SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİT ESASLI ÇOK KATMANLI PİRAMİT KAFES ÇEKİRDEKLİ ÇOK HAFİF SANDVİÇ PLAKALARIN STATİK ve DİNAMİK İNCELEMESİ

Ece SEVİNÇ

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİT ESASLI ÇOK KATMANLI PİRAMİT KAFES ÇEKİRDEKLİ ÇOK HAFİF SANDVİÇ PLAKALARIN STATİK ve DİNAMİK İNCELEMESİ

Ece SEVİNÇ
ORCID No: 0000-0002-9206-0929

Prof. Dr. Murat YAZICI

(Danışman)
ORCID No: 0000-0002-8720-7594

YÜKSEK LİSANS
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

TEZ ONAYI

Ece SEVİNÇ tarafından hazırlanan " Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Esaslı Çok Katmanlı Piramit Kafes Çekirdekli Çok Hafif Sandviç Plakaların Statik Ve Dinamik İncelenmesi " adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Murat YAZICI
ORCID No: 0000-0002-8720-7594

Başkan : Prof. Dr. Murat YAZICI — İmza
ORCID No: 0000-0002-8720-7594
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Dr.Öğr. Üyesi Erol SOLMAZ — İmza
ORCID No: 0000-0001-9369-3552
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Dr.Öğr. Üyesi Yalçın BOZTOPRAK — İmza
ORCID No: 0000-0003-1714-7394
Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü
../../....

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

18/09/2019

Ece SEVİNÇ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİT ESASLI ÇOK KATMANLI PİRAMİT KAFES ÇEKİRDEKLİ ÇOK HAFİF SANDVİÇ PLAKALARIN STATİK ve DİNAMİK İNCELEMESİ

Ece SEVİNÇ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat YAZICI

Kompozit malzemelerin mukavemet /ağırlık oranlarının artması sonucu kullanım alanları gittikçe çoğalmaktadır. Bu amaçla karbon elyaf takviyeli plastik kompozit malzemeler üretilmeye başlanmış ve zamanla kullanım alanları yaygınlaşmıştır. Bu çalışmada, termoplastik (PP) matrisli karbon elyaf takviyeli filamentlerin kalıp içerisinde ısı etkisi altında birbirleriyle kaynaması suretiyle piramit kafes yapılar oluşturulmuştur. Bu kafes yapıları oluşturacak 2 adet kalıp tasarlanıp üretilmiştir. Üretilen kafes yapı nihai ürün olan sandviç yapının çekirdeğini oluşturmaktadır. Sandviç yapının üst ve alt plakaları da karbon fiber takviyelidir ve çekirdek kısım alt ve üst plakalara ısı etkisiyle iki yapının birbirine kaynaması sonucu birleştirilmiştir. Oluşturulan sandviç yapılar 3 nokta dinamik ve statik testlere tabi tutularak, sonuçlar değerlendirilmiştir

Anahtar Kelimeler: Karbon Fiber, Kafes Yapı, Termoplastik Kompozit, Sandviç Yapı
2019, ix + 59 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

STATIC AND DYNAMIC INVESTIGATION OF MULTI LAYERED PYRAMID LATTICE CORE WHICH CONSTITUTES CONTINUOUS CARBON FIBER REINFORCED THERMOPLASTIC BASED ULTRA LIGHT SANDWICH STRUCTURES

Ece SEVINC

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat YAZICI

As the strength / weight ratios of the composite materials increase, their usage areas are gradually increasing. For this purpose, carbon fiber reinforced plastic composite materials started to be produced and their usage areas became widespread in time. In this study, two die is designed and produced to form pyramid lattice structures by the method of joining carbon fiber reinforced thermoplastic (PP) filaments with each other under the heat effect. The produced lattice structure forms the core of the sandwich structure. The top and bottom plates of the sandwich structure are also carbon fiber reinforced and they are bonded to lattice core under heat effect The sandwich structures were subjected to 3 point dynamic and static tests and the results were evaluated..

Key words: Carbon Fiber , Lattice Core ,Thermoplastic Composite ,Sandwich Structure
2019, ix + 59 pages

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim süresince beni yetiştiren ve yönlendiren, tez çalışmamın hazırlanması aşamasında bana her konuda yardımcı olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Murat YAZICI'ya teşekkür ederim.

Parçaların üretimi esnasında benimle birlikte büyük bir özveriyle çalışan ve gerçek manada ter döken arkadaşım Musa EL KHODOR'a teşekkür ederim.

Test düzeneklerinin hazırlanması ve analiz aşamalarında her türlü desteği esirgemeyen araştırma görevlisi Harun GÜÇLÜ'ye teşekkür ederim.

Bölümümüzün yüksek lisans öğrencilerinden Aslıhan HAYIRKUŞ'a teşekkür ederim.
Kalıpların üretilmesi konusunda her türlü desteği veren Kametsan proje müdürü Selçuk BESEN'e ve Uludağ Üniversitesi öğretim üyesi Dr. Yücel CAN'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen AİLEME çok teşekkür ederim.

