin de pudra, ağaç tozu, cam ve metal kullanılabilir (Sahin, 2000).

Tercihe göre ısıyla yumuşamayan termoplastik veya ısıtıldığında sertleşen termoset plastikten oluşturulan karbon, cam veya matris, elyafın uygun kombinasyonundan üretilebilmektedir. Fiziksel ve mekanik nitelikleri sayesinde cam/karbon lifleri birçok hususta pamuk ipliği, metal, asbest ve yapay elyaf gibi liflere tercih edilebilmektedirler. Fakat büyük kuvvetleri iletebilmelerine rağmen cam elyafli kompozitler, camın kırılğan olmasından dolayı dirençleri çok düşük olmaktadır. Şekil 2.3’de plastik matrisli kompozitler gösterilmiştir(Gülmez, 2018).



Şekil 2.3. Plastik Matrisli Kompozitler (Gülmez, 2018).

Ayrıca metal matrisli, seramik matrisli, plastik matrisli kompozitlerin avantajları ve dezavantajları Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Metal Matrisli, Seramik Matrisli Plastik Matrisli Kompozitlerin avantajları ve dezavantajları (İşlek, 2021).

2.3.4.Elyaf Takviyeli Kompozitler

Elyaf takviyeli kompozit çeşidi kalınlığı az elyafların matris türünde oluşmasıyla ortaya çıkmıştır. Kompozit yapının mukavemetini önemli bir ölçüde etkileyen nedenlerden birisi elyafların matris içindeki dağılımıdır. Elyafardan uzun olanlarının matris içinde birbirine paralel bir şekilde dizayn edilmesi ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet dayanımı oluşturulurken, elyafları 90 derecelik doğrultuda yerleştirilmesi düşük düzeyde mukavemet dayanımı oluşturur (Ekşi, 2007).

Bu tür kompozitler de uygulanan etkiye tepki gösteren bileşen fiberdir, bunlar matris faz takviyeler olan elyaf çeşitlerinin birlikte bulunmalarını sağlar. Fiber açısından kompozit malzeme özelliklerine etki eden, önem arz eden kurallar vardır. Bu kurallar, fiberin; mekanik davranışları, elyaf boyu, elyafın yön şekli, elyaf-matris sınır davranışları gibi özelliklerdir(Ersoy, 2001).

İki boyutlu dizayn edilmiş elyaf takviyelerle her iki yöne de aynı mukavemet değeri oluşturulurken, matris yapısında aynı derecede dağılmış kısa elyaflarla ise ürün özelliklerinin yönden bağımsız olmasına bağlı olarak izotrop bir tür sağlamak mümkündür(Ekşi, 2007).

Elyafların mukavemet dayanımı kompozit yapının mukavemet dayanımı açısından önem arz etmektedir. Öte yandan, elyafların uzunluk/çap değerleri yükseldikçe matris tarafından elyaflara yüklenen yük miktarı artmaktadır. Elyaf türünün kusursuza yakın olması da mukavemet dayanımı bakımından önem teşkil etmektedir. Kompozit ürünün mukavemet değerlerinde önemli bir diğer kıstas ise bağın yapısıdır. Matris yapıda boşluklar varsa elyaflar ile temasta azalacaktır. Nem absorpsiyonu, matrisler arasındaki bazı bozan olumsuz bir etmendir. Elyaf takviyeli kompozitlerin üretimlerinde tercih edilen elyaf malzemeler, yeni oluşturulan malzemenin rijitlik ve dayanımı gibi özelliklerini olumlu olarak geliştirmekte ve bunun yanında kompozit malzemenin çalışma sıcaklığında da olumlu derecede etkili iyileştirmeler yapmaktadır. Malzeme içerisindeki yönlenmelerde elyafların kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Şerit, örme, tabakalar halinde ve şerit fitil elyaflar bulunmaktadır. Kompozit malzemelerde tercih edilerek en çok kullanılan mekanik özellikleri bakımından oldukça gelişme gösteren elyaf takviyeli olanlarıdır. Elyaflar, süreksiz veya sürekli olabilmektedir. Şekil 2.5.de gösterilmiştir(Onat, 2015).



Kısa fiber veya whisker takviyeli kompozit
(tek boyutlu düzen)



Sürekli fiber takviyeli kompozit



Kısa fiber veya whisker takviyeli kompozit
(üç boyutta dağılımı)



Kısa fiber veya whisker takviyeli kompozit
(düzensiz dağılımı)

Şekil 2.5. Sürekli, Örgü - Sürekli, Tek yönlü - Süreksiz, Yönlendirilmiş - Süreksiz, Rastgele (Onat, 2015).

Süreksiz fiberler, cm-mm arası ölçüye sahip yapılardır. Sürekli fiberler, ip formunda elde edilen uzun lif yapılardır Kompozit malzemelerin mukavemeti, fiber matris içerisindeki homojen olarak dağılımı ve yönlenmesi önem gerektirmektedir. Yüksek mukavemeti Elyaf doğrultusunda elde ederken doğrultuya dik yöndeki malzemenin mukavemet değeri yön boyu düşüktür.

Kullanımı en fazla olan elyaf çeşitleri;

- Cam elyaf
- Grafit (Karbon) elyaflar – fiberler
- Bor elyaf
- Aramid elyaf
- Bazalt elyaf
- Silisyum karbür elyaflar
- Alumina elyaflar

Karbon elyaf ya da karbon fiber, günümüz koşullarında pek çok sektörde kullanılan malzemelerden biridir. Özellikle inşaat sektörünün vazgeçilmezleri hâline gelen bu malzeme karbon atomlarından elde edilir. Bina güçlendirmelerinde sıkça karşılaşılan karbon elyaf kendi içinde farklı türlere ayrılır(Saçak, 2002).

Cephe kapmalarda da sıkça kullanılan karbon fiberlerin en çok çeken özelliğiyle çelikten 3 kat daha dayanıklı olmasına rağmen 4,5 kat daha hafif olmasıdır. Aynı zamanda esnek dokusuyla da ön plana çıkar. Dayanıklı yapısı nedeniyle uçak, roket, Formula 1 araçları ve uydu sistemlerinde sıkça kullanılır. Şekil 2.6'de karbon elyaf görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Rulo şeklinde sarılmış karbon elyaf (Akçay, 2018)

Karbon elyafın sağladığı avantajlar aşağıdaki gibidir(Akçay, 2018).

- Aşırı sıcaklara karşı dayanıklı bir yapısı vardır.
- Sertliği yüksek malzemelerden olduğu için dayanıklılık konusunda çokça tercih edilir.
- Kimyasala karşı dayanıklılığı oldukça yüksektir.
- Hafif yapısı nedeniyle muhafaza etme kolay taşıma ve kullanma imkânı sunar.
- Çekme mukavemeti oldukça yüksektir.

- Termal genleşme miktarı düşük olduğu için güvenilir güçlendirme malzemeleri arasında gösterilir.
- Esnekliği yüksek olduğu için özellikle kavisli alanlarda kullanımı rahattır..
- Verimli İletkenliğe sahip olduğu için enerji ve ısınmada en çok tercih edilen malzemelerdendir.

2.3.5. Bazalt Elyaf

Bazalt, silika içeren ve ince tanelere sahip magmatik bir kaya türüdür. Dayanıklı yapısı ve dünyanın en yaygın ham maddelerinden biri olması, çeşitli sektörlerde kullanılmasını sağlar. Tarihsel kökenine bakıldığında 9 bin yılı aşkın süredir çeşitli yapılarda bazalt kullanıldığı görülür. Günümüzde ise daha avantajlı olmasından dolayı yapıların büyük kısmında bazalt elyaf tercih ediliyor. Şekil 2.7'de bazalt elyaf gösterilmiştir

Siyah renkli, katılaşmış lav olarak doğada bulunan volkanik lav kayaktan elde edilir, yüksek dayanım ve tokluğa sahip olması elyaf üretimine uygun bir elyaf olacaktır(Quagliarini ve ark., 2012). 1923'te Pul The tarafından patenti alınan bazalt elyaf. 1. Dünya savaşının ardından havacılık ve askeriye sahalarında sıklıkla tercih edilmiştir(Colombo ve ark., 2012).

1995 te bazalt elyaf çalışmalarına başlanmıştır(Colombo ve ark., 2012). Amerika, Rusya ve bazı Avrupa ülkelerince bazalt elyaf Günümüzde elde edilmektedir. 1350-700°C sıcaklıkta platin/ rodyum potalarda eriyik elde edilen bazalt 14 kayaçlar deliklerinden akıtılıp iplik formunu almasıyla bazalt fiberler elde edilir(Quagliarini ve ark., 2012).

İp halindeki bazaltlar 2000-5000 m/dk hızında tamburlara sarılırlar. Çok seri soğumaları sonucunda kristalin olmayan bir yapıya sahip olurlar. 9-13 µm arasında elyaf üretilmektedir(Colombo ve ark., 2012).

Bazalt fiber elde edilmişinde ekstra takviye malzemesinin olmaması, atık miktarının düşük olması sebebi ile çevreye ve doğaya duyarlı, yüksek fiyat oluşturmaması avantaj sağlamıştır(Sfarra ve ark., 2013).

Bazalt elyaf türü -200° ile 600°C sıcaklık arasında mekanik özellikleri çok az kayıp ile servis şartı sunmaktadır. Yüksek darbe direnci ve elastikiyet modülü vb özellikleriyle diğer elyaf türlerine göre alternatif bir seçenek sunmaktadır(Kim ve ark., 2011).

Bazalt elyaflarının önemli özellikleri arasında yüksek ısı dirençlerinin olması bulunmaktadır. Bu özelliği sayesinde ısı yalıtım malzemeleri üretiminde seçenek olarak görülmektedir. Ses (gürültü) yalıtımı gibi spesifik yapılarda da üstün özellikler sağlamasından kaynaklı tercih edilmektedir. Bazaltların UV ışınlarına karşı direncinin yüksek olması ve bozulmaya karşı dayanımının iyi olması kullanım sahasına genişletmiştir(Colombo ve ark., 2012)



Şekil 2.7. Kırılmış bazalt elyaflar(Jalasutram ve ark., 2017).

2.3.6.Tabakalı Kompozitler

Değişik özellikler bakımından tabaka-levha halindeki malzemenin bir bağlayıcı ile birleştirilmesine istinaden oluşan malzemelerdir. Bu kompozitlerde hafiflik, maliyetin düşük olması ve dayanımın yüksek olması ön plana çıkmaktadır. Tabakalı kompozitlere örnek olarak iki cam tabakasının plastik ile birleştirildiği arabaların ön siper camları, kontraplak ve formika gibi ürünler ile emaye ve üç katlı pulluk uç demiri örnek verilebilir.

2.4. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir(Deniz, 2005).

- 1) El Yatırma
- 2) Püskürtme
- 3) Elyaf Sarma
- 4) Profil Çekme
- 5) Reçine Transfer Kalıplama
- 6) Vakum Torbalama Yöntemi
- 7) Vakum İnfüzyon Yöntemi
- 8) Otoklav yöntemi

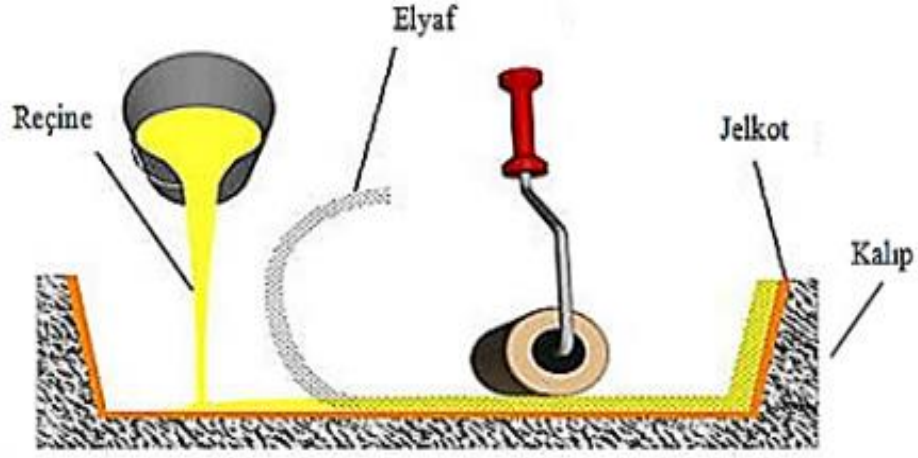
2.4.1. El Yatırma Yöntemi

El yatırma yöntemi üretimin düşük miktarlarında olduğu yerlerde yaygın olarak kullanılır.

Eski zamanlardan günümüze kadar endüstride gelişime sürekli açık olan ve üzerinde çalışılan üretim yöntemlerinden bir tanedir. El yatırma yönteminde bir kalıp içine el ile yerleştirilen elyaflara/ kumaşlara fırça veya rulo ile reçine sürülmesi sonucunda kalıbın şeklinin verilmesi olarak tanımlanır. (Şekil 2.8). Parçanın şekli kalıbın şekli tarafından belirlenir ve kalıbın yüzeyi parçanın dış yüzeyi ile temas etmektedir. Bu yöntemde kalıp olarak düz bir levha veya sonsuz kenarlara ve eğrilere sahip levhalar kullanılabilir. Elle yatırmada kalıp ayırıcı cam elyaf parçanın kalıba yapışmasını önlemek için kullanılır(A.Ş, 2003).

El yatırma yönteminin uygulaması, renklendirilmiş reçine olarak tanımlanan jelkot parçaya renk katmak için kalıba sürülür. Polyester reçine ve cam elyaf, tabakalar halinde kalıba yatırılır ve tabakalara reçineyi homojen şekilde sürmek ve hava boşluklarını ortadan kaldırmak için merdanelerle baskı uygulayarak preslenmektedir. Çok katmanlı cam elyaf ve reçine istenen kalınlığa ulaşıncaya kadar kat kat sürülür. Reçine kumaşlara kat kat sürülebileceği gibi kumaşın özelliklerine göre birçok katmana aynı anda da sürülebilir. Reçine sürülmüş cam kumaşlar atmosferik basınç altındaki oda sıcaklığında veya farklı basınçlar farklı sıcaklıklarda kurumaya gönderilir. Kuruma işlemi biten parçalar kalıptan çıkarılarak

kesme, çapaklarının alınma işlemlerinden sonra kullanıma hazırdır(Aydın ve Demirer, 2016).



Şekil 2.8. Elyaf kumaş kompozitlerin el yatırma yöntemi ile üretimi(A.Ş, 2003).

El yatırma yönteminin avantaj ve dezavantajları aşağıda sunulmuştur(Durgun, 2014).

El yatırma yönteminin kullanılmasının avantajları aşağıdaki gibidir.

1. Üretimde düşük maliyetler oluşturmaktadır
2. Üretilen parçaların ölçülerinde kısıtlama bulunmamaktadır.
3. Tasarım çeşitliliği sağlamaktadır.
4. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında yatırım maliyetleri düşüktür.
5. Kalıplamanın yerinde yapılması seçeneği sağlamaktadır.
6. Prototip üretimine ve büyümeye olanak sağlamaktadır.
7. Bölgesel dayanıklılık oluşturabilme özelliği sağlamaktadır.

El yatırma yönteminin kullanılmasının dezavantajları aşağıdaki gibidir.

1. Bu yöntemde el becerisi gerekmesinden dolayı düzgün parça çıkma olasılığı yapan kişiye bağlıdır.
2. Cam elyafın hacimsel yüksek yoğunluğuna ulaşmak zordur.
3. Reçine oranı düşük ayarlanmak istenildiğinde hava boşlukları fazla olur ve kuru bölgeler oluşturur.
4. El yatırmasında kullanılan reçinelerin yüzey dayanımı altındaki deformeye karşı gösterdiği direncin değeri ve yoğunluğu düşüktür.
5. El yatırması yapılan yerlerde havalandırma sistemleri olmalıdır.

6. Elyaf dağılımı homojen olmadığı için kalıptan çıkarılan parçanın yüzey kalitesi ve parça kalitesi düşüktür.
7. Oluşan parçada kalınlık değişimleri söz konusudur.

2.4.2.Püskürtme Yöntemi

Püskürtme yöntemi, el yatırması yönteminden farklı alet olarak matris malzemelerinde püskürtme tabancası kullanılması ile kompozit malzeme üretme yöntemidir. Püskürtme tabancası, elyafları sürekli kırparak reçine ile karışık kalıba püskürtme yapmaktadır. Püskürtme yöntemi üretimin düşük ve orta miktarlarında olduğu yerlerde yaygın olarak kullanılır. Şekil 2.9'da püskürtme yöntemi aşamaları ve Şekil 2.10'da püskürtme tabancası gösterilmiştir(Akdoğan Eker, 2014).