Ece SEVİNÇ
18/09/2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ v
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
ÇİZELGELER DİZİNİ viii
1. GİRİŞ…….. 1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI 2
2.1 Kuramsal Temeller 2
2.1.1. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler 4
2.1.2. Lif Takviyeli Kompozit Malzemeler 5
2.1.3. Matris Malzemeler 8
2.1.4. Kompozit Malzeme Üretim Teknikleri 12
2.1.5 Sandviç Yapılar 17
2.2. Kaynak Araştırması 17
3. MATERYAL VE YÖNTEM 26
3.1 Materyal 26
3.2 Yöntem 27
3.2.1 Karbon fiber bazlı termoplastik plaka yapısı ve üretimi 27
3.2.2 Termoplastik karbon fiber yapısı ve üretimi 27
3.2.3 Sandviç panellerin tasarım ve imalat süreci 29
3.2.4 Uygulanan testler ve özellikleri 37
4. BULGULAR 42
4.1 Hücresel Bazda Yapılan Testler 42
4.2 Sandviç Plakalarda Gerçekleştirilen Statik Üç Nokta Eğilme Testleri 45
4.3. Sayısal Analiz Bulguları 47
4.4 Kafes Yapılı Çekirdeğe Sahip Sandviç Malzemelerin Deformasyon Sonrası Toparlanma Davranışı 52
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 55
KAYNAKLAR 58
ÖZGEÇMİŞ 60

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
Af	Liflerin toplam kesit alanı
Am	Matrisin toplam kesit alanı
Vf	Fiberin toplam hacmi
Vm	Matrisin toplam hacmi
σa	Akma dayanımı
σb	Basma dayanımı

Kısaltmalar	**Açıklama**
BMC	Hacimli kalıp bileşeni
CFRC	Karbon fiber takviyeli panel
LTSP	Kafes yapılı sandviç panel
PVC	Poli Vinil Klorür
PET	Polietilen Tereftalat
PMC	Polimerik matrisli kompozitler
SMC	Tabaka kalıp bileşeni

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Kompozit malzemeden alınan kesitin şematik görünümü 3
Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması 4
Şekil 2.3. Elyaf ve reçine kullanılarak kompozit malzemelerin üretimi 6
Şekil 2.4. Elyafların yerleştirilme yönleri 8
Şekil 2.5. El yatırma prosesi üretim şeması 13
Şekil 2.6. Püskürtme üretim metodunun şeması 13
Şekil 2.7. Profil çekme üretim metodunun şeması 14
Şekil 2.8. Elyaf sarma yöntemi üretim şeması 15
Şekil 2.9. Baskı kalıplama prosesi üretim şeması 16
Şekil 2.10. Sandviç yapı görüntüsü 17
Şekil 2.11.Piramidal çekirdek yapının iki farklı üretim basamakları 18
Şekil 2.12. Piramit çekirdek geometrisinin kritik parametreleri 19
Şekil 2.13. Kalıp modeli, panelin görüntüsü ve hücrenin geometri parametreleri 20
Şekil 2.14. İki farklı yapıda piramidimsi çekirdeğin lazerle kesimi 21
Şekil 2.15. Aluminyum destekli piramidal çekirdek yapının üretim şeması 21
Şekil 2.16. Geleneksel 3D yazma (a) ve serbest asılı 3D yazma yöntemleri (b) 22
Şekil 2.17. Deformasyon mekanizması ve uygun parça üretimi için rota değiştirilmesinin şematik olarak gösterimi 23
Şekil 2.18. Oluk kirişli kafes yapılı kompozit sandviç panellerin üretim basamakları şeması 24
Şekil 2.19 Otomobil kaputunun piramidal kafes geometrili sandviç yapıda üretim şeması 25
Şekil 3.1. Plaka oluşumu için hazırlanmış kompozit şeritler 27
Şekil 3.2. Termoplastik karbon fiber filament yapının kalıptan çıkışı 28
Şekil 3.3. Termoplastik karbon fiber malzemenin şekli ve ölçüleri 28
Şekil 3.4. Karbon fiber yapının makaralara sarılmış kullanıma hazır hali 28
Şekil 3.5. Piramit kafes geometrisinin 3D tasarım programındaki görünümü 29
Şekil 3.6. Montaj kalıbının 3D tasarım görünümü ve filamentlerin temas bölgelerinin numaralandırılmış olarak gösterilmesi 30
Şekil 3.7. Filamentin ilk kalıpta şekil almadan önceki ve aldıktan sonraki durumu 31
Şekil 3.8. Ön şekil verme kalıbının 3D tasarım olarak görüntüsü 31
Şekil 3.9. Filamentlerin basılmadan önce gergin bir pozisyonda dizilmiş halde görüntüsü 32
Şekil 3.10. Teflon kaplı cam kumaş arasına dizilmiş filamentlerden bir görünüm 32
Şekil 3.11. Filamentlerin teflon cam kumaş arasında basılarak aldıkları görünüm 33
Şekil 3.12. Piramit kafes yapının otomasyon vasıtasıyla gergin halde tutulan tabanının şematik olarak gösterimi 34
Şekil 3.13. Manuel şartlarda üretilen piramit kafes yapının görüntüsü 35
Şekil 3.14. Üretilen piramit tabakaların üstten görünüşü 35
Şekil 3.15. a) Taban tabana ve b) uç uca ekleme metoduyla üretilen kafes yapıların görüntüsü 36
Şekil 3.16. a) Uc uca , b) taban tabana ekleme metoduyla üretilmiş sandviç plakalar 36
Şekil 3.17. Bası kuvveti uygulamasında sünek numunedeki fiçı şekli oluşumu 38
Şekil 3.18. Metal özellikli bir malzemenin bası ve çekme diyagramları 38
Şekil 3.19. Gerilme-birim uzama eğrisinin altındaki alan malzemenin tokluğunu verir 40
Şekil 3.20. Dinamik üç nokta eğilme düzeneği 40