Üretilen parçaların dayanımının çok önemli olmadığı alanlarda, püskürtme yöntemi kullanılır. Kalıba püskürtülme işleminde genellikle atmosferik basınç altındaki oda sıcaklığında veya ısı kullanılarak yapılır ardından kurumaya gönderilir(Yöneş, 2007).



Şekil 2.9. Püskürtme yöntemi üretim aşaması(Akdoğan Eker, 2014)



Şekil 2.10. Püskürtme tabancası (Akdoğan Eker, 2014).

Püskürtme yönteminin kullanılmasının avantajları aşağıdaki gibidir.

1. El yatırması yöntemine göre parçaların daha düşük maliyete üretilebilir.
2. Püskürtme tabancası sayesinde kalıba reçine sürülme süresi ve uygulama zamanında tasarruf sağlar.
3. Çalışan kişinin el becerisi daha arka plandadır.
4. Fazla reçine israfının önüne geçilir.

Püskürtme yönteminin kullanılmasının dezavantajları aşağıdaki gibidir.

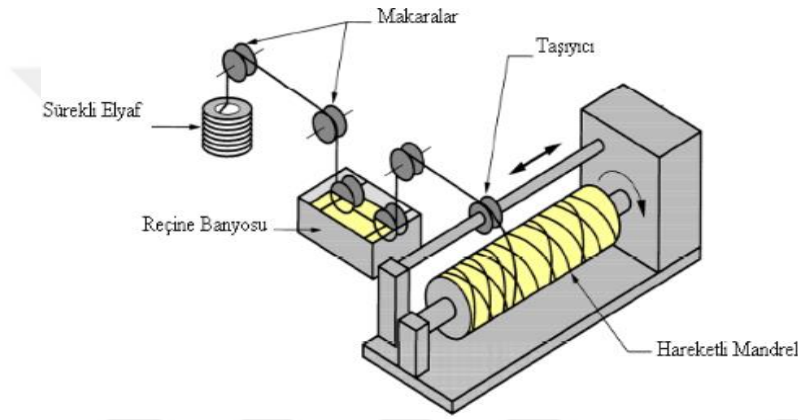
1. İşlem sonunda reçine oranı yüksek olmasından dolayı ağır bir yapı elde edilir.
2. Püskürtmeden kaynaklı ortamda styrene oranı yüksektir.

2.4.3. Elyaf Sarma Yöntemi

Elyaf sarma yöntemi elyaf lifleri de sarıldığı için iplik sarma veya filament sarma olarak da bilinmektedir(Gülmez, 2018).

Elyaf sarma yöntemi, reçine sürülmüş sürekli elyaf liflerin yuvarlanan bir kalıbın üzerine veya kontrolü makinelerle yapılan geometrik yapıları silindirlere üstüne veya dairesel tasarımlar için kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde kaliteli yüzeydeki ürünleri elde etmek için kullanılmaktadır(Hüner, 2008).

Elyaf sarma yönteminin uygulanması; bobinlere sarılmış sürekli elyaflar makaralar ile reçine dolu kaptan geçerler. Reçine çekmiş elyaflar mekanizma sayesinde belli bir hızda eksenini etrafında dönme hareketi yapan silindire istenilen açılarda sarılır. Talep edilen kalınlığa veya tabaka sayısına ulaşıldığında işlem tamamlanır. Oda sıcaklığında veya bir fırında kurutma işlemi gerçekleştirilir. Şekil 2.11’de elyaf sarma yönteminin üretim aşamaları gösterilmiştir. Bu yöntemde borular, gaz silindirleri, depolama tankları üretilir(Akdoğan Eker, 2014).



Şekil 2.11. Elyaf sarma yöntemi üretim aşaması (Akdoğan Eker, 2014)

Elyaf sarma yönteminin kullanılmasının avantajları aşağıdaki gibidir.

1. Birbiri arkasından sarılan elyafların yüksek dayanım sağlaması ve sürekli elyaf liflerinin olmasıdır.
2. Kolay üretim yöntemi olmasıdır.
3. Üretim maliyetleri avantajlar sağlamaktadır.
4. Büyük yapıları parçaların üretimleri yapılabilir.
5. Termoset ve termoplastik üretimlerinde kullanılmasını sağlamaktadır
6. Takviye malzemesi ve reçine seçeneği oldukça fazladır.

Elyaf sarma yönteminde dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

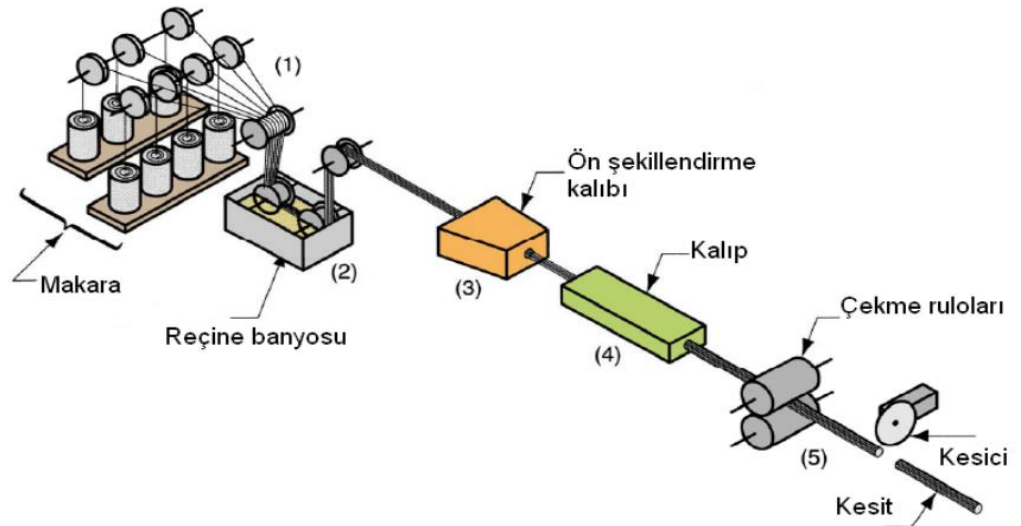
1. Elyafın sarıldığı silindirin yerinden çıkarılabilecek şekilde tasarlanmasının zordur.
2. Elyafın sarım yolunun değiştirilemesi kolay değildir.

3. Karışık yapılı ve maliyetli silindir kullanılır.
4. Dış yüzeyin dayanımı zayıftır.
5. Parçaların içbükey olması halinde kullanılamaz.

2.4.4. Profil Çekme (Pultrüzyon) Yöntemi

Profil çekme (Pultrüzyon) yöntemi, ısıtılmış çelik kalıplardan elyafların çekilerek geçirilmesi sayesinde istenilen şekildeki profillerin ve özel kesitli rijit lamalar ve çubukların üretimlerinin yapılmasında kullanılan yöntemdir. Ayrıca bu yöntemde, kiriş, kanal, boru gibi şekilli profillerin üretimi de yapılabilmektedir(Gülmez, 2018).

Profil çekme yönteminin uygulanması, daha önceden hazırlanan reçine havuzundan çekilecek elyaflar geçirilir ve çelikten yapılmış kalıpların içinden 120-150 °C'ye ısıtılmış şekillendirme kalıbından çekilerek talep edilen kesitte sertleşmesi beklenir. Kalıp içinden geçirilen parça bütünüyle değil yalnızca bir bölümüyle veya tamamen kurlenmiş olur ve çıkan ürünler düzgün olur. Bu nedenle işlem sonunda genellikle başka bir işlem gerektirmez. Şekil 2.12'de profil çekme yönteminin üretim aşamaları gösterilmiştir(Akdoğan Eker, 2014).



Şekil 2.12. Profil çekme (Pultrüzyon) yöntemi üretim aşaması (Akdoğan Eker, 2014)

Profil çekme yönteminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Hızlı ve sürekli bir yöntem olmasından dolayı malzemeden ve zamandan yarar sağlamaktadır.
2. İşçilik maliyetleri düşük olmaktadır.
3. Büyük ölçülü malzemelerin üretimi için uygundur.
4. Yatırım maliyetleri diğer hacimleri yüksek olan üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında düşüktür.
5. İstenen uzunlukta malzemeler üretilebilmektedir.
6. Reçine oranı kontrol edilebilir.

Profil çekme yönteminin dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

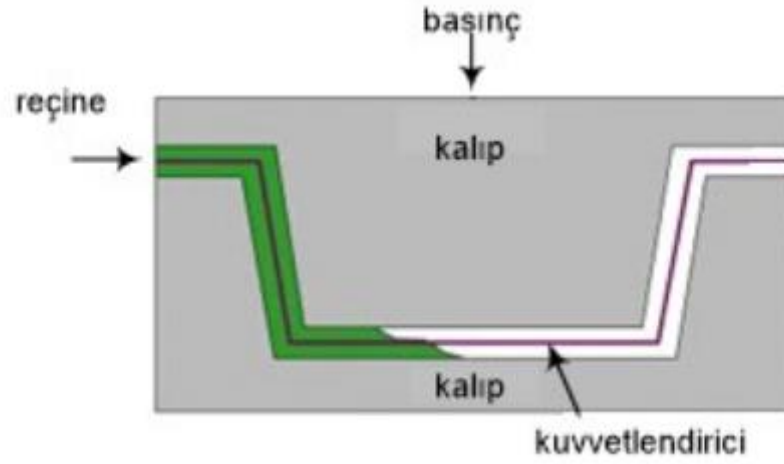
1. Çekme yönünde elyaflar yerleştirildiğinden enine dayanım düşüktür. Bu sebeple kalın parçalar tasarlanmalıdır. Örgü, dikişli ve dokuma kumaşlarından profil çekme yöntemini yapısal uygulamalarda her yönde aynı özellikleri oluşturabilecek hale getirmiştir.
2. Reçinenin kalıba yapışma ihtimali olmasından dolayı parçanın kalitesin etkilemektedir.
3. Kalıp içinde reçine fazla süre kalmaktadır. Bu sebeple hata olması halinde işlem bitene kadar reçineye müdahale edilmesi zordur.

2.4.5. Reçine Transfer (RTM) Yöntemi

Reçine transfer yöntemi (RTM), jelkot uygulanmış ve şekil verilmiş veya kesilmiş takviye malzemelerinin dişi ve erkek kalıp kullanılarak yapılan kalıplama yöntemidir. RTM yönteminin en önemli özelliği yapısal parçaların her iki yüzeyinin de düzgün ve parlak olarak üretilebilmesidir.

RTM yönteminin uygulanmasında kalıba takviye malzemesi yerleştirilir. Kalıplar arasına köpük kullanılarak erkek ve dişi kalıp kapatılır. Kalıbın içine basınçlı olarak reçine gönderilir. Kürleşme olana kadar beklenir. Kürleşme tamamlandığında kalıplardan parça çıkartılır. Şekil 2.13'de reçine transfer yönetimin üretim aşamaları gösterilmiştir(Beşergil, 2016).

PVC, balsa veya pet köpük malzemelerin kalıplar arasında kullanılması parçanın hafif yapıda olmasını ve sandviç yapı oluşturularak parçanın dayanımının yüksek olması sağlanır. Düşük gözenekli ve küçük parçaların üretilmesi için uygundur(Akşit ve Makaracı, 2011).



Şekil 2.13. Reçine Transfer (RTM) yöntemi üretim aşaması(Beşergil, 2016)

Reçine transfer yönteminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

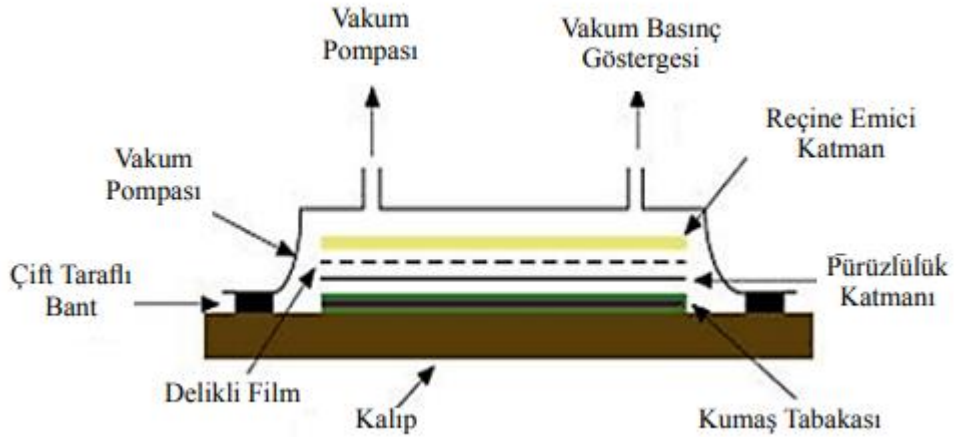
1. Üretim hızı yüksektir.
2. Kalıplama kapalı olarak yapılmasından dolayı daha az miktarda zehirli gaz ortama yayılmaktadır.
3. Daha az iş gücü ile çok sayıda parça üretilmesini sağlamaktadır.
4. İki yüzü düzgün ve parlak parça üretimi sağlamaktadır.
5. Karmaşık şekilde tasarlanan parçaların üretimleri yapılabilmektedir.

Reçine transfer yönteminin dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir

1. Erkek ve dişi kalıp olarak çift kalıp olmasından dolayı kalıp maliyetleri yüksektir.
2. Kalıp içinde reçine ile ıslanmayan bölgeler oluşabilir.
3. Kalıp tasarımları zordur.

2.4.6. Vakum Torbalama Yöntemi

Vakum torbalama yöntemi, kalitenin yüksek olması istenen büyük kompozit parçalarının üretimlerinin yapıldığı yöntemdir. Elle yatırtma yönteminin benzer şekildedir ancak reçine sürülmüş tabakanın vakum altına alınarak devam etmektedir. Vakum torbalama yönteminin uygulanması; öncelikle kalıba parçanın yapışmaması için kalıp ayırıcı uygulanır. Üzerine jelkot sürülür. Kalıp yüzeyine elyaf kumaşlar serilerek rulo veya fırça ile reçine sürülür. Serilen kumaşların üzerine delikli ayırıcı film serilir. Bu film üzerine havanın atılmasını sağlayan ve fazla reçineyi yakalaması için reçine emici malzeme serilir. Hazırlanan kalıp vakum bantları veya sızdırmazlık macunları ile dış ortam ile hava transferi kesilerek vakum hortumları yerleştirilir. Vakum pompası yararlanılarak vakum işlemi başlatılır. Reçinenin kumaşlara tamamen emdirilmesi beklenir. Reçine tamamen emdirildikten sonra vakum pompası kapatılır, parçanın kürleşmesi beklenir. Parça kürleştikten sonra kalıptan çıkartılır(Durgun ve ark., 2014). Şekil 2.14’de vakum torbalama yönteminin üretim aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Vakum torbalama yöntemi üretim aşaması(Durgun, 2014).

Vakum torbalama yönteminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Yüksek elyaf oranlı parçalar elde edilebilir.

2. El yatırması yöntemine göre hava kabarcığı sayısı ve boşluk daha az olmaktadır
3. Vakum pompası sayesinde fazla reçine kalıptan dışarı çıkartılmış olur.

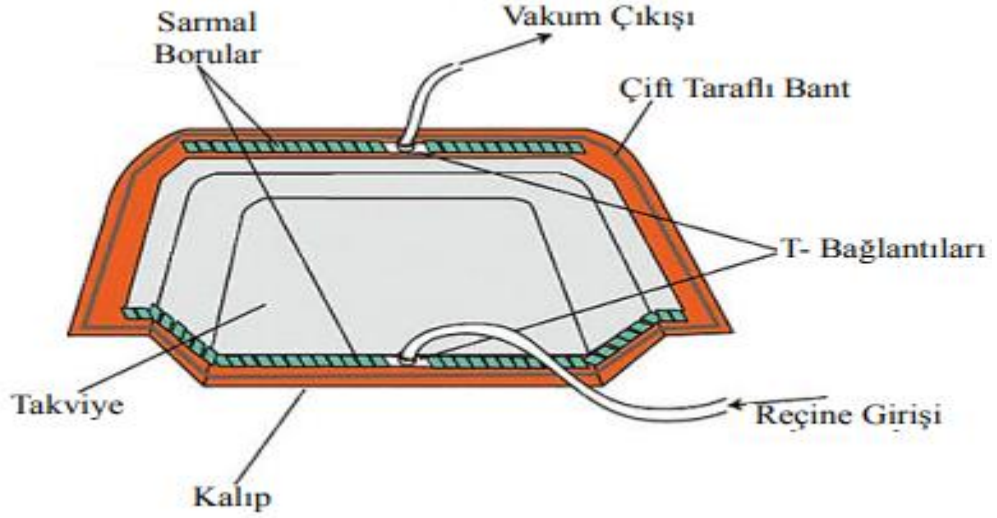
Vakum torbalama yönteminin dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Tek kullanımlık malzemeler kullanılmasından dolayı maliyetli yüksektir.
2. Vakum hatlarının tasarlanması için tecrübeli kişilere ihtiyaç vardır.

2.4.7. Vakum İnfüzyon Yöntemi

Vakum infüzyon yöntemi, vakum pompası yardımıyla kalıp içerisinde reçinenin çekilmesi yöntemidir. Ön hazırlıkları tamamlanmış parçanın el değmeden üretimi yapılmaktadır(Durgun, 2014).

Vakum infüzyon yönteminin uygulanması; kalıp yüzeyinde toz, çizik bulunmamalıdır, ilk olarak kalıba kalıp temizleyici uygulanır. Temizlenen kalıba jetkot sürülür. Elyaf kumaşlar kalıp içerisine talep edilen kat sayısı kadar serilir. Elyaf kumaşların üzerine delikli ayırıcı film ve vakum filmi yerleştirilir. Kalıbın çevresini saracak şekilde vakum hatları ve reçine kanalları yerleştirilir. Hazırlanan kalıba vakum göstergesi ve vakum pompası bağlanır. Kalıp vakum bantları veya sızdırmazlık macunları ile dış ortam ile hava transferi kesilir. Vakum pompasında ve kalıpta kaçak olup olmadığına kaçak dedektörü ile kontrol edilir. Reçine akışını başlanarak, kalıbın her yeri reçine ile ıslanana kadar beklenir. Tüm kalıp ıslandığında reçine hatları klemp ile kapatılır. Parça tamamen sertleşinceye kadar vakum altında tutulur. Daha sonra sızdırmazlık bantları ve ayırıcı filmler sökülerek parça kalıptan çıkartılır. Şekil 2.15’de vakum infüzyon yönteminin üretim aşamaları gösterilmiştir(Bahçe ve Temiz, 2019).



Şekil 2.15. Vakum İnfüzyon yöntemi üretim aşaması(Durgun, 2014)

Vakum infüzyon yönteminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Yüksek dayanımlı bir kalıba gerek yoktur, tek taraflı bir kalıba ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle kalıp ve üretim maliyetleri düşüktür.
2. Büyük parçaların üretilmesine olanak sağlamaktadır.
3. Tek seferde çekirdek yapılar üretilebilmektedir.

Vakum infüzyon yönteminin dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Karışık işlem basamaklarına sahiptir.
2. Tek kullanımlık malzemeler kalıp hazırlık aşamasında zaman kaybına neden olmaktadır.

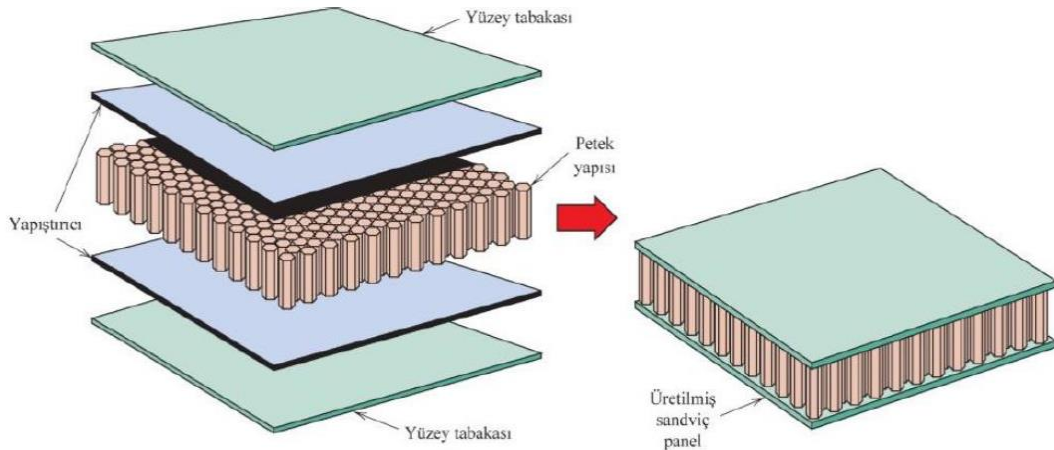
2.4.8 Otoklav Yöntemi

Otoklav yönteminde, üretimi yapılacak parça için prepreg kullanılır. Vakum torbası yöntemine benzer olarak hazırlanan kalıp otoklav fırınının içine koyularak basınç ve sıcaklık altında parçanın kürleşmesi beklenir. Otoklav yönteminde basıncı ayarlamak için azot gazı kullanılmaktadır. Performansın kritik olduğu üretimlerde veya özel uygulamalarda bu uygulama tercih edilir(Arabacı, 2015).

2.5. Sandviç Paneller

İlk defa tarihte sandviç panel teknolojisi 1845 yılında yumurtaların koyulduğu taşıma kaplarında, daha sonra 1919 yılına gelindiğinde havacılık sektöründe tercih edilerek kullanılmaya başlanmıştır. 1960 senelerinde ABD’de ‘‘Honeycomb sandwich panel structure and method of making same’’ adıyla Merriman, Helen R. Patent almıştır. Takvimler 1985 yılına geldiğinde Honeycomb panel ismiyle Hillinger, Brad O. patentini tescillemiştir. 1987 yılına gelindiğinde ise Anderson, Richard N. tarafından alınan patentlerle ile tarihsel süreç devam etmiştir(Güler ve Ulay, 2009).

Sandviç paneller dayanımını yüksek olan ince iki yüzey tabaka ile yoğunluğu düşük ve yüzey tabakası, kalınlığı fazla olan çekirdek yapının birleştirilmesiyle oluşturulan yapılardır. Şekil 2.16’da Sandviç panel örneği gösterilmiştir. İki yüzeydeki tabakalar, basma ve çekme kuvvetlerine direnç sağlayacak şekilde ayarlanır ve çoğunlukla fiber takviyeli polimerlerden ve alüminyumlar oluşurlar. Çekirdek yapı ise kayma ve basma kuvvetlerine direnç sağlayacak şekilde oluşturulur ve çoğunlukla metal, polimer malzemelerden, köpüklerden ve ahşaplardan oluşmaktadır(Kıyak ve Kaman, 2018).



Şekil 2.16. Sandviç panelin şematik gösterimi(Güler ve Ulay, 2009).

Bal peteğine benzer doğal yapıları bulunmaktadır ve çekirdek (ara katman malzemesi) malzeme olarak kullanılmaktadır. Petek yapıli kompozit malzemelerin,

kalınlıkları aynı diğer malzemelere gore ağırlığı düşk ve kullanım alanına uygun özellik gostermesi oldukça kullanışlı yapmaktadır(Guler ve Ulay, 2009).

Sandviç paneller mukavemet olarak taşınması zor yükleri taşımak üzere şekillendirilebilir. Bu sebeple sandviç panel yapıları sınırsız malzeme çeşidi ve panel çeşitliliğine sahiptir. Hücre yapısı, tabaka ve yapıştırıcı seçimi son derece önemlidir.

Yapısal olarak sandviç panellerin mekanik davranışları ve panelin pozisyonunun belirlenmesi avantaj sağlayacak şekilde belirlenmelidir. Petek hücrelerini oluşturan malzemelerin kesme modülünün düşük olarak seçilmesine istinaden, sandviç panelin en yüksek sağlamlığı sağlamalıdır. Bu sayede sandviç yapısının uzun süre kullanılmasını sağlamaktadır(Aslan ve ark., 2018).

Sandviç panellerde, yüklerin bir yerden diğer yere aktarılabilmesi için kullanılan yapıştırıcı önemlidir. Yapıştırıcı petek yapıyla, tabakaları birbirine kuvvetli olarak yapıştırma özelliği bulundurması gereklidir. Dayanımı ve yüksek modüle sahip yapıştırıcılar tabakalar halinde, macun veya sıvı olarak bulunabilmektedir. Kırılğan yapıya ve zayıf yapıştırma özelliğine sahip yapıştırıcılar hafifliği az sandviç yapılarda kullanım, depolama, uygulama alanlarında kesinlikle kullanılmamalıdır. Üretim ve uygulama sahalarında genel olarak sandviç paneller ekonomik olarak gözükse maliyetleri dikkate alınması gerekmektedir(zen, 2018).

2.5.1 Sandviç Panellerin zellikleri

Sandviç panellerin en temel kolaylığı uygulamaya bağlı olarak özelliklerinin ayarlanabilmesidir. Sandviç panellerde olması gereken özellikler aşağıdaki gibidir.

1. Düşük yoğunlukta olmalıdır. Hafif ekirdek seçimi veya yüksek yoğunluklu genişlemiş konstrüksiyonlu malzeme seçilerek bu sayede sandviç kompozitin toplam yoğunluğu azaltılmaktadır.
2. Eğilme dayanımı yüksek olmalıdır.
3. Hasar toleransı yüksek olmalıdır. Çekirdek olarak lastik gibi köpük veya ezilebilir malzemenin kullanımı sandviç panel yapısının dayanımını yükselterek hasarlardan etkilenmeyen dayanımlı bir yapı haline getirir(Potoğlu, 2012).

Sandviç panellerin avantajları aşağıdaki gibidir.

1. Özellikleri ihtiyaçlara göre ayarlanabilmektedir.
2. Çekirdek ve tabaklar için çok miktarda malzeme çeşitliliği bulunmaktadır.
3. Düşük yoğunlukta olmasından dolayı hafif yapı elde edilebilir.
4. Eğilme dayanımları yüksektir.

Sandviç panellerin dezavantajları aşağıdaki gibidir.

1. Sandviç panellerin kısmen diğer kompozit yapılara göre daha kalın olmaktadır.
2. Sandviç panellerin işleme maliyetleri yüksektir.
3. Tabakalar ile çekirdek yapının birleştirme işlemi zordur.
4. Hasar almaları durumunda tamirlerinin zordur.

2.6.Literatür Araştırması

Bu bölümde, yapılan çalışma kapsamında daha önce gerçekleştirilen çalışmalara yer verilmiştir. Yapılan bu çalışma, nano-silika katkılı cam/pet sandviç kompozitlerin eğilme ve basma kuvvetleri altında hasar davranışlarına olan etkilerinin incelenmesi nde üç nokta eğme ve basma hasarları davranışlarını incelenmiştir. Cam/pet sandviç kompozitlerin eğilme ve basma kuvvetleri altında hasar davranışları ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar aşağı sunulmuştur.

Galetti ve ark. (2008) eğilme kuvvetine tabi tutulmuş bal peteği kompozit levhaların hasar dayanımları ve tiplerini araştırmışlardır. Çalışmada hasar oluşumunun hasarın uygulandığı yerdeki temas yüzeyinden hasara uğramaya başladığını gözlemlemişlerdir (Galletti ve ark., 2008)

Gümülcine ve ark. (2013) yaptıkları bir çalışmada bazalt ile E-cam elyaf kompozitlerin mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. E-cam kompozit numunelerinde daha yüksek çekme dayanımı gösterirken, eğme ve basmaya karşı bazalt kompozit numunelerin daha yüksek mukavemette oldukları sonucuna

ulaşmıştır. 20 Çekme, eğme ve basma için uygulanan yük ise bazalt kompozit numunelerinin elastikiyet modüllerinin daha yüksek olduğunu belirlemiştir (Gümülcine ve ark., 2013).

Wang ve ark. (2018) çalışmalarında karbon/alüminyum bal peteği kompozit sandviçlerde çekirdek kalınlığının ve yoğunluğunun sandviçlerin özelliklere etkisini üç nokta eğme ve panel soyma testlerini incelemiştir (Wang ve ark., 2018).

Farooq ve ark. (2017) farklı kütleme sıcaklıkları ve şartlarında üretilen karbon/nomex bal peteklerine üç nokta eğme deneyleri uygulamışlardır. Çalışmalarında en iyi mekanik özellikleri 130oC 3 saat kütleme şartlarında elde ettiklerini belirlemiştir (Farooq ve ark., 2017).

Demirci (2020) yapmış olduğu çalışmada, E-cam elyaf alüminyum bal peteği kompozit sandviçlerin hem tabakalı yüzey kompozit plakaların epoksi matrisine ve epoksi ara yüzeyine çok duvarlı karbon nanotüp katarak, üç nokta eğme ve Charpy darbe davranışlarını incelemiştir. Çalışmasında karbon nanotüplerin eğilme kuvvetini ve enerji absorpsiyonunu arttırdığını tespit etmiştir. Karbon nanotüplerin kompozit yüzeylere ve ara yüzeyine nano ölçekli kırılma mekanizmaları sağladığını belirlemiştir. Demirci aynı zamanda nano katkılı kompozit sandviçlerin araç güvenliğinde kullanılabilirliğinin üzerinde de çalışmasında vurgulamıştır (Demirci, 2020).

Shi ve ark. (2014) karbon elyaf alüminyum bal peteği kompozit sandviçlerin ara yüzeylerine kısa kevlar elyaf takviyesi yaparak, ara yüzey tokluğunu arttırmayı çalışmalarında hedeflemiştir. Kevlar takviyeli ve takviyesiz kompozit sandviç numunelere uyguladıkları üç nokta eğme ve basma testlerinde, kevların ara yüzeyin toklaştırmasında önemli katkı sağladığını tespit etmişlerdir. Ara yüzey epoksi yapıştırıcıya takviye ettikleri kevlar elyafların yapışma alanını artırarak üç nokta eğme dayanımını arttırdığını belirlemiştir. Karbon yüzey ile alüminyum çekirdek ara yüzeyinde oluşan fillet yapılarıdaki çatlaklarda hasarın ilerlemesinde kevlar elyafların köprüleme etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir (Shi ve ark., 2014).

Jan ve ark. (2015) cam elyaf yüzeyli alüminyum bal peteği kompozit sandviçlere üç nokta eğme deneyleri uygulamışlardır. Maksimum kırılma yüklerini belirlemişlerdir. Çekirdek yapıda burkulma hasarlarının deneyler neticesinde meydana geldiğini belirlemişlerdir (Jan ve ark., 2015).

A.Leone 2012 çalışmaların da kompozit sandviç panellerin düzlem içi çekme ve basınç yüklemesi altındaki darbe hasarı, delikler ve çentiklerle hasar toleransı daha önce kupon ve eleman ölçeği seviyelerinde araştırılmıştı. Tipik bir uçak gövdesi, ağırlıklı olarak düzlem içi yüklerle maruz kalır, ancak hasarlı bölgeler, iç basınçlandırma nedeniyle lokalize düzlem dışı bükülme ve şişkinlik yaşayabilir. Bu testlerin amacı, birleşik yüklemeye maruz kalan tipik bir sandviç gövde yapısını yansıtan tam ölçekli kavisli kompozit panellerin hasar toleransı üzerindeki deliklerin ve çentiklerin etkilerini incelemektir. (A.Leone 2012).

Zhou ve ark. (2021) çalışmalarında Y şeklindeki çekirdek yapıya sahip karbon sandviç kompozitlere düşük ve yüksek sıcaklıklarda (-70oC ve 200oC aralığı) üç nokta eğme deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Deneyler neticesinde sıcaklığın artmasıyla birlikte, kuvvet-deplasman eğrilerinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Camsı geçiş 19 sıcaklığının üstünde elyaflarda burkulma camsı geçiş sıcaklığının altında ise elyaflarda kırılma hasarlarının meydana geldiğini tespit etmişlerdir (Zhou ve ark., 2021) Shi ve ark. (2014) .

Dr.Damian Bannister (2014) çalışmalarında, denizcilik ve rüzgar sektörlerinde tercih edilen sandviç malzemelerinde bulunması gereken genel özellikleri araştırmıştır. Mukavemet anlamında güçlük yapılar olduğunu ancak kalınlıkları az olmasından dolayı sertlik değerlerinin düşük olduğunu tespit etti. Mukavemet değerini aşağıya çekmeden sertliğini arttırmak ve ağırlıkğını azaltmak adına çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Mühendislik teorisi, katı bir laminatın bükülme sertliğinin, kalınlığının küpüyle orantılı olduğunu gösterir; sandviç laminatlar için yaklaşık olarak kalınlığının karesiyle orantılıdır. Bu nedenle kompozit malzemedeki bir çekirdeğin amacı, laminatın kalınlığını düşük yoğunluklu bir malzemeyle etkili bir şekilde kalınlaştırarak arttırmanın mümkün olduğu sonucuna ulaşmıştır(Bannister, 2014).