Şekil 3.21. Yüksek hızlı darbe testinde numunenin duvara sabitlenmiş görüntüsü.....41
Şekil 4.1. Test için üretilen numunelerin üstten görünüşü.....42
Şekil 4.2. Zwick Roell Z010 Basma testi makinesi ve teste hazır numunenin çeneler arasındaki görüntüsü 42
Şekil 4.3. Basma testi sonrasında numunelerin görüntüsü.....43
Şekil 4.4. Basma numunelerinin kuvvet-deformasyon eğrileri.....44
Şekil 4.5. 17 mm ve 25 mm sütun boyuna sahip birim hücrelerin bası testine tabi tutulmaları sonucu elde edilen değerler 44
Şekil 4.6. Numune 1 yüksek hızlı darbe deneyi grafiği 45
Şekil 4.7. Numune 2 yüksek hızlı darbe deneyi grafiği 45
Şekil 4.8. Üç nokta eğilme test düzeneğinin görünümü.....46
Şekil 4.9. Taban tabana yapıştırılan numunelerin kuvvet deplasman grafikleri 46
Şekil 4.10. Uç uca yapıştırılan numunelerin kuvvet deplasman grafikleri 47
Şekil 4.11. Tek katlı hücre yapısında gerçekleştirilen basma analizinin görüntüsü 47
Şekil 4.12. Çift katlı ve uç uca ekli hücre yapısında basma analizi görüntüsü 48
Şekil 4.13. Çift katlı ve taban tabana hücre yapısında basma analizi görüntüsü 48
Şekil 4.14. Basma analizlerinin kuvvet- deplasman grafikleri 48
Şekil 4.15. Analizde kullanılan üç nokta eğilme düzeneği tasarımı 49
Şekil 4.16. Malzeme değerleri ve çözüm adımı parametreleri.....50
Şekil 4.17. Analizde kullanılan mesh eleman çeşidi ve sayıları 50
Şekil 4.18. Yukarıdan aşağıya sırasıyla; taban tabana, uc uca eklenmiş ve tek katlı çekirdek yapıların analizinden elde edilen deformasyon görüntüleri 51
Şekil 4.19. Üç nokta eğilme analizlerinin kuvvet-deplasman grafikleri.....51
Şekil 4.20. Numunelerin test esnasındaki deformasyon görüntüleri.....53
Şekil 4.21. Testten 14 gün sonra çekilen kalıcı deformasyon görüntüleri 53
Şekil 5.1 İlk şekil verme kalıbının yerine önerilen kademeli şekil verme prosesinin 3D tasarım görüntüsü.....56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Bazı liflerin çekme dayanımı ve çekme modülleri 8
Çizelge 2.2. Tipik dolgusuz termoset reçimelerin fiziksel özellikleri 9
Çizelge 2.3. Tipik katıksız termoplastik reçinelerin özellikleri 11
Çizelge 4.1. Statik Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları 46
Çizelge 4.2. Numunelerin kalıcı deformasyon miktarları 54

1. GİRİŞ

Birden fazla malzemenin gereken özelliklerini tek bir malzemede toplamak veya yeni bir özellik elde etmek maksadıyla makro düzeyde bir araya getirilmesi neticesinde oluşan malzemeler kompozit malzeme olarak adlandırılırlar. Havacılık ve otomotiv sanayisinde yüksek performansa sahip ürünlerin tasarlanmasına dolayısıyla hem hafif hem de mukavim parçalara duyulan ihtiyacın artması sebebiyle kompozit malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar günden güne artmaktadır. Kompozitler ağırlıklarına göre son derece rijit ve mukavim olmalarının yanında korozyon dirençleri ve yorulma dirençleri de klasik malzemelere oranla yüksektir. Hafiflik, kolay onarılabilme, yüksek ısıl ve kimyasal direnç gibi özellikleri günümüzde otomotiv ve havacılık sanayisinde kompozitlerin tercih edilmesindeki en önemli etmenlerdir. Fakat kompozit materyallerin avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Çeliklerle kıyaslandıklarında kompozit malzemelerin daha gevrek olmaları sebebiyle, meydana gelen hasarlar plastik şekil değişimiyle sonuçlanmaz. Bu nedenle kompozit sistemlerde ani hasarlar (kopma,kırılma) oluşabilmektedir. Birçok çelik türü, sünek yapılarından dolayı, dinamik çalışma şartlarında plastik şekil değişimine uğrayabilirler. Ayrıca kompozit sistemlerin, gerilme yığılmalarında çeliklere göre daha farklı davranış sergiledikleri görülmektedir. Bunun en önemli nedeni kompozit malzemelerin anizotropik (homojen olmayan) ve gevrek yapılarıdır. Kompozit yapıların tasarımı, yukarıda sayılan kendilerine has özelliklerinden dolayı, çelik yapıların tasarımına kıyasla daha karmaşık ve ayrıntılı bir çalışma gerektirmektedir.