Kinloch ve ark. (2018) yapmış olduğu çalışmada, çekirdeği oluşturmak için üç kat poli (vinil klorür) köpük içeren cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) kaplamalar kullanılarak, köpük katmanlarının yoğunlukları 60 ile 100 m³/kg arasında değişen çeşitli sandviç yapılar kullanmışlardır. Çalışmada, sandviç yapıların yarı statik bükülme ve yüksek hızlı darbe özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kullanılan polimerik köpük çekirdeğin yoğunluğu ve köpük çekirdeğin yoğunluğunun kalınlığı boyunca derecelendirilmesini incelemişlerdir. Deformasyon, gerinim ve hasar başlangıcı değerlerini niceliksel olarak ölçmek için dijital görüntü korelasyon tekniği kullanılmıştır. Yarı statik üç noktalı ve dört noktalı bükülme yüklemesi altında, kademeli yoğunluk konfigürasyonunda düşük yoğunluklu bir katmanın kullanılması, çekirdek konfigürasyonla karşılaştırıldığında, sandviç yapının ani bir kuvvet düşüşü nedeniyle arızalanma olasılığını azalttığını görmüşlerdir. Sandviç yapılar üzerinde yüksek hızlı darbe testleri, yüksek yoğunluklu polietilen mermili bir gaz tabancası kullanılarak gerçekleştirildi. Bu darbe deneylerinden, ön (yani darbe alan) GFRP kaplamanın hemen arkasında yer alan nispeten düşük yoğunluklu katmana sahip kademeli yoğunluklu köpük çekirdeğin, homojen bir çekirdek yapısına göre daha fazla darbe enerjisini emdiği ve daha yüksek bir nüfuz direncine sahip olduğu bulmuşlardır(Kaboglu ve ark., 2018).

Yan ve ark. (2019) rüzgâr türbini kanatlarına yıldırım çarpmalarında, kanatlarda meydana gelen hasarları dayanıklı performans ürünleri ile azaltmayı amaçlamışlardır. Kanatların hasara maruz kalan alanları arka kısımlarda ana kirişlere yakın yerlerde yer aldığını gördüler. Bu amaçla, çekirdek malzemelerinde hasar alacak noktalarda PVC, PET ve balsa ağacı kullandılar. Balsa ağacı kullanılan kanatların dayanımları PET ve PVC kullanılan kanatlara göre daha dayanıklı olduğunu gördüler. Üç malzemenin içine PVC malzemesinin dayanım değerleri en düşük olduğunu anladılar. Balsa ağacının ve PET malzemelerinin rüzgar kanatlarının tasarımlarında hasarı minimize etmekte önemli rol oynadığı sonucuna vardılar(Yan ve ark., 2019).

Jiang ve ark (2020) çalışmalarında Avrupa Birliği'nde yer ömrünü tamamlamış araç direktifine göre, araçların daha sürdürülebilir olması için çalışmalar yapmışlardır. Bu bağlamda termoplastik matris bazlı kompozit malzemelerin geri dönüştürülebilirliğini gördüler. Çalışmalarında karbon fiber ve PET köpük

kullandılar. Sandviç kompozit kaplamanın üretiminde yapışkan termoplastik polimer film ile yüksek basınçlı sıkıştırılmalı kalıplama kullandılar. PET köpük çekirdeği termoplastik yapışkan bir film kullanılarak entegre edildi. Üç nokta eğme testi uygulayarak sonuçları değerlendirdiler. Bu doğrultuda PET köpük malzemelerin özellikle kamyonların yan panellerinde olumsuz rüzgar veya fırtına koşullarında çalışması için mükemmel bir malzeme olacağını tespit etmişlerdir(Jiang ve ark., 2020).

Alshahrani ve ark (2022) kompozit sandviç yapıların deneysel ve sayısal çalışmalarını gerçekleştirdiler. Farklı kompozit sandviç panelin imalatında termoplastik ve epoksi reçineler kullandılar. Rüzgar türbini endüstrisinde köpük türü ve farklı yoğunluklar ile numunelerini ürettiler. Kapsamlı üç nokta eğme testi numunelere uygulandılar. Sonuçları için sonlu elemanlar yöntemi ve aboqus programlarında karşılaştırma yaptılar. Cam elyaf takviyeli köpüğün eğilme dayanımının GFRP kompozit parçalarına göre daha yüksek olduğunu gördüler. Reçinenin sandviç yapı ile mükemmel bir uyum olduğunu gördüler ve PVC köpük çekirdekli sandviç panel için termoplastik reçine kullanılması bükülme mukavemetini arttırdığı tespit edildi(Alshahrani ve Ahmed, 2022).

Jishi ve ark (2015) çalışmalarında köpük bazlı sandviç yapıların ara yüzey kırılma özelliklerini arttırmaya yönelik teknikler araştırılmıştır. Üretimden önce, reçine infüzyon işlemi sırasında reçine akışını kolaylaştırmak amacıyla PET köpük çekirdeğine delikler açtılar. Daha sonra sandviç yapının ara yüzey kırılma dayanıklılığını arttırmak amacıyla deliklere cam elyafları yerleştirdiler. Bu testlerden elde edilen sonuçlarda, düz bir PET çekirdeği üzerinde ve ayrıca dikey deliklere hiçbir fiber takviyesinin dahil edilmediği numuneler üzerinde yapılan benzer testlerden elde edilen verilerle karşılaştırdılar. Fiberlerin kalınlık boyunca deliklere dahil edilmesi, sandviç yapıların yüzey çekirdek ara yüzey kırılma dayanıklılığının artırılmasına hizmet ettiği görüldü. Burada en yüksek kırılma tokluğu değerlerinin, düz köpük sisteminde ölçülen değerlerin üç katından fazla olduğu kaydedildi(Jishi ve ark., 2016).

Alshahrani ve ark (2022) çalışmalarında benzersiz hafif yapıları ve üstün mekanik özellikleri hedeflediler. Çalışmalarında farklı köpük tipi ve yoğunluğuna

sahip kompozit sandviç panellerin yanında sıvı termoplastik ve termoset reçine ve kullandılar. Hazırlanan numunelerine çekme testi ve üç nokta eğme testi uyguladılar. Sandviç kompozitin eğilme ve çekme mukavemeti reçine kullanıldığında sırasıyla %53 ve %75 artmış olduğu sonucunu tespit ettiler(Alshahrani ve ark., 2022).

Chen ve ark (2021) çalışmalarında polimerik köpük termo form köpük enjeksiyonlu kalıplama ile otomotiv uygulamaları için karmaşık geometrili sandviç yapıların üretilmesine yönelik uygulanabilir süreçleri araştırmak amacıyla çalışmalarını yaptılar. Enjeksiyon kalıplanmış köpükler genellikle yüksek yoğunluk, zayıf hücre morfolojileri ve gereksiz cilt katmanlarından olumsuzluk yaratmaktaydı. Köpük filmler için, yüksek ve düzgün dağılmış basınç gerekti. Köpükler basınçla indüklendi. Üç boyutlu karmaşık geometriye sahip köpük parçalarının üretilmesi çalışmaları zorlaştırdı. Bu sebeple köpüklerin çoğunluğu ısıyla şekillendirildi. Termo form işlemi sırasında köpüklerin mekanik özellikleri köşelerde azaldığını gördüler. Bu sayede yüksek performanslı termo form ideal olarak, ısıyla şekillendirilmiş köpük çekirdekler iyi özelliklere sahip olacağı görüldü(Chen ve Das, 2022).

Lanzilotto ve ark (2010) bu çalışmasında termoplastik bir sandviç panel tasarlandılar ve gıda kaplarının yalıtım duvarlarında etkilerinin görülmesi amaçlandı. Polietilen içeren bir sandviç yapıları çekirdek ve polipropilen cam elyaf katkılı çekirdek ile poliüretan köpükten oluşan sistemlerin değerlendirmeleri yapıldı. Eş zamanlı olarak ısı yalıtımına ve yeterli mekanik özelliklere bakıldı. Sonuç olarak 100 mm kalınlığındaki büyük düz panellerin üretimi için termoplastik sandviç paneller olumlu etki yarattığı görüldü(Pappadà ve ark., 2010).

Sampathkumar ve ark (2023) Bu çalışmasında, köpüklerdeki fiber takviyelerinin malzemelerin yapıları geliştirilmesi amaçlanmıştır. Artırılmış elyafların kütlesi ve kapsamı ve uygulanan epoksi reçine miktarı dahil olmak üzere, farklı agregatlar yoluyla elyafların desteklenmesine işaret ettiği tespit edildi. Üretim yöntemlerinde birkaç ilerleme kaydedildi ve numunelerin direnç kabiliyetine ilişkin sonuçlar kararsız olmasına rağmen, katman ayırma sertliğinin daha da iyileştiği görüldü. Taramalı elektron mikroskopunun çalışmasıyla doğrulandı ve aynı zamanda, kumlama işlemiyle değiştirilen ön tabaka yüzeyine göre yapışma mukavemeti değişimlerini tanımlayan mekanik olarak soyulmuş malzeme yüzeyleri

de tahmin edildi. Sonuç olarak, analiz aynı zamanda alüminyum levha ile pet köpük ve cam kumaş bazlı hibrit sandviç paneller arasındaki bağlantının optimize edilmesi konusunda daha fazla araştırma yapılması ihtiyacını da ortaya çıkardığı görüldü(Sampathkumar ve ark., 2023).

Taraghi ve ark (2016) çalışmasında , çok duvarlı karbon nanotüplerinin iç ve dış yüzey üzerindeki etkisini incelediler. Kevlar elyaf takviyeli epoksi yüzey tabakalarına sahip köpük çekirdekli sandviç panellerin dış yüzeyleri düşük hızlı altı seviyeli, darbeli enerjiye maruz bırakıldı. Enerji profili geri tepme, penetrasyon ve perforasyon eşiklerini belirlemek için diyagramlar çizildi.Tespit için tahribatsız değerlendirme yöntemleri kullanıldı. X-ışını radyografisi ve aktif kızılötesi termografi kullanılarak sandviç panellerin hasar boyutunun ölçümleri yapıldı. Sonuçlar, köpük çekirdekli sandviç panelleremilen enerjiyi ve penetrasyon eşiğini iyileştirebileceğini göstermekte olduğu tespit edildi(Taraghi ve Fereidoon, 2016).

Oliveira ve ark (2022) çalışmasında çevre dostu teknolojilerin gelişmelerini incelediler. Sandviç panellerin çevresel optimizasyonuna yönelik farklı yaklaşımları sınıflandırarak, panellerin çevre dostu, biyo bazlı veya yarı/tamamen yeşil yapılar olarak tutarlı bir şekilde sınıflandırılması önerildi(Oliveira ve ark., 2022).

Robinson ve ark (2020) çalışmalarında, tren vagonu gövde kabuklarının darbe direncini belirlemek için çekirdek sandviç kompozitlere fiber takviyeli plastik laminatlarda uygulandığında faydalı olduğu kanıtlanması ve daha fazla analiz yapılması amaçlandı. Yüksek hızlı trenlerin özellikle ön burun bölümü ile araba gövde parçaları darbelere maruz kalabilmektedir. Aerodinamik tasarım yönlerinden dolayı ön burun bölümleri genellikle karmaşık 3 boyutlu geometriler içerir ve sandviç kompozit malzemeler bu açıdan avantajlıdır. Bu doğrultuda E-cam üzerinde yarı statik delme testleri yapıldı. Fiber/epoksi reçine/PET köpük çekirdekli sandviç plakalar sayısal sonlu elemanlar modeli ile geliştirildi ve penetrasyon direnci yapısal hasar açısından deneylerle doğrulandı. Demiryolu etkisi ile ilgili üç standardı ve yüksek hızlı etki parametreleri her durum için analiz edildi(Önder ve Robinson, 2020).

Yao ve ark (2020) çalışmalarında PET köpük hazırlamak için kritik CO₂ (ScCO₂) ekstrüzyon köpükleme benimsendiler ve bunun etkileri araştırılmasını amaçlandılar. Kristallerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, işlem sonrası izotermal işlem kullanılarak arttırıldılar. PET köpüklerin kristalizasyon işlemi, kristal mükemmelliği nedeniyle reddedilme yoluyla ilerledi. Yavaş kristalleşmenin neden olduğu kristalitlerdeki yapısal kusurlar nedeniyle, kristallik hızlı bir şekilde arttı. İzotermal sıcaklığın özellikle camsı geçiş sıcaklığının üzerine çıktığı görüldü. Kristalin faz içeriklerinin çekme modülü ile yakın bir pozitif korelasyona sahip olduğu sonucuna vardılar(Yao ve ark., 2020).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kompozit Sandviçlerin Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında rüzgâr türbinlerinde kullanılan elyaf takviyeli kompozit yüzeylere ve çekirdek ara yüzeyine nano-silika katkısının etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Aynı zamanda rüzgâr türbinlerinde kullanılan balsa ağacı ve PVC çekirdek yapılarının yerine maliyeti daha düşük olan PET (Polietilen yoğunlaştırılmış köpük) yapıların kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmada üst ve alt kompozit yüzeylerde rüzgâr türbinlerinden kullanılan $\pm 45^\circ$ açılı 600 gr/m E-cam elyaf kumaşlar elyaf takviyesi olarak kullanılmıştır. Matris malzeme olarak ise orta yoğunlukta epoksi reçinenin kullanılması tercih edilmiştir. Orta yoğunlukta kullanılan epoksi Hexion DGEBA MGS LR 285 reçine olup, sertleştirici olarak ise MGS LH 287 kullanılmıştır. Epoksi ile sertleştiricinin karıştırma oranı 100:40'dır. Nano-silika ise Mknano firmasından yüzeyleri silan ile modifiye edilmiş halde hazır olarak temin edilmiştir. Nano-silikalar yüzeyleri gözenekli küresel bir yapıda olup, ortalama 15nm çapındadır. Nano-silikaların yaklaşık özgül yüzey alanları ise 650 g/m^2 'dir.

3.2. Kompozit Sandviçlerin Üretimi

Kompozit sandviçlerin üretimi iki ayrı prosesten oluşmaktadır. Bu prosesler nano-silika katkılı ve katkısız epoksi reçinenin hazırlanması ve el yatırma yöntemi ile E-cam elyaf kumaşların ıslatılması ve PET çekirdeğin yerleştirilmesinden sonra sıcak pres uygulamasıdır.

Nano-silika katkılı ve katkısı reçinelerin hazırlanmasında, iki ayrı aşama yapılmaktadır. Nano-silika katkılı epoksi reçinenin hazırlanma aşamasında nano-silikaların homojen dağılmasını sağlamak amacıyla öncelikle 5 dk süresince mekanik karıştırıcı ile nano-silikaların epoksi reçine ile ön karıştırma işlemi ve prob uçlu ultra-sonik karıştırıcı ile 15 dk son karıştırma işlemi uygulanmaktadır. Nano-silikaların epoksi ile karıştırma işleminde daha önce literatürde yapılan çalışmalar göz önünde tutularak, nano-silikaların ağırlıkça karıştırma oranı %4 olarak belirlenmiştir (Demirci ve ark., 2017; Demirci, 2020). Ultra-sonik karıştırıcının kullanılmasındaki gaye karışımın daha homojen olmasını sağlayabilmektedir. Ultra-

sonik karışımdan sonra nano katkılı epoksi reçine sertleştirici ile karıştırılabilmek için oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Oda sıcaklığına gelen nano katkılı epoksi karışıma katalog değerindeki sertleştirme oranına göre hassas terazi kullanılarak sertleştirici ilave edilmiş ve 5 dk mekanik karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylelikle nano-katkılı epoksi reçine $\pm 45^\circ$ E-cam elyaf kumaşların ıslatılmasına ve kompozit üst ve alt ara yüzeylerin çekirdek ile yapıştırılmasına hazır hale getirilmiştir. Nano-katkısız epoksi reçinenin karıştırılmasında sadece sertleştirici ile karıştırma prosesi uygulanmıştır.