Oluşturduğumuz yeni üretim tekniğiyle birlikte, karbon elyaf takviyeli termoplastik esaslı filamentlerden (CFRP) sandviç yapıların oluşturulmasını sağlayacak bir çeşit seri üretim yönteminin ilk adımları atılmıştır. Sürekli karbon elyaf takviyeli termoplastik esaslı filamentlerden piramit geometrili kafes yapı oluşturacak şekilde kalıplar üretilmiş, üretilen sandviç panellerin statik ve dinamik yük altındaki mukavemeti incelenmiştir. Bulgular kısmında ise statik ve dinamik testlerin sonucunda elde edilen veriler grafikler vasıtasıyla ortaya konmuştur. Tartışma ve sonuç kısmında ortaya konan sonuçların bir sonraki çalışmaya örnek teşkil edeceği düşünülmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

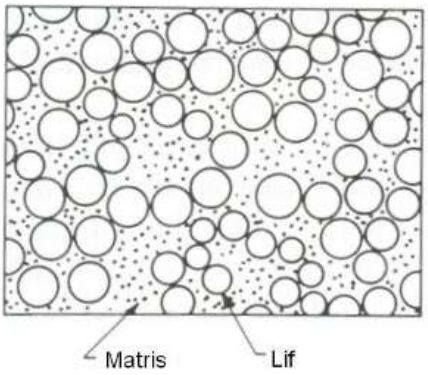
2.1 Kuramsal Temeller

Makro yapıda olup bir araya getirildiklerinde çözünemeyen iki ya da daha fazla malzemeden oluşan yeni yapıdaki malzemelere kompozit malzeme denir. Kompozit malzemeler en az iki ana bileşenden oluşur. Katkı malzemelerini bir arada tutan ana malzeme "Matris" ve mekanik ve fiziksel özellikleri iyileştirici katkı malzemeleri ise "Takviye" olarak isimlendirilmektedir. Matris malzemeleri metaller, seramikler, karbon ve polimerler olmak üzere dört sınıfa ayırılır. Bu dört grup Matris malzemesinden birinin fiberle takviye edilmesiyle birlikte fiber takviyeli kompozit malzemeler elde edilirler. Kompozit yapı içerisinde matris üç temel görevi yerine getirmektedir. Bunlar; yükü elyafa dağıtmak, elyafların bir arada kalmalarını sağlamak ve elyafı çevresel faktörlerden muhafaza etmektir. Takviye malzeme olarak sürekli olan fiberler haricinde süreksiz partikül ve pul şeklinde takviyeler de kullanılmaktadır.
Mühendislik uygulamalarında, çok farklı darbe yüklerine maruz kalabilmektedirler. Darbeye nasıl bir tepki oluşacağını malzemenin karakteristik özellikleri belirler. Örneğin çelikler darbeye maruz kaldıklarında, elastik uzama veya plastik deformasyona uğrayarak reaksiyon verirler. Çelikler, plastik şekil değiştirebilme özellikleri sayesinde, önemli ölçüde enerjiyi bünyelerinde absorbe etmektedirler. Kompozit malzemelerde hasar, yüklemenin türü ile bağlantılı olarak yüzeyde oluşabilir veya iç yapıda tabakalar arasında ayrılma şeklinde başlayabilir. Polimer matrisli kompozitler, enerjiyi elastik deformasyon veya elyaf kopması, delaminasyon gibi hasar mekanizmaları sayesinde emebilirler.

Yeni oluşturulan kompozit bir malzemenin özellikleri, bileşenlerinin hacimsel oranında oluşabilir yada bileşenler birbirleriyle bir şekilde etkileşime girer ki böyle bir durumda ortaya çıkan yeni özellikler, bileşenlerin özelliklerinin hacimsel oranlarının toplamıyla kolayca hesaplanamaz. Bu sebeple bir kompozit malzemeyi sistem olarak tanımlarken, bileşenleri ve özelliklerini belirtmenin yanında, takviye geometrisini de parametre

olarak belirtmek gerekir. Takviyenin geometrisi, şekil, boyut, boyut dağılımı ile tanımlanabilir.

Konsantrasyon, ekseriyetle hacimsel veya kütlesel oranla ölçülür. Temelde lif ve matris fazlarının hacim veya kütle oranlarını hesaplamak mümkündür.



Şekil 2.1. Kompozit malzemeden alınan kesitin şematik görünümü (Agarwal 1980)