Kompozit sandviçlerin üretimlerinin iki aşamasında el yatırma ile ıslatma işlemi ve sıcak proses uygulaması bulunmaktadır. E-cam kumaşlar 400x400 mm boyutlarında kesilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada nano-silika katkılı ve katkısız E-cam/PET sandviç kompozitlerin üst ve alt yüzeyleri 3 tabakalı olarak belirlenmiştir. Buna göre nano-silika katkılı ve katkısız epoksi reçineler ile cam elyaf kumaşlar el yatırma yöntemi ile ıslatılmıştır. Daha sonra üç tabaka halinde ıslatılan kumaşlar üst ve alt tabaka olmak üzere arasına PET çekirdek yerleştirilmiştir. Alt ve üst yüzeylerin üstüne yanmaz film konularak sıcak prese yerleştirilmiştir. Sıcak preste 5 bar basınç altında oda sıcaklığı şartlarında 48 saat kürlenme işlemine tabi tutulmuştur. Kürlenme işlemi tamamlandıktan sonra üretilen nano katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviçler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Şekil 3.1’de gerçekleştirilen sıcak pres uygulamasının resmi verilmiştir. Şekil 3.2’de ise üretilen kompozit sandviçlerin resimleri verilmiştir.



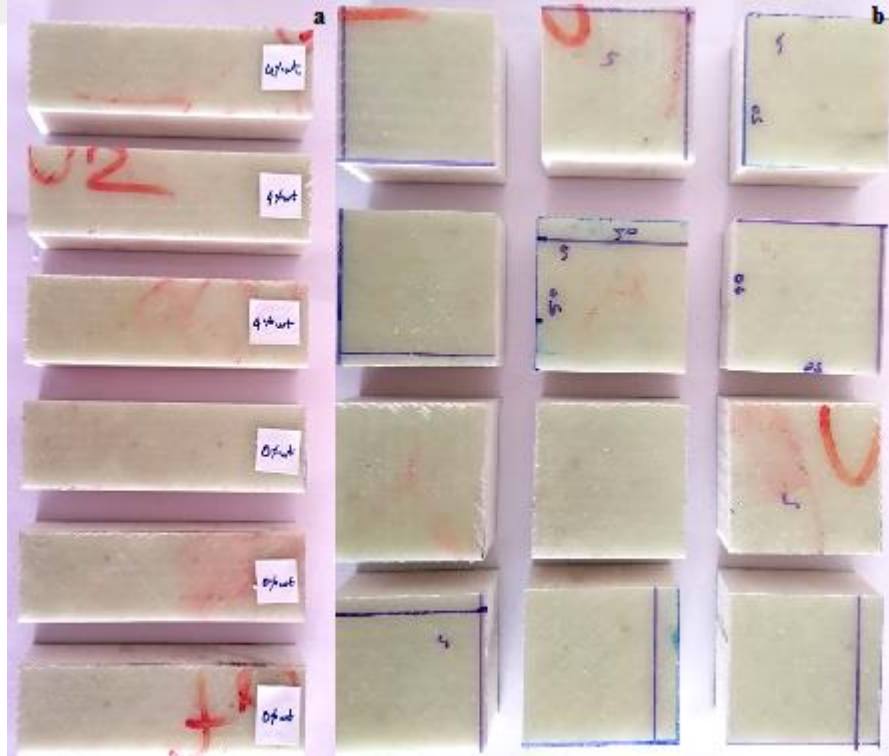
Şekil 3.1. Sıcak presleme yöntemi



Şekil 3.2. Nanosilika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviçler

3.3. Kompozit Sandviçlere Uygulanan Testler

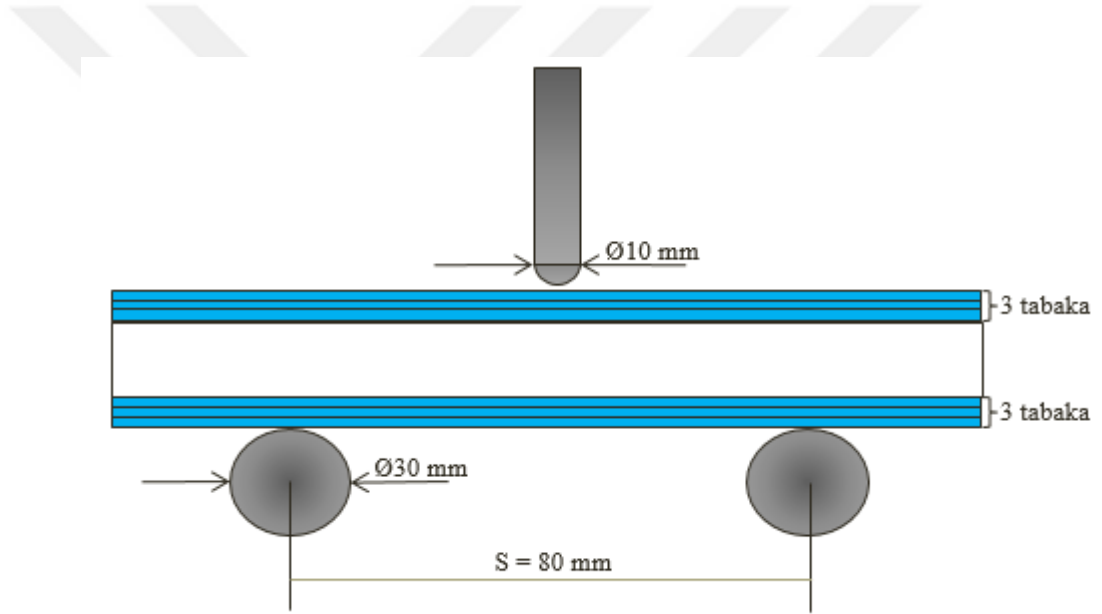
Üretimleri gerçekleştirilen kompozit sandviç plakalar ASTM C393/C393M-20 standardına uygun olarak üç nokta eğme numuneleri, ASTM C 364 standardına göre kenar basma ve ASTM C 365 standardına göre düzlem basma numuneleri hazırlanmıştır. Üç nokta eğme numunelerinin boyutları 130x40x25 mm'dir. Kenar basma ve düzlem basma numunelerinin boyutları ise 50x50x25 mm'dir. Şekil 3.3'de üç nokta eğme, kenar ve düzlem basma numuneleri verilmektedir.



Şekil 3.3 Üç nokta eğme deney (a) Kenar ve düzlem basma numuneleri (b)

3.3.1. Üç Nokta Eğme Deneyleri

Nano-silika katkılı ve katkısız üç nokta eğme deneyleri ASTM C393/C393M-20 standardına göre 5mm/dk basma hızında Shimadzu AGS-X 100 kN elektrik kontrollü basma-çekme test ünitesinde yapılmıştır. Üç nokta eğme deneyleri nano-katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviç numuneler için üçer kez tekrar edilmiştir. Tekrarlanan numunelerin maksimum kuvvet değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Şekil 3.4’de üç nokta eğme test aparatlarının şematik resmi ve Şekil 3.5’de ise numunelerin üç nokta eğme görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.4’ de görüldüğü gibi üç nokta eğme test aparatının alt destek noktalarının çaplarının 30 mm ve üst basma aparatının da çapının 10 mm’dir.



Şekil 3.4 Üç nokta eğme testi aparat şeması



Şekil 3.5 Üç nokta eğme test cihazı

3.3.2. Kenar ve Düzlem Basma Deneyleri

Nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviç numunelere ASTM C 364 standardına göre kenar basma ve ASTM C 365 standardına göre düzlem basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kenar ve düzlem basma deneyleri Shimadzu AGS-X 100 kN elektrik kontrollü basma-çekme test cihazında 5mm/dk basma hızında gerçekleştirilmiştir. Basma deplasmanı 5 mm olarak belirlenmiştir. Deneyler her bir numune çeşidi için üçer kez tekrarlanmıştır. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de kenar ve düzlem basma test resimleri sunulmuştur.



Şekil 3.6 Kompozit sandviçlere uygulanan kenar basma testi

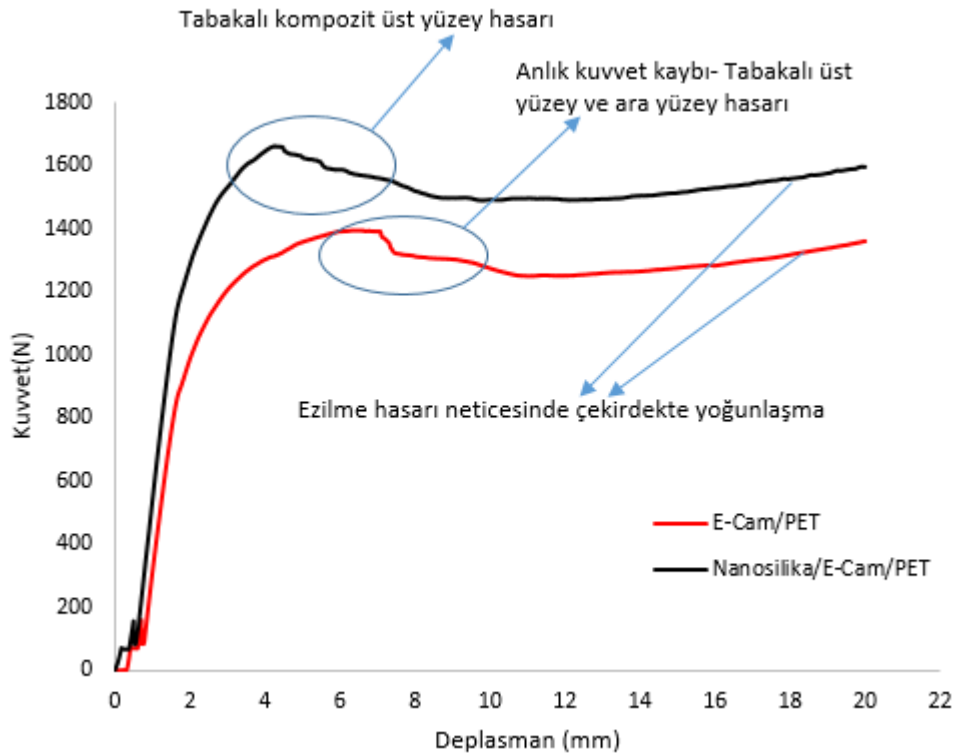


Şekil 3.7 Kompozit sandviçlere uygulanan düzlem basma testi

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Kompozit Sandviçlerin Üç Nokta Eğme Deneş Sonuçları

Nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviçlere üç nokta eğme, kenar basma ve düzlem basma deneyleri ASTM C393/C393M-20 standardına uygun olarak 5mm/dk basma hızında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler nano-silika katkılı ve katkısız numuneler için üçer kez tekrar edilmiştir. Deneş sonuçları nano-silikanın E-Cam/PET numunelerin kuvvetleri üzerindeki etkilerini ve kuvvet-deplasman eğrileri üzerinde meydana gelen değişimleri analiz edebilmek için Şekil 4.1'de nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET numunelerin kuvvet deplasman eğrileri sunulmuştur.



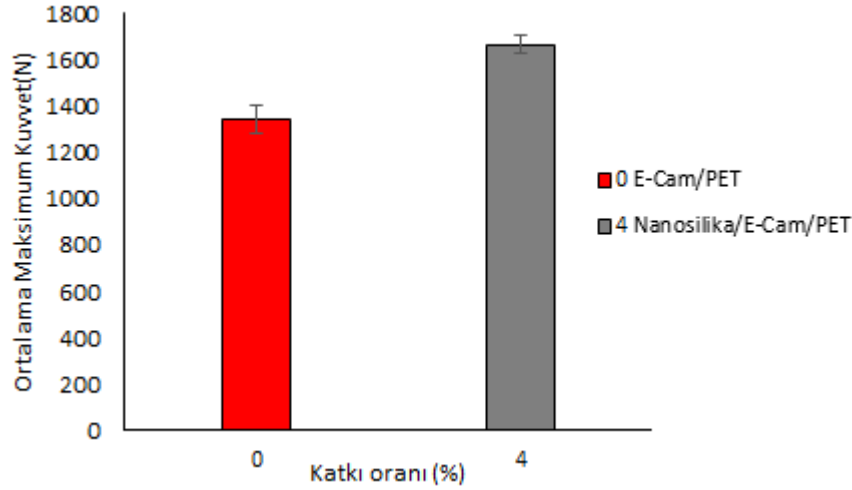
Şekil 4.1. Nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviç numunelerin kuvvet-deplasman grafiği.

Şekil 4.1'de verilen kuvvet-deplasman grafiği dikkatli bir şekilde incelendiğinde, nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviç numunelerin kuvvet değerlerinin maksimum değere ulaştıktan sonra kuvvetlerde

meydana gelen hasarlardan dolayı düşüş eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır. Fakat, üç nokta eğme testinde basma kuvvetinin maksimum değere ulaşmış düşüş gösterdikten sonra belli bir deplasman değerinde yada süresince kuvvet değerlerinde büyük çaplı yükselme yada düşme göstermediği gözlemlenmektedir. Bu yaklaşım düzlemsel davranıştan sonra kuvvet değerlerinde yavaş yavaş artışların olduğu Şekil 4.1’de verilen nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET numunelerin kuvvet değerlerinden görülebilmektedir. Kuvvet değerlerinden bu artışın tamamen çekirdeğin tabakalı kompozit üst yüzeyin kuvvet taşıma kabiliyetinin zayıflamasıyla yükün çekirdek ve tabakalı kompozit alt yüzey tarafından karşılandığı düşünülmektedir. Nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviç numunelerin kuvvet deplasman eğrileri detaylı bir şekilde incelendiğinde, nano-silika katkısının E-Cam/PET numunelerin maksimum kuvvet değerini arttırdığı görülmektedir. Nano-silikalardan E-Cam/epoksi tabakalı üst yüzey ve alt yüzey kompozitlerin eğilme dayanımlarını arttırdığı gibi yüzey/çekirdek ara yüzey dayanımını arttırdığı da söylenebilir. Bu yorum ise kuvvet-deplasman grafiğinde nano-silika katkılı sandviç kompozit numunelerde maksimum kuvvet değerinden sonra kuvvet değerinde ani bir düşmenin olması ve kuvvet değerinde kuvvetin yavaş bir düşüş sergilemesinden kaynakladığı yorumlanabilir. Genel itibariyle üç nokta eğmeye maruz kalan kompozit sandviçlerde maksimum kuvvet değerinden sonra kuvvet değerlerindeki kayıplar üst yüzeylerinde meydana gelen hasarlar ve neticesinde çekirdek yoğunlaşmasından önce üst yüzey/çekirdek ara yüzeyindeki ayrılma yani delaminasyon hasarlarından oluştuğu yorumlanabilir. Üst yüzeylerde meydana gelen hasarlar sonucunda yük taşıma işini çekirdek ve alt yüzeyler üstlenmektedir. Dolayısıyla belirli bir deplasman boyunda kuvvetlerde değişim düşme eğiliminde olmayıp, daha sonrasında ise kuvvet değerlerinde artışlar Şekil 4.1’de verildiği üzere gözlenmektedir. Bu aşamada çekirdek ezilme hasarına maruz kaldığından, çekirdek yapının basma kuvvetine maruz kaldığı eksen doğrultusunda ve etrafında PET çekirdek malzemede basmanın etkisiyle yoğunlaşma meydana gelmektedir. Bunun neticesinde ise kuvvet değerlerinde alt yüzey tamamen hasara uğrayana kadar artışlar görülebilmektedir.

Üçer kez tekrarlanan deneyler neticesinde nano-silika katkılı E-Cam/PET kompozit sandviçler numuneler ortalama yaklaşık 1668 N maksimum kuvvet değeri sergilemiştir. Katkısız numuneler ise yaklaşık olarak ortalama 1346 N maksimum kuvvet değeri göstermiştir. Nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit

sandviç numunelerin ortalama maksimum kuvvet değerleri ve standart sapmaları Şekil 4.2’de verilmiştir.

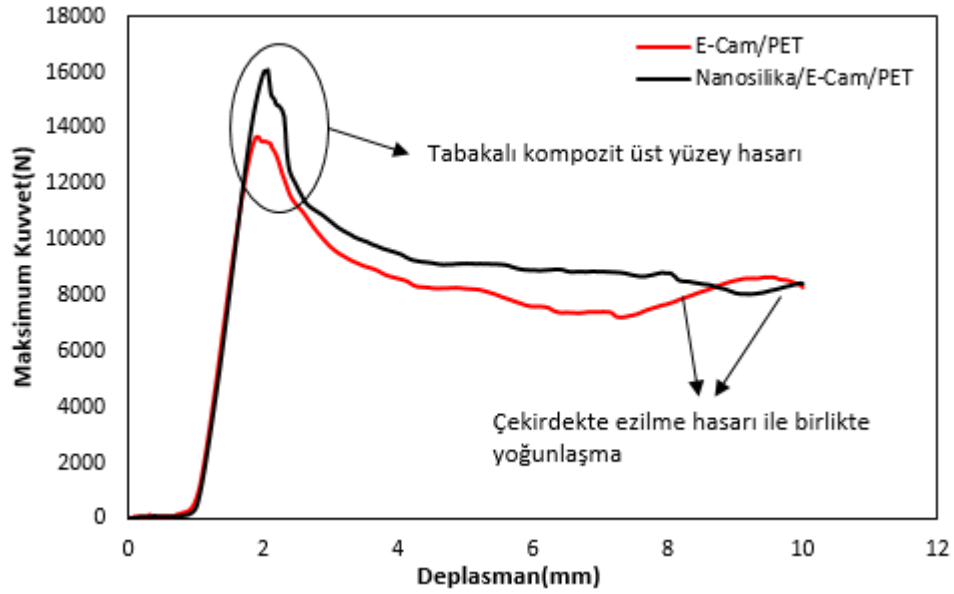


Şekil 4.2. Nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviç numunelerin ortalama maksimum kuvvet değerleri

Şekil 4.2’de gözlemlendiği gibi nano-silika katkısının E-Cam/PET kompozit sandviçlerin ortalama maksimum kuvvet değerlerini arttırdığı görülmektedir. Nano-silikaların kompozit sandviçlerin yaklaşık olarak %23.8’lik maksimum kuvvet değerinde artış sağladığı belirlenmiştir. Kuvvet değerlerinde artışı nanosilikaların sağlamasında etki eden nedenler ve parametreler tezin hasar analizi kısmında detaylı bir şekilde yorumlanmıştır.

4.2. Kompozit Sandviçlerin Kenar Basma Deney Sonuçları

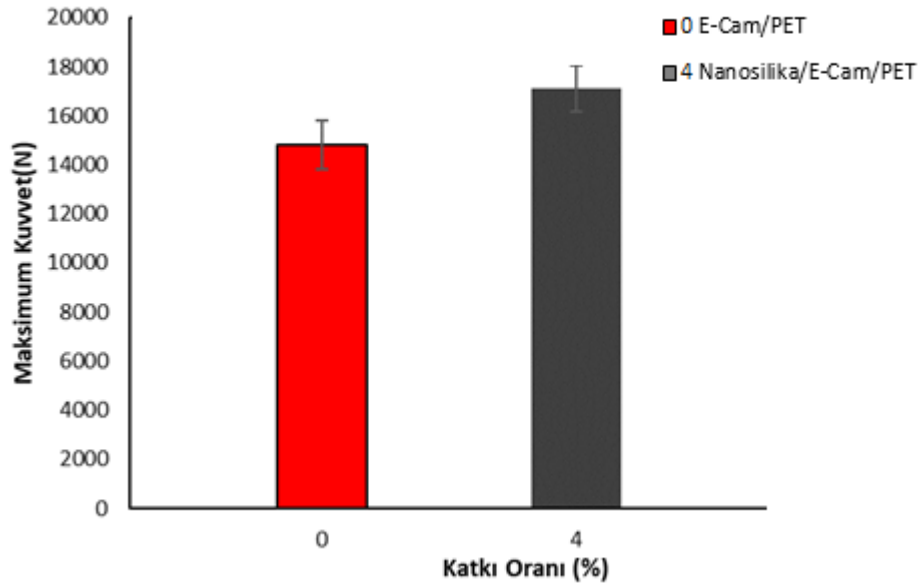
Nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviç numunelere ASTM C 364 standardına göre kenar basma 5mm/dk basma hızında kenar basma deneyleri uygulanmıştır. Kenar basma deneylerinde deplasman miktarı 10 mm olarak belirlenmiştir. Nanosilika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviç numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri ve ortalama maksimum kuvvet grafiği Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de sunulmuştur.



Şekil 4.3. Nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviçlerin kenar basma kuvvet-deplasman grafiği

Şekil 4.3'de verilen nanosilika katkılı ve katkısız kompozit sandviç numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri incelendiğinde, nano-silika katkısı ile birlikte maksimum kuvvet değerinin arttığı net bir şekilde görülebilmektedir. Bu artışta nano-silikaların kompozit yüzeylere sağlamış olduğu rijitliğin ve dayanımının artışında uygulanan gerilme halinde oluşan hasarları geciktirici bir etki sağladığı düşünülebilir. Şekil 4.3'deki eğrileri incelediğimizde uygulanan basma kuvveti maksimum değere ulaşana kadar elastik bölge ani kuvvet değişimleri görülmeyip maksimum kuvvet değerinden sonra limitli kuvvet kaybı gözlenmektedir. Kuvvet kayıplarının anlık olmadığı görülebilmektedir. Bu kuvvet kayıplarında yüzey kompozitlerde meydana gelen hasar etkin rol oynamaktadır. Bu hasarlar yüzey kompozitlerin takviye elemanın oluşturan E-Cam kumaşların açılmal elyaf yönleridir. Basma kuvvetleri altında elyaf yönlerine göre oluşan matris çatlakları, deboding ve delaminasyon hasarları neticesinde oluşabilen burkulma hasarlarıdır. Fakat burkulma hasarlarının oluşumunda üzerinde çok fazla durulmayan elyaf yönlerinin etkinliği olduğu söylenebilir. Kompozit yüzeylerin hasar gelişimleri burkulma ve ezilme hasarı ile devam ederken, hasar gelişimi PET çekirdeğinde ezilmesi yada burkulmaya zorlanması ile yoluna devam etmekte ve eğrilerde kuvvet kayıplarının azaldığı bir düzlemsel plato bölgesine girmektedir. Akabinde hem kompozit yüzeylerdeki ezilme hem de PET çekirdek malzeme yapısındaki ezilme neticesinde, çekirdekteki

yoğunlaşma nedeniyle kuvvet değerlerinde yavaş seyreden bir artışa neden olmaktadır. Kompozitlerin hasar analizlerinde bu durum daha detaylı bir şekilde ifade edilecektir. Şekil 4.4’de ise kompozit numunelerin ortalama maksimum değerleri standart sapmaları birlikte sütun grafiklerinde verilmiştir.

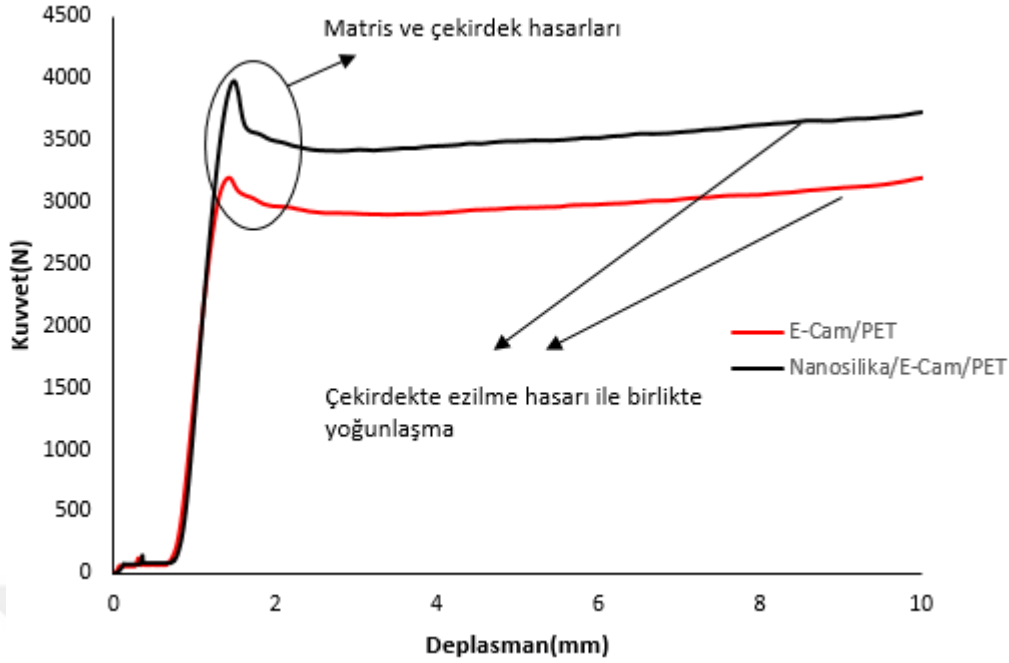


Şekil 4.4. Nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviçlerin ortalama maksimum kenar basma kuvvetleri

Şekil 4.4’de nano-silika katkılı ve katkısız kompozit sandviçlerin ortalama maksimum kuvvetleri verilmiştir. Nano-silika katkılı kompozit sandviçlerin ortalama maksimum basma kuvvet değeri 17402,7 N iken, katkısız kompozit sandviçlerin değeri ise 14289,2 N olarak elde edilmiştir. Nano-silika katkısının E-Cam/PET kompozit sandviçlere yaklaşık olarak %21.7’lik kenar basma kuvvetinde artış sağladığı tespit edilmiştir.

4.3. Kompozit Sandviçlerin Düzlem Basma Deney Sonuçları

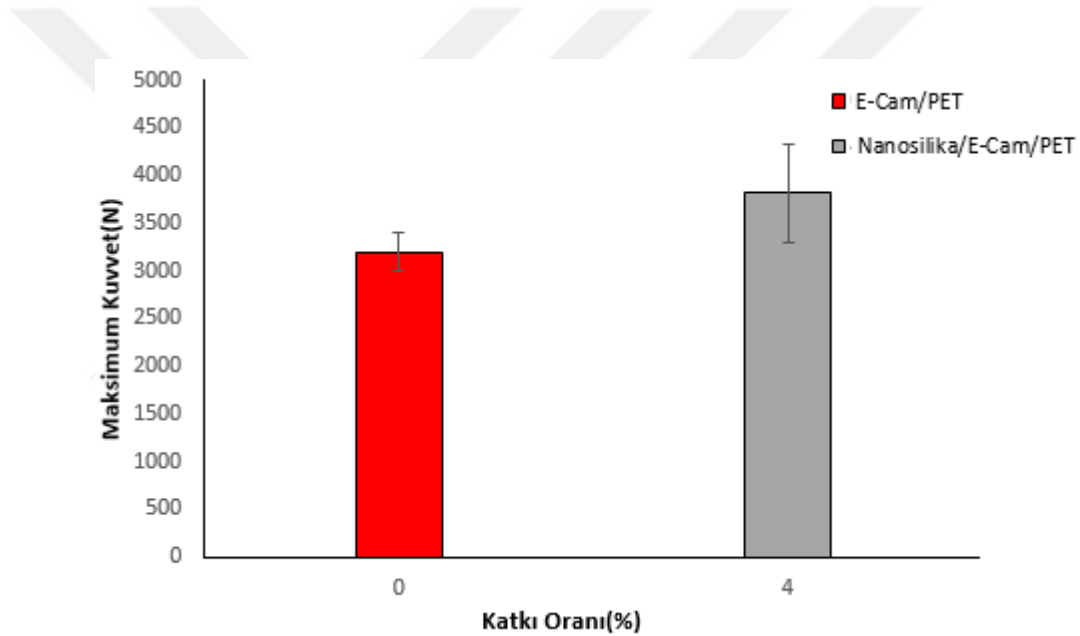
Nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviç numunelere ASTM C 365 standardına göre düzlem basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçları Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da sunulmuştur.



Şekil 4.5. Nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviçlerin düzlem basma kuvvet-deplasman grafiği

Şekil 4.5’de verilen grafik incelendiğinde, nano-silika katkılı E-Cam/PET kompozit sandviçlerin katkısız kompozit sandviç numunelere göre daha fazla maksimum kuvvet değeri sergilediği görülebilmektedir. Kompozit sandviç numunelerin her ikisinin maksimum kuvvet değerinden sonra benzer eğimde kuvvet değerlerinde düşüşlerin olduğu gözlemlenmektedir. Fakat nano-silika katkılı numunelerdeki kuvvet düşüşü oransal olarak daha fazla olduğu eğilerden anlaşılmaktadır. Bunun temel sebebini ise PET çekirdek panel yüzeyinde, kompozit yüzeyler ile daha iyi bir ara yüzey dayanımı sağlamak amacıyla imalatçı firma tarafından açılan lokal kesme boşluklarından kaynaklandığı yorumlanmaktadır. Çekirdek panellerin üzerinde açılan bu kesme yada delik boşluklar yüzey/çekirdek ara yüzey dayanımını arttırmak için hem yapıştırıcının hem ara yüzey temas alanını genişletmekte hem de yanal kuvvet etkileri yada eğilme esnasında oluşan kayma gerilmelerine karşı ara yüzeylerde mekanik kilitlemeler ile dayanım direncini kazandırdığı ifade edilebilir. Bu boşluklara nano-silika katkılı epoksi reçinenin nüfuzu neticesinde boşluk arasında kalan çekirdek yapıya tıpkı bir inşaat yapıda kirişleri tutan sütunlar gibi destek sağlamaktadır. Dolayısıyla basma kuvvetleri altında katkısız reçine göre daha yüksek dayanım gösteren nano-silika katkılı epoksi reçinelerin tıpkı bir kolon burkulması ve neticesinde kırılması gibi bir kırılma

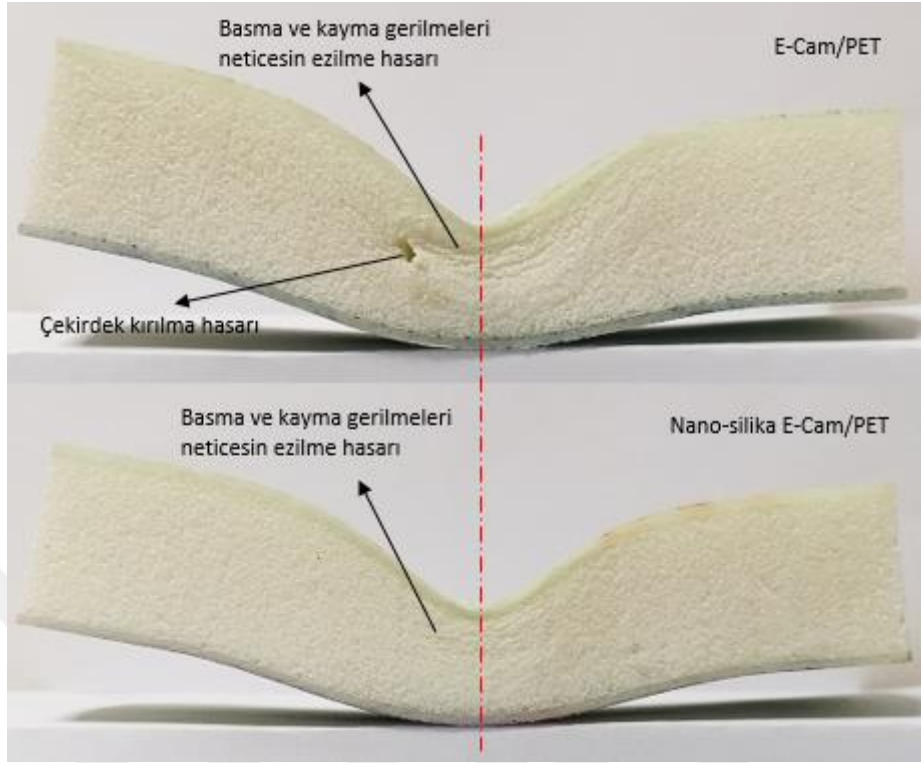
davranışı sergilediğinden kuvvet kayıpları katkısız reçinelere oranla daha yüksek olabilmektedir. Fakat kuvvet kaybı sonunda bile katkısız sandviç numunelere göre yüksek kuvvet değerleri sergilemektedir. Daha sonra yükün çekirdek yapı tarafından karşılanmasıyla ezilme hasarları oluşmaya başladığı yorumlanabilir. Bu süreçte kuvvet değişimleri çok göstermediğini eğrilerden anlaşılabilir. Fakat PET çekirdek malzemesi içinde gözenekli yapısındaki boşlukların kuvvet altında kapanmasıyla beraber, çekirdek malzemedeki yoğunlaşma görülmektedir. Ezilme hasarları neticesinde yoğunlaşma daha da arttığı ifade edilebilir. Bunun neticesinde ise kuvvet değerlerinde yavaş yavaş artışların olduğu Şekil 4.5'deki her iki numunenin eğrilerinde gözlemlenebilmektedir. Şekil 4.6'da ise düzlem basma kuvvetlerinin standart sapmaları ile birlikte maksimum ortalama kuvvet değerleri sunulmuştur.