Af: liflerin toplam kesit alanı

Am: matrisin toplam kesit alanı

Ac = Af+ Am olduğundan,

vf= Af/ Ac

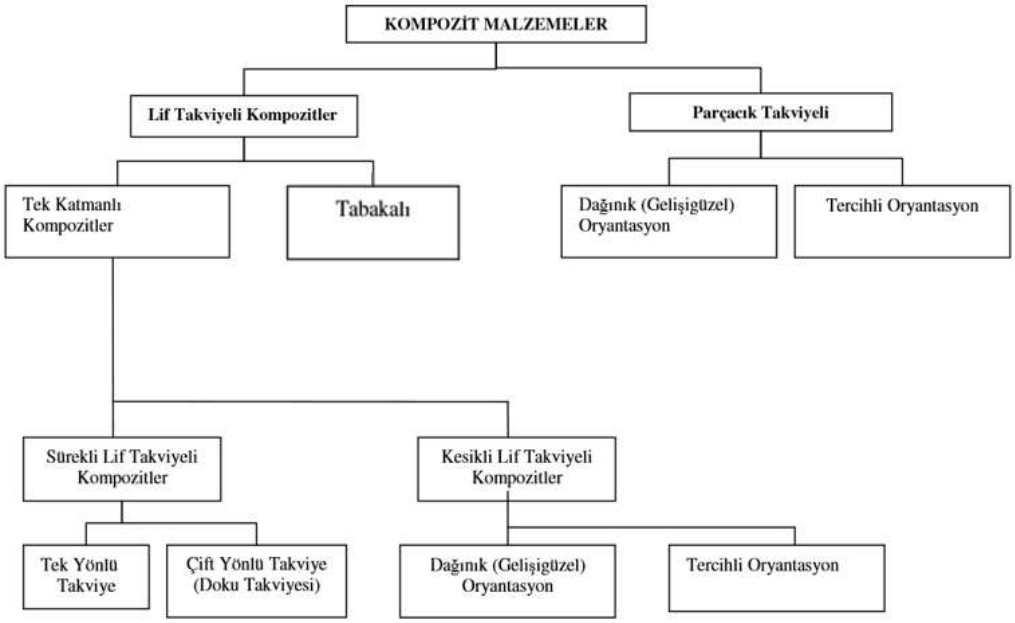
vm = Am /Ac

Bir bileşenin yeni oluşturulacak kompozit malzemenin özelliklerine olan etkisi, bu formülle belirlenebilir.

Ayrıca homojenlik de bir hacimdeki fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesinde önemli bir etmendir. Homojen olmayan bir sistemden kaçınılmalıdır. Örneğin homojen olmayan bir malzemede mikro düzeydeki hasarlar en düşük dayanımın olduğu kısımlarda başlamaktadır, bu durum malzemenin toplam dayanımını zafiyete uğratır. (Mallick 1988).

Kompozit yapıların mukavemet mekanizması, takviye fazının geometrisine sıkı sıkıya bağlıdır. Bu sebeple kompozit malzemeleri, takviyelerinin geometrisini göz önünde bulundurarak tasnif etmek gerekir. Bu şekilde yapılan sınıflandırma Şekil 2.2 de gösterilmiştir.

Takviyenin yönlenme biçimi sistemin izotropisine etki etmektedir. Takviyeler parçacık şeklinde olduğunda, malzeme özelliklerinin yönden bağımsız ve her yönde yaklaşık olarak aynı olduğunu düşünebiliriz. Takviye parçacıkları gelişi güzel yönlendirildiklerinde kısa lif takviyeli kompozitler de izotropik davranabilmektedirler.



Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Agarwal 1980)

2.1.1. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

Parçacık takviyeli kompozitlerde takviye elemanları, genelde uzun boyutlara sahip olmazlar. Takviye malzemesinin boyutları, mekanik özelliklerde önemli bir rol oynar. Örneğin uzun boyutlara sahip takviye elemanları, oluşan dislokasyonların ilerlemesini engeller. Bu sebeple elyaflar, matrisin kırılma dayanımını geliştirmek için etkili elemanlardır. Parçacıklar kırılma dayanımını artırma etkisini gösteremezler. Bununla beraber lastik türünden parçacıklar, gevrek matrislerde kırılma dayanımını artırmak amacıyla kullanılabilirler. Parçacıklar matrise kıyasla doğalarında var olan sertlik nedeniyle, matrisin plastik şekil değişiminde bazı kısıtlamaları beraberinde getirir. Parçacıklar da yükü paylaşırlar fakat elyafların yükleme eksenine paralel olarak yerleştirildiği kompozitlere kıyasla bu çok düşük seviyede gerçekleşmektedir. Bu nedenle parçacıklar kompozit malzemelerin sertliğini arttırmada oldukça etkiliyken,

mukavemeti arttırmada bu kadar güçlü bir etkileri bulunmamaktadır. Parçacık dolgular, her ne kadar ısı ve elektrik iletkenliğini değiştirmek, sıcaklık performansını geliştirmek, yüzey sertliğini artırmak ve çekmeyi en aza indirgemek maksadıyla kullanılabilse de, çoğunlukla maliyeti azaltmak için tercih sebebidirler. Parçacık dolgulu malzemelerde mekanik performansı etkileyen çok değişik öğeler vardır. Bunların içinde, parçacık boyutları, yapışmayı etkilemesi sebebiyle yüzey enerjileri, hacimsel oranlar, parçacıkların homojen dağılıp dağılmadıkları, eksen uzunluklarının birbirine oranı kompozit özelliklerini etkiler.

2.1.2. Lif Takviyeli Kompozit Malzemeler

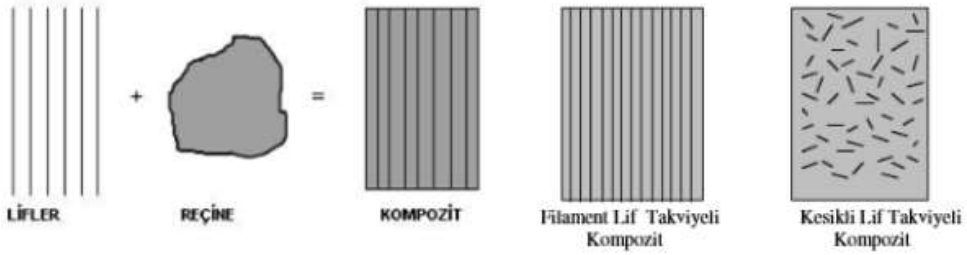
Kompozit malzemelerin en yaygın türü elyaf takviyeli kompozitlerdir. Elyaf takviyeli kompozitlerde takviye malzemesi olarak ilk sırayı cam alır. Matris malzeme olarak plastik reçineler en sık kullanılan tür olup bunlardan da polyester ucuzluğu sebebiyle ilk sırada yer almaktadır. Epoksi reçine ise yüksek mukavemet ve kimyasal dayanım sebebiyle uzay, havacılık ve ev aletleri yapımına kadar kendisine çok geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

Lif takviyeli kompozit malzemeler takviye elemanlarının şekillerine göre aşağıdaki gibi tasnif edilirler.

a.Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler

b.Süreksiz(kesikli) elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Elyaflar, uzun filament, dokuma kumaş, kısa kesilmiş elyaf ve hasır gibi değişik şekillerde olabilirler. Kompozitlerde yükü büyük oranda lifler taşır. Kompozit malzemenin mukavemeti elyaf yerleşim ekseni doğrultusunda maksimum değere ulaşmaktadır. Yükleme doğrultusunda yapılan sürekli elyaf takviyesi, matris malzemenin özelliklerini oldukça aşan özellikler ile sonuçlanmaktadır. Aynı elyaf kısa ve süreksiz hale getirildiğinde kompozit önceki duruma göre daha düşük mukavemet sergiler.



Şekil 2.3. Elyaf ve reçine kullanılarak kompozit malzemelerin üretimi (Mazumdar 2002)

Polimerik matrisli kompozitler (PMC), birçok mühendislik uygulamasında tercih edilmektedir. Özgül ağırlık, darbe sönümleme kabiliyetleri ve aşınma dayanımı gibi etmenler, bu malzemeleri ekseriyetle havacılık endüstrisi, inşaat mühendisliği, otomobil sanayisi için oldukça cazip kılmaktadır. Uygulamaların birçoğunda parçalar dinamik yükleme koşullarına maruz kalmaktadır. Uçak sanayisinde; kanatlar, türbin bıçakları gibi güvenlikle ilgili uçak yapılarında bu malzemeler tercih edilmektedir.

Sıklıkla kullanılan takviye elemanlarından bazıları şunlardır;

• Sürekli karbon elyaf kablosu, cam elyaf fitili, aramid iplik

• Kesikli elyaf

• Dokuma kumaş

•Üç boyutlu kumaş

•Dokuma veya örme yapıda üç boyutlu ön şekillendirme yapılmış parçalardır.

En fazla kullanılan takviye elemanları aramid, bor, karbon ve cam elyaflarıdır. Tipik elyaf çapları 5 μm ile 20 μm arasında değişmektedir.

Cam Elyaf

Cam elyaflı polimer, kompozit sistemlerde geniş kullanım alanına sahiptir. Günümüzde termoset reçinelerle birlikte kullanılan takviye fazının yarısından fazlası cam elyafıdır. Cam elyafın temel maddesi silikadır. Elyaf içinde SiO_2 şeklinde bulunur.

Düşük maliyetli oluşu, yüksek gerilim mukavemeti, yüksek kimyasal direnci ve üstün yalıtma özellikleri cam elyafların önde gelen avantajlarıdır. Düşük elastisite modülü, yüksek yoğunluğu, kullanım sırasında aşınmaya duyarlı olması, düşük yorulma direnci ve sertlikleri dezavantajları arasındadır. (Philips 1989).

Cam elyaf, aramid ve karbon liflere oranla daha düşük maliyetlidirler. En çok kullanılan türleri E-cam, S-cam ve S2-camdır. Cam lifleri, camın yapısında yer alan üç boyutlu ağlardan dolayı diğer takviye elyaflarından farklı olarak izotropik yapıya sahiptir.
Cam lifleri kayık, yarış botları, helikopter kanatları, otomobil panelleri ve sıvı tanklarının üretiminde yaygın bir şekilde kullanılır.

Karbon Elyaf

Karbon elyafları çeliklere göre oldukça düşük yoğunluktadır. Genellikle epoksi reçineleri ve polyester matrisin içinde takviye olarak kullanılır. Yapısal özellikleri nedeniyle bu alanda diğer takviye liflerine oranla daha çok öne çıkarlar. Karbon elyaf, içerisinde en az %92 karbon içeren bir yapıya sahiptir Karbon elyaflarının ağırlıklarına oranla mukavemet ve elastikiyet modülleri çok yüksektir. Sıcaklığa maruz kaldığında boyutsal kararlılık, yüksek yorulma dayanımı, yüksek erime noktası avantajları arasında yer almaktadır. Fakat ani darbeye karşı duyarlıdırlar. Karbon elyaf takviyeleri uzay ve havacılık sektöründe, roket ve uydu yapımında kullanılırlar.