Şekil 4.6. Nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviçlerin ortalama maksimum düzlem basma kuvvetleri

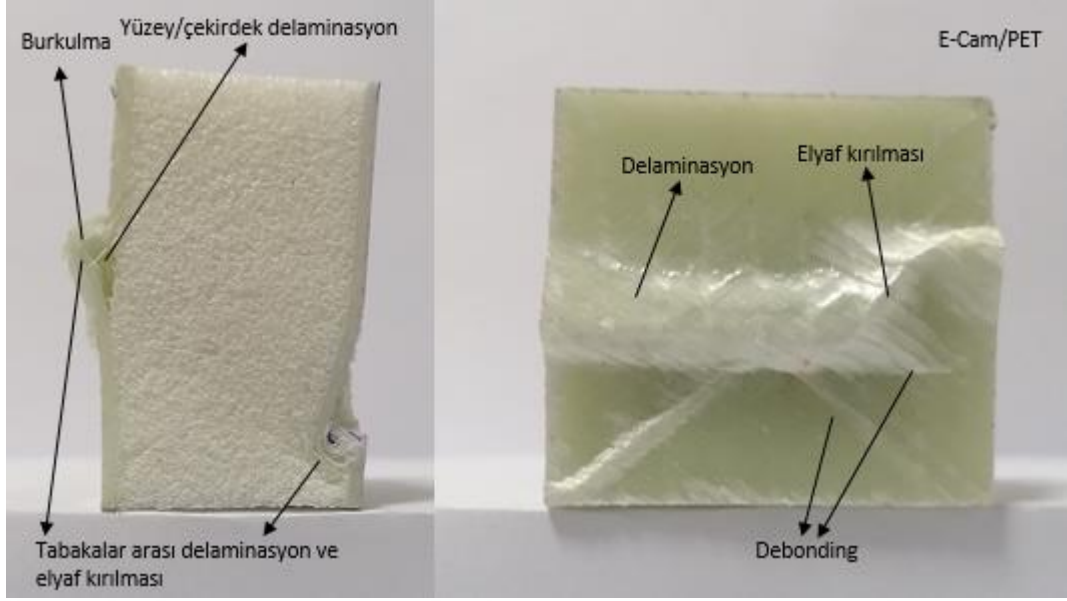
Şekil 4.6'da verilen sütun grafikleri incelendiğinde, nano-silika katkılı E-Cam/PET kompozit sandviçlerin maksimum ortalama düzlem basma kuvveti 3814,5N'dur. Katkısız E-Cam/PET kompozit sandviçlerin maksimum ortalama düzlem basma kuvveti ise 3195,8 N'dur. Nano-silika katkısı kompozit sandviçlerin düzlem basma kuvvetini yaklaşık olarak %19,3 artırdığı tespit edilmiştir.

4.4. Kompozit Sandviçlerin Hasar Analizleri



Şekil 4.7. Nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET sandviç kompozitlerin üç nokta eğme deneyi neticesinde oluşan hasarların makro görüntüleri

Şekil 4.7’de verilen makro görüntüler incelendiğinde, katkısız ve nano-silika katkılı E-Cam/PET kompozitlerde eğme aparatının hemen altındaki üst yüzey kompozit tabakada lokal eğilme, alt yüzey ise genel eğilmenin olduğu açıkça görülebilmektedir. Katkısız numunelerde eğilme kuvveti etkisi altında meydana gelen kayma gerilmeleri neticesinde çekirdekte kırılma hasarı görülebilmektedir. Katkısız numunede ise lokal eğilmenin olduğu bölgelerde ezilme hasarı gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.8. Katkısız E-Cam/PET sandviç kompozitlerin kenar basma deneyi neticesinde oluşan hasarların makro görüntüleri

Şekil 4.8’de katkısız kompozit numunelere kenar basma testleri uygulandıktan sonra meydana gelen makro hasarlar görüntülenmiştir. Şekil 4.8 dikkatlice incelendiğinde, katkısız kompozit sandviç numunelerin orta bölgelerinde üst ve alt kompozit yüzeylerde burkulmaların olduğu tespit edilmiştir. Kompozit yüzeylerde meydana gelen burkulma neticesinde tabakalı E-Cam kompozitlerde tabakalararası delaminasyon hasarları ve elyaf kırılma hasarının meydana geldiği belirlenmiştir. Aynı zamanda E-Cam tabakalı yüzey kompozitlere üstten bakıldığında orta bölgelerde yoğun beyazlaşmalar ve elyaf/matris ayrılması olan debonding hasarları gözlemlenebilmektedir. Özellikle yüzey/çekirdek delaminasyon hasarı üç nokta eğme numunelerinde gözlemlenmemesine rağmen kenar basma deneylerinde katkısız numunelerde belirlenmiştir. Aynı zaman orta bölgelerde yoğun elyaf kırılmaları da tespit edilmiştir.



Şekil 4.9. Nano-silika katkılı E-Cam/PET sandviç kompozitlerin kenar basma deneyi neticesinde oluşan hasarların makro görüntüleri

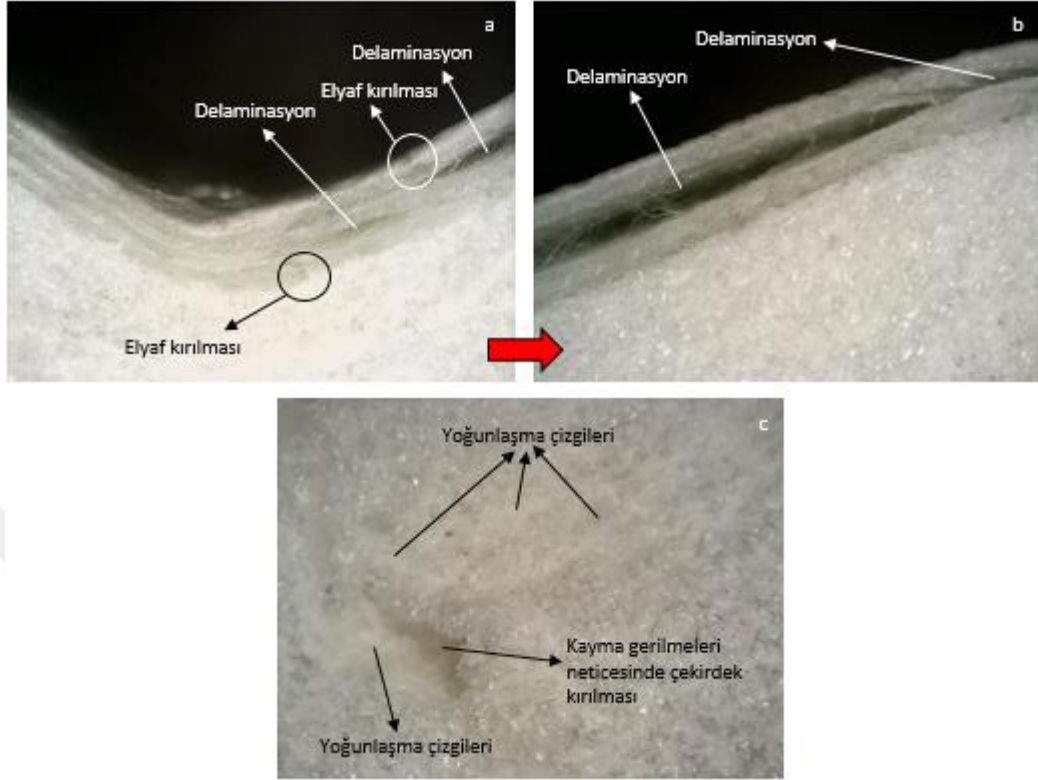
Şekil 4.9’da nano-silika katkılı E-Cam/PET kompozit sandviç numunelerin kenar basma testleri sonucunda meydana gelen hasarların makro görüntüleri incelenebilmektedir. Burkulmaların üst ve alt kompozit yüzeylerin alt kısımlarında meydana geldiği tespit edilmiştir. Katkısız numuneler gibi orta bölgelerde hasar oluşumu meydana gelmemiştir. E-Cam tabakalı kompozit yüzeylerin $\pm 45^\circ$ elyaf yönlerinde hasarların oluştuğu ve elyafların bu yönlerde üst üste binerek tabakaları ezmeye basmanın etkisi ile zorlamıştır. Neticesinde delaminasyon ve elyaf kırılma hasarının oluşumuna neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.10. Nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET sandviç kompozitlerin düzlem basma deneyi neticesinde oluşan hasarların makro görüntüleri

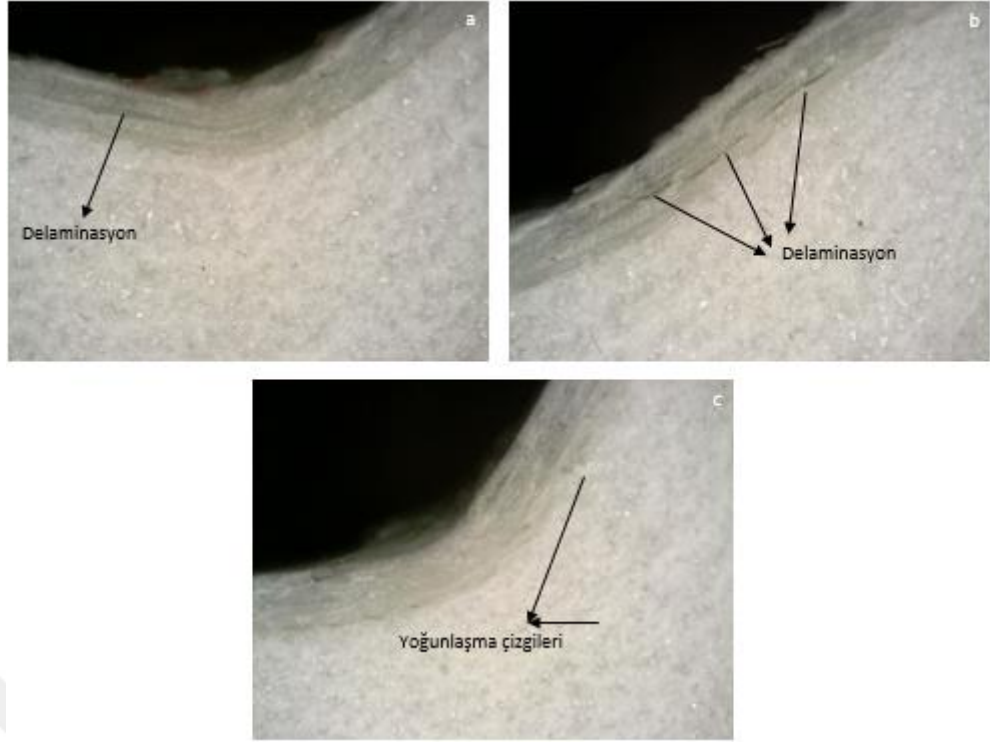
Şekil 4.10’da nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET sandviç kompozitlerin düzlem basma deneyleri neticesinde çekirdekte meydana gelen hasarlar tespit edilmiştir. Katkısız numunelerde basmanın etkisiyle ezilme

hasarlarının çekirdekte kırılmalara neden olduğu gözlemlenirken, nano-silika katkıli numunelerde görülmemiştir.



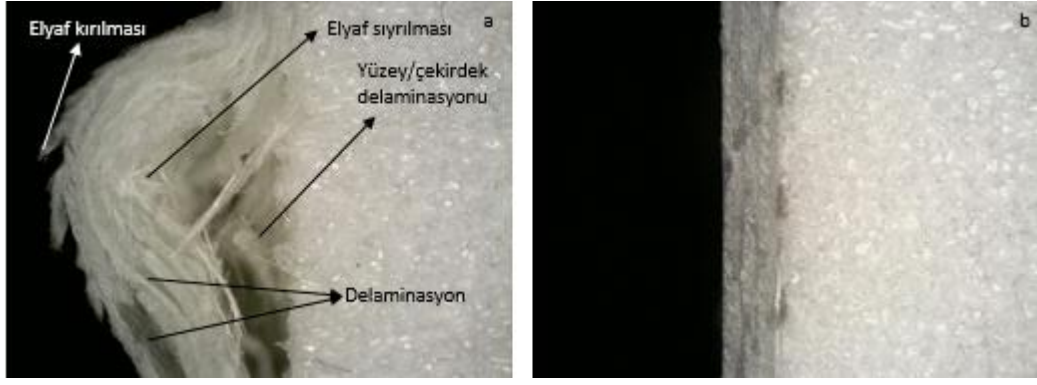
Şekil 4.11. Katkısız E-Cam/PET kompozit sandviç üç nokta eğme numunesinin mikroskop görüntüleri. (50X)

Şekil 4.11’de katkısız E-Cam/PET kompozit sandviçlerin üç nokta eğme deneyleri sonucunda meydana gelen hasarlar mikroskop ile görüntülenmiştir ve hasarlar detaylı bir şekilde tespit edilmiştir. Katkısız numunelerin E-Cam tabakalı üst yüzeylerindeki hasar incelendiğinde, yoğun delaminasyon hasarları ve elyaf kırılma hasarları Şekil 4.11(a) ve (b)’de görülmektedir. Aynı zamanda tabakalar arası delaminasyon hasarlarının kesintili değil lokal eğilmenin devam ettiği hat boyunca devam ettiği tespit edilmiştir(Şekil 4.11(b)). Şekil 4.11(c)’de ise PET çekirdekte eğilmenin etkisiyle kayma gerilmeleri neticesinde meydana gelen çekirdekte yırtılma yada kırılmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Aynı zamanda eğilme eğrilerinde de gözlemlendiği gibi yoğunlaşmadan dolayı kuvvet artışına neden olan yoğunlaşma çizgileri de tespit edilmiştir.



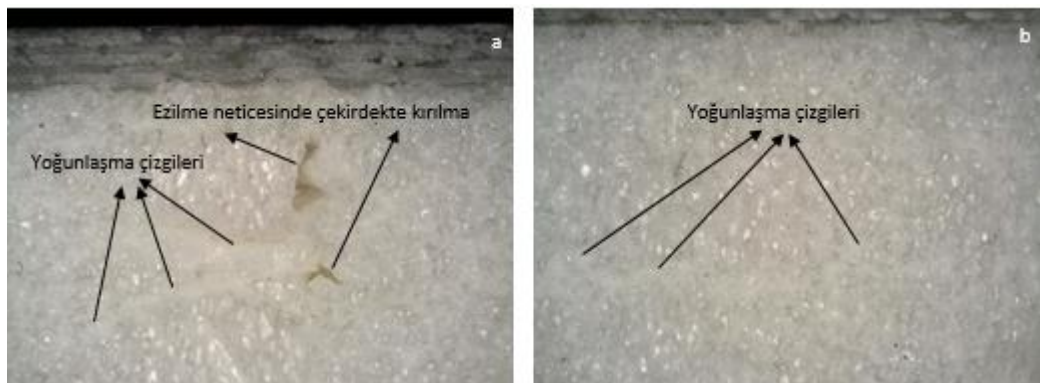
Şekil 4.12. Nano-silika katkılı E-Cam/PET kompozit sandviç üç nokta eğme numunesinin mikroskop görüntüleri. (50X)

Şekil 4.12’de nano-silika katkılı E-Cam/PET kompozit sandviçlerin üç nokta eğme numunelerinin lokal eğilme maruz kaldığı bölgeden alınan mikroskop görüntüleri verilmiştir. Basma yada eğilmenin maruz kaldığı bölgede kısıtlı bölgesel delaminasyon hasarları belirlenmiştir. Global eğilmenin lokal eğilme ile birleştiği bölgede ise yani alt desteklerinin denk geldiği bölgelerde delaminasyon hasarları gözlemlenmemiştir. Şekil 4.12(c)’de ise katkısızda olduğu gibi PET çekirdekte kayma gerilmesi nedeniyle yırtılma ya da kırılma gözlemlenmemiştir. Bunda üst yüzey nano-silika katkısıyla rijitliğinin artmasında etken olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda nano-silikaların hasarları geciktirmek etkisinin etken rol oynadığı yorumlanmıştır. Nano-silikaların mikro ölçekte hasar gelişimine çatlakların ilerleme yönlerini saptırıcı, çatlakların ilerlemesinde bloke etki göstermesi bir nevi duvar çarpma etkisi ve çatlak ilerleyişinde körleştirici etki göstermesi hasar gelişimine yavaşlatıcı etkileri arasındadır.