Aramid Elyaf

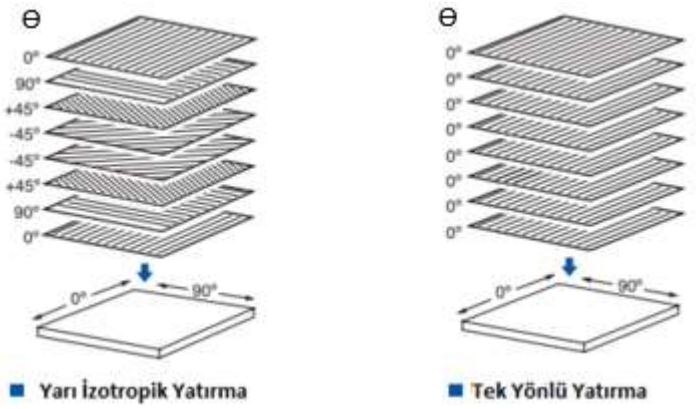
Aramidlere benzen halkaları içeren aromatik poliamidler de denilir. Aromatik yapıları zincirin rijitliğini artırdığı için kolayca erimezler, erime sıcaklıkları 500 C'nin üzerindedir. Amerikan Dupont firmasının geliştirerek piyasaya sürdüğü Kevlar elyafları bugün en çok kullanılan çeşididir. Aşınmaya karşı yüksek direnci olan aramid lifleri bugün uçak sanayisinde, yüksek performanslı kayış ve halat üretiminde, yüksek basınca maruz kalan boruların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Çizelge 2.1. Bazı liflerin çekme dayanımı ve çekme modülleri (Ersoy 2005)

Lif Yapısı	Çekme Modülü GPa (10^6 psi)	Çekme Dayanımı MPa (10^3 psi)
Karbon Lifi	325-440	2000-3500
Aramid Lifi	60	3000-3600
E-cam	70	2400
S-cam	85	3450
Aluminyum	72	130-180

Tabakalı Kompozitler

Matris ve fiberlerin birleştirilmesiyle oluşturulan tabakaların farklı sayılarda üst üste dizilmesiyle tabakalı kompozit malzemeler elde edilir. Tabakalı kompozitler matrisin veya fiberin cinsine veya fiberin örgü şekline göre isimlendirilir. Fiberlerin dizilme yönü (Ɵ) tabakaları oluştururken farklılık gösterebilir. Elyafların farklı yönlerlerde yerleştirilmesiyle oldukça yüksek mukavemet değerlerine ulaşılır.



Şekil 2.4. Elyafların yerleştirilme yönleri (Akbulut 2018)

2.1.3. Matris Malzemeler

Kompozit üretimi için kullanılan reçineler genellikle iki guruba ayrılır. Bunlar termoset ve termoplastik bazlı reçinelerdir. Termoset plastikler bir kez katılaştıktan sonra tekrar eritilemez ve işlenemezler. Termoplastikler ise tekrar eritilip şekil verilebilirler.

Sistemin içinde matris ve fiberin dışında, kaplama ve dolgu maddeleri gibi başka elemanlar da yer alabilir. Kaplama maddeleri elyaf yüzeyine uygulandıklarında, yüzeyin ıslanma derecesini artırır ve böylece elyaf-matris arasındaki yapışmayı geliştirir. Dolgu maddeleri ise, boyutsal kararlılığı geliştirme ve maliyeti azaltma amacıyla kullanılırlar.

A**.** Termoset Reçineler

Termoset reçineler, monomer moleküllerini, uzun ve aralarında kuvvetli kovalent bağların bulunduğu polimer molekülleri şekline dönüştüren kimyasal reaksiyon sonucunda oluşurlar. Termoset matrisler lif takviyeli kompozit yapımında daha fazla kullanılırlar. Genellikle düşük viskozitede olmaları tercih edilir. Kimyasal direnç, termal kararlılık ve düşük yoğunlukları termoset reçinelerin avantajları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, katılaşma için geçen uzun üretim zamanı ve kopma sırasındaki düşük uzama dezavantajları arasında yer alır.

Kür işlemi sırasında molekül zincirleri, çapraz bağlanma yaparlar. Bu nedenle moleküller tekrar eritilip şekil verdirilemez. Çapraz bağlanma yoğunluğu ne kadar fazla ise malzeme o kadar rijit ve ısıl kararlılığı yüksek olur. Termoset reçinelere örnek olarak polyester, epoksi ve fenolik bileşikler verilebilir.

Çizelge 2.2. Tipik dolgusuz termoset reçimelerin fiziksel özellikleri

Reçine Malzemesi	Yoğunluk (gr/cm^3)	Çekme Modülü GPa (10^6 psi)	Çekme Dayanımı MPa (10^3 psi)
Epoksi	1.2-1.4	2.5-5.0	50-110
Fenolik	1.2-1.4	2.7-4.1	35-60
Polyesyer	1.1-1.4	1.6-4.1	35-95

Epoksi reçineler, reçine çeşidine ve son kullanım yerlerine göre sıvı veya katı olarak temin edilebilir. Bu reçineler çeşitli ajanlar vasıtasıyla, 25-30 $^{\circ}$C arasında veya yüksek sıcaklıkta katılaştırılarak nihai ürün elde edilmiş olur. Epoksi reçineler üstün mekanik dayanıma, boyutsal kararlılığa, kimyasal ve ısıl dirence sahiptirler. Katılaşma esnasında çekme sorunu yaşanmaz. Birçok lif çeşidiyle iyi bağ oluştururlar.

Polyesterde bağların şekli yer değiştirilerek farklı özellikler ortaya çıkabileceği için, bunlarla ilgili genel geçer özellikler söyleyebilmek mümkün değildir. Polyester reçinelerin 100 $^{\circ}$C sıcaklığın altındaki çalışma koşullarında mekanik ve kimyasal dayanım açısından oldukça iyidir ve maliyetleri de nispeten düşüktür. Polyesterlerin sertleşmeden evvel viskoziteleri düşüktür ve cam elyafını çok iyi ıslatırlar. Bununla beraber polyester reçinenin en önemli dezavantajı ise sertleşme sırasında kendini çekme oranının (% 5-10) yüksek olmasıdır.