Şekil 4.13. Nano-silika katkısız(a) ve katkılı(b) E-Cam/PET kompozit sandviç kenar basma numunelerinin orta bölgesinden alınan mikroskop görüntüleri. (50X)

Şekil 4.13’de katkısız ve nano-silika katkılı E-Cam/PET kompozit numunelerin orta bölgelerindeki kenar basma deneyleri sonucunda meydana gelen hasarlar mikroskop ile görüntülenmiştir. Şekil 13(a) nano-silika katkısız numunelerin orta bölgesinde meydana gelen hasar verilmiştir. Basma ile birlikte yüzey kompozitlerde meydana gelen burkulma sonucunda elyaf kırılma hasarları, tabakalar arası delaminasyon, elyaf sıyrılma hasarları ve yüzey/çekirdek delaminasyon hasarları tespit edilmiştir. Bunun aksine nano-silika katkılı kompozit numunelerde ise Şekil 4.13(b) görüldüğü gibi makro görüntülerde de gözlemlendiği gibi orta bölge burkulmanın meydana gelmediği belirlenmiştir. Bu durumun nano-silikaların yüzey/çekirdek ara yüzey dayanımını arttırmasından kaynakladığı düşünülebilir.



Şekil 4.14. Nano-silika katkısız(a) ve katkılı(b) E-Cam/PET kompozit sandviç düzlem basma numunelerinin mikroskop görüntüleri. (50X)

Şekil 4.14 nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviçlerin düzlem basma numunelerinin mikroskop görüntüleri verilmiştir. Nano-silika katkısız E-Cam/PET kompozit sandviçlerin Şekil 4.14(a)'daki mikroskop görüntüsü incelendiğinde PET çekirdekte ezilme neticesinde kırılmaların olduğu görülmektedir. Aynı zamanda basma kuvvetinin etkisiyle basma kuvveti-deplasman eğrilerinde de görüldüğü gibi yoğunlaşmanın etkisine neden olan yoğunlaşma çizgileri de gözlemlenmektedir. Şekil 4.14(b)'de nano-silika katkılı E-Cam/PET kompozit sandviçlerin düzlem basma numunesinin mikroskop görüntüleri verilmiştir. Nano-silika katkılı numunelerde sadece basma kuvvetinin etkisiyle ortaya çıkan yoğunlaşma çizgileri tespit edilebilmiştir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında elyaf takviyeli kompozit yüzeylere ve çekirdek ara yüzeyine nano-silika katkısının etkilerinin üç nokta eğme, düzlem basma ve kenar basma deneyleri gerçekleştirilerek incelenmiştir. Deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar ve hasar davranışları aşağıda maddeler halinde kısaca özetlenmiştir.

1. Nano-silika katkılı ve katkısız E-Cam/PET kompozit sandviç numunelerin kuvvet değerlerinin maksimum değere ulaştıktan sonra kuvvetlerde meydana gelen hasarlardan dolayı düşüş eğiliminde olduğu görülmüştür.
2. Üç nokta eğme deneyleri sonucunda, üç nokta eğmeye maruz kalan kompozit sandviçlerin maksimum kuvvet değerine istinaden kuvvet değerlerindeki kayıplar üst yüzeylerde meydana gelen hasarlar ve neticesinde çekirdek yoğunlaşmasından önce üst yüzey çekirdek ara yüzeyindeki ayrılmaya neden olarak delaminasyon hasarlarından oluştuğu görülmüştür.
3. Katkısız numunelerde eğilme kuvveti etkisi altında meydana gelen kayma gerilmeleri neticesinde çekirdekte kırılma hasarı görülmüştür.
4. Katkısız numunede lokal eğilmenin olduğu bölgelerde ezilme hasarı görülmüştür.
5. Kenar basma testlerinden sonra orta bölgelerde yoğun elyaf kırılmaları da tespit edilmiştir.
6. Nano-silika katkılı kompozit sandviçlerin yaklaşık olarak nanosilika katkısız kompozit sandviçlere göre eğilme kuvvetlerinde %23.8'lik maksimum kuvvet değerinde artış olduğu görülmüştür.
7. Nano-silika katkılı kompozit yüzeylere kenar basma deneyine tabi tutulduğunda, sağlamış olduğu rijitliğin ve dayanımının artışında uygulanan gerilme halinde oluşan hasarları geciktirici bir etki sağladığı düşünülebilir.
8. E-Cam tabakalı yüzey kompozitlere üstten bakıldığında orta bölgelerde yoğun beyazlaşmalar ve elyaf/matris ayrılması olan debonding hasarları görülmüştür.
9. Düzlem basmanın etkisiyle ezilme hasarlarının çekirdekte kırılmalara neden olduğu gözlemlenirken, nano-silika katkılı numunelerde görüşmemiştir.

10. Düzlem basma deneylerinde PET çekirdek malzemesi içinde gözenekli yapısındaki boşlukların kuvvet altında kapanmasıyla beraber, çekirdek malzemede yoğunlaşma görülmüştür.
11. Nano-silika katkısı kompozit sandviçlerin düzlem basma kuvvetini yaklaşık olarak %19,3 artırdığı tespit edilmiştir.

5.2 Öneriler

Gerçekleştirilen çalışmada, PET köpük kompozit sandviçlerin yüzey/çekirdek ara yüzey dayanımlarını arttırmak için nanosilika takviyesinden faydalanılması amaçlanmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmaya ek olarak yapılabilecek olan çalışmalar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

1. Farklı çekirdek malzemeler kullanılarak mekanik testler uygulanabilir.
2. PET köpük yerine Balsa veya PVC köpükler alt ve üst yüzey plakaları olarak kullanılabilir.
3. Üç nokta eğme, düzlem basma ve kenar basma deneylerinin yerine farklı mekanik test metotları uygulanabilir.
4. Farklı tiplerde ara yüzey yapıştırıcıları kullanılabilir.
5. Nano-silika yerine farklı nano malzemeler kullanılabilir.
6. Cam elyaf yerine farklı elyaf türleri kullanılabilir.
7. 45 derecelik örgü tipi yerine farklı örgü türleri kullanılabilir.
8. Farklı çekirdek malzemeleri kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- A.Ş, C. E., 2003, CTP Teknolojisi, *Gebze, Cam Elyaf Sanayi Yayınları*, p.
- Akçay, S., 2018, Yeni bir suni deri imalat makinesinde üretim parametrelerinin belirlenmesi ve otomasyonunun incelenmesi, *Bursa Uludağ Üniversitesi*.
- Akdoğan Eker, A., 2014, Kompozit Malzemeler, *YTÜ Ders Notları, İstanbul*.
- Akşit, M. F. ve Makaracı, M., 2011, An overview of wind turbine manufacturing experience in Turkey.
- Alshahrani, H. ve Ahmed, A., 2022, Study on Flexural Behavior of Glass Fiber Reinforced Plastic Sandwich Composites Using Liquid Thermoplastic Resin, *Polymers*, 14 (19), 4045.
- Alshahrani, H., Ahmed, A., Kabrein, H. ve Prakash, V. A., 2022, Mechanical properties study on sandwich composites of glass fiber reinforced plastics (GFRP) using liquid thermoplastic resin, Elium®: preliminary experiments, *Coatings*, 12 (10), 1423.
- Arabacı, E., 2015, Kompozit Panel Yapı Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Aslan, M., Güler, O. ve Alver, Ü., 2018, Farklı yüzey ve çekirdek malzemelerine sahip sandviç panel kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24 (6), 1062-1068.
- Aydın, U. ve Demirer, A., 2016, Cam Elyaf Takviyeli Polyester Malzeme Üretiminde Kalsit Dolgusunun Mekanik Davranışlara Etkisinin İncelenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 5-10.
- Bahçe, H. T. ve Temiz, Ş., 2019, VAKUM İNFÜZYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN KAYISI ÇEKİRDEĞİ KABUĞU TOZU KATKILI TABAKALI KOMPOZİTLERİN KIYASLANMASI, *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 5 (2), 125-146.
- Bannister, D., 2014, An introduction to core materials, *Reinforced Plastics*, 58 (2), 32-37.
- Bekem, A., Ercan, H., Doğu, M. ve Ünal, A., 2011, Uçak Sanayiinde Kullanılan Balpeteği Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18.
- Beşergil, B., 2016, Kompozitler Temel İlkeler Test Metotları, *Gazi Kitabevi*, 730.
- Chen, Y. ve Das, R., 2022, A review on manufacture of polymeric foam cores for sandwich structures of complex shape in automotive applications, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 24 (1), 789-819.
- Colombo, C., Vergani, L. ve Burman, M., 2012, Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites, *Composite structures*, 94 (3), 1165-1174.
- Demirci, M. T., 2015, SiO₂ nanopartikül katkısının yüzey çatlaklı ve çatlaksız bazalt elyaf takviyeli kompozit boruların yorulma davranışlarına etkisi.
- Demirci, M. T., Tarakçıoğlu, N., Avcı, A., Akdemir, A. ve Demirci, I., 2017, Fracture toughness (Mode I) characterization of SiO₂ nanoparticle filled basalt/epoxy filament wound composite ring with split-disk test method, *Composites Part B: Engineering*, 119, 114-124.
- Demirci, M. T., 2020, Low velocity impact and fracture characterization of SiO₂ nanoparticles filled basalt fiber reinforced composite tubes, *Journal of Composite Materials*, 54 (23), 3415-3433.

- Deniz, M. E., 2005, Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve ısıl işleme presleme tekniğini kullanarak kompozit malzeme üretecek bir düzeneğin tasarım ve imalatı/Production technique of composite materials and the design and manufacturing of an device capable of producing composite materials by using thermal press technique.
- Durgun, İ., 2014, Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit parça üretimi, *OTEKON'14 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi*.
- Durgun, İ., Vatansver, O., Ertan, R. ve Yavuz, N., 2014, OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN KOMPOZİT PARÇA İMALAT YÖNTEMLERİNİN DENEYSEL OLARAK KARŞILAŞTIRILMASI, *Engineer & the Machinery Magazine* (649).
- Ekşi, O., 2007, Plastik esaslı malzemelerin ısıl şekil verme özelliklerinin incelenmesi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Ersoy, H. Y., 2001, Kompozit malzeme, Literatür Yayınları, p.
- Garip, Y., 2010, İndirgen yanma sentezi yöntemi ile Ti-Al-B esaslı kompozit üretimi, *Sakarya Üniversitesi (Turkey)*.
- Güler, C. ve Ulay, G., 2009, Petekli (honeycomb) kompozit levhalar, *Mobilya Dekorasyon Dergisi*, 90, 78-92.
- Gülmez, S., 2018, Otomotiv endüstrisinde kullanılan polimer matrisli kompozit malzemeler.
- Hüner, Ü., 2008, Plastik esaslı kompozit malzemelerin sıcak birleştirme işlemlerinin incelenmesi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Işık, A., 2008, Kompozit malzemeden imal edilmiş bir takviye elemanının eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Işık, E. ve USTA, Y., 2004, SiC Takviyeli Al 12Si Matrisli Kompozitin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Aşınma Davranışının İncelenmesi.
- İşlek, E., 2021, Alev sprey piroliz yöntemi ile çekirdek/kabuk yapısındaki mgal₂o₄/al₂o₃ kompozit tozlarının sentezlenmesi / Synthesis of core-shell mgal₂o₄/al₂o₃ composite powders via flame spray pyrolysis, *skişehir Teknik Üniversitesi / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*
- Jalasutram, S., Sahoo, D. R. ve Matsagar, V., 2017, Experimental investigation of the mechanical properties of basalt fiber-reinforced concrete, *Structural Concrete*, 18 (2), 292-302.
- Jiang, Q., Chen, G., Kumar, A., Mills, A., Jani, K., Rajamohan, V., Venugopal, B. ve Rahatekar, S., 2020, Sustainable sandwich composites manufactured from recycled carbon fibers, flax fibers/PP skins, and recycled PET core, *Journal of Composites Science*, 5 (1), 2.
- Jishi, H. Z., Umer, R. ve Cantwell, W. J., 2016, Skin-core debonding in resin-infused sandwich structures, *Polymer Composites*, 37 (10), 2974-2981.
- Kaboglu, C., Yu, L., Mohagheghian, I., Blackman, B. R., Kinloch, A. J. ve Dear, J. P., 2018, Effects of the core density on the quasi-static flexural and ballistic performance of fibre-composite skin/foam-core sandwich structures, *Journal of Materials Science*, 53, 16393-16414.
- Kalemtaş, A., 2015, Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler, *Bursa: Putech and Composites*.
- Kaya, A. İ., 2016, Kompozit malzemeler ve özellikleri, *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38-45.
- Kim, M. T., Kim, M. H., Rhee, K. ve Park, S., 2011, Study on an oxygen plasma treatment of a basalt fiber and its effect on the interlaminar fracture property

- of basalt/epoxy woven composites, *Composites Part B: Engineering*, 42 (3), 499-504.
- Kıyak, B. ve Kaman, M. O., 2018, Karbon Fiber Kompozit Sandviç Levhaların Yanal Mukavemet Davranışlarının Araştırılması, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18 (2), 684-691.
- Oliveira, P. R., May, M., Panzera, T. H. ve Hiermaier, S., 2022, Bio-based/green sandwich structures: A review, *Thin-Walled Structures*, 177, 109426.
- Onat, A., 2015, Kompozit malzemeler ders notu, *Sakarya Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü Metalurji Programı*.
- Önder, A. ve Robinson, M., 2020, Investigating the feasibility of a new testing method for GFRP/polymer foam sandwich composites used in railway passenger vehicles, *Composite structures*, 233, 111576.
- Özen, U., 2018, Kompozit sandvic panel üretimi ve üretilen panellerin hasar kriterlerine göre karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ*.
- Pappadà, S., Rametta, R., Passaro, A., Lanzilotto, L. ve Maffezzoli, A., 2010, Processing, mechanical properties, and interfacial bonding of a thermoplastic core-foam/composite-skin sandwich panel, *Advances in Polymer Technology*, 29 (3), 137-145.
- Potoğlu, U., 2012, Sandviç kompozit plakların darbe davranışları, *DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Quagliarini, E., Monni, F., Lenci, S. ve Bondioli, F., 2012, Tensile characterization of basalt fiber rods and ropes: A first contribution, *Construction and Building Materials*, 34, 372-380.
- Rosato, D. V., 1997, Designing with reinforced composites: technology, performance, economics, *(No Title)*.
- Saçak, M., 2002, İletken polimerler, *Polimer Kimyası, Ankara Üniversitesi, Gazi Kitabevi, Ankara*.
- Sahin, Y., 2000, Kompozit malzemelere giris, *Gazi Kitabevi, Ankara*, 67-69.
- Sampathkumar, D., Mohankumar, A., Teekaraman, Y., Kuppusamy, R. ve Radhakrishnan, A., 2023, Bioinspired Sandwich Structure in Composite Panels, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2023.
- Sfarra, S., Ibarra-Castanedo, C., Santulli, C., Paoletti, A., Paoletti, D., Sarasini, F., Bendada, A. ve Maldague, X., 2013, Falling weight impacted glass and basalt fibre woven composites inspected using non-destructive techniques, *Composites Part B: Engineering*, 45 (1), 601-608.
- Şahin, M. C., 2023, Al tel takviyeli tabakalı kompozitin düşük hızlı darbe davranışı, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Taraghi, I. ve Fereidoon, A., 2016, Non-destructive evaluation of damage modes in nanocomposite foam-core sandwich panel subjected to low-velocity impact, *Composites Part B: Engineering*, 103, 51-59.
- Yan, J., Wang, G., Ma, Y., Guo, Z., Ren, H., Zhang, L., Li, Q. ve Yan, J. D., 2019, Electrical and thermal performance of different core materials applied in wind turbine blades under lightning strikes, *Wind Energy*, 22 (11), 1603-1621.
- Yao, S., Hu, D., Xi, Z., Liu, T., Xu, Z. ve Zhao, L., 2020, Effect of crystallization on tensile mechanical properties of PET foam: Experiment and model prediction, *Polymer Testing*, 90, 106649.
- Yılmazoğlu, Ü., 2004, Kompozit Malzemelerin Elasto-PlastiN Davranışlarının İncelenmesi, *Bitirme Projesi*.

Yöney, H., 2007, El Yatırma Yöntemi ile Elyaf Takviyeli Kompozit Yapıların Üretilmesi ve Özellikleri, *Marmara Üniversitesi (Turkey)*.