Fenolik reçineler bakalit olarak da bilinirler. Esas olarak fenol ile formaldehit kondenzasyon polimerizasyonuyla sentezlenen polimerlerdir. Alkalilere duyarlı olup, su ve pek çok asite karşı dayanıklıdır.

Termoset reçineleri işlemenin avantajları şunlardır;

- Elyaflar, termosetlerle kolayca ıslatılabildiğinden, daha az boşluk ve gözenek oluşur.
- Termoset kompozitlerin işlenmesinde, ısı ve basınç gereksinimi termoplastiklere kıyasla daha azdır. Bu da işletmeye enerji kazanımı sağlar.
- Termoset kompozitlerin işlenmesinde, basit ve düşük maliyetli ekipman kullanılabilir.

Termoset reçineleri işlemenin en önemli dezavantajı ise kürlenme için uzun zaman gerekmesi ve dolayısıyla termoplastiklere göre düşük üretim oranlarında üretilmeleridir.

B. Termoplastik Reçineler

Termoplastik polimer türleri çok fazla olmasına rağmen matris olarak kullanılan polimerler sınırlıdır. Termoplastikler düşük sıcaklıklarda sert halde bulunurlar ısıtıldıklarında yumuşarlar. Üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi, yüksek sertlik ve çarpma dayanımı gibi pek çok avantajı bulunmaktadır. Bu sebeple çekme ve eğilme dayanımları artırmak amacıyla

tercih edilebilirler. Devamlı kullanım sıcaklıkları 60 °C ile 245 °C arasında değişebilen reçine çeşitleri bulunmaktadır.

Termoplastikler lineer moleküllere sahiptirler. Lineer moleküllerde zinciri oluşturan ünitelerin arasında çok kuvvetli kovalent bağlar bulunmaktadır. Moleküller arasında ise sadece molekülleri bir arada tutan zayıf ve sıcaklığa karşı duyarlı elektrostatik çekme kuvvetleri vardır Dolayısıyla doğrusal molekül zincirlerinden oluşan bir termoplastiğe ısı verildiğinde moleküller arsındaki kuvvet zayıflar, molekül zincirleri tıpkı sıvı gibi serbest hale gelir. Ancak gereğinden fazla ısı verilirse molekül zincirleri kopabilir ve malzeme özelliklerinde yıpranma durumu ortaya çıkar. Termoplastikler, buharlaşma ile bileşimlerinin değişmemeleri şartıyla ile tekrar tekrar şekillendirilebilirler.

Termoplastik reçineler çoğunlukla sünektirler. Termoplastikler amorf veya yarı kristalin yapıda bulunabilirler. Amorf yapıdayken termoplastik reçinelerde moleküller gelişigüzel düzenlenmişlerdir. Kristalin bölgede ise moleküller sıkı paketlenmiş düzenli bir yapıdadır.

Termoplastikler, genellikle termosetlere göre özellikle yüksek sıcaklıklarda, düşük mukavemet gösterirler. Termosetlere kıyasla çözeltilere karşı daha kolay etkilenebilirler.

Çizelge 2.3. Tipik katıksız termoplastik reçinelerin özellikleri (Ersoy 2005)

Reçine Malzemesi	Yoğunluk (gr/cm^3)	Elastiklik Modülü GPa (10^6 psi)	Çekme Mukavemeti MPa (10^3 psi)
Naylon	1.1	1.3-1.35	55-90
PEEK	1.3-1.35	3.5-4.4	100
PPS	1.3-1.4	3.4	80
Polyester	1.3-1.4	2.1-2.8	55-60
Polikarbonat	1.2	2.1-2.8	55-70
Asetal	1.4	3.5	70
Polietilen	0.9-1.0	0.7-1.4	20-35
Teflon	2.1-2.3	---	10-35

Termoplastik reçinelerin başlangıçta katı haldedir ve son ürünün elde edilmesi için eritilmeleri gerekir.

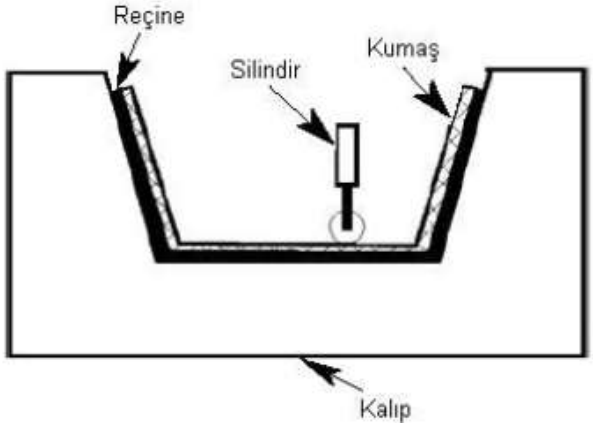
Termoplastik reçinelerin üretimdeki avantajları şunlardır;

- Proses sırasında kimyasal bir reaksiyon oluşmaması sebebiyle proses süresi çok kısadır. Bu özellikleri sayesinde, yüksek hacimli üretim metotları için kullanılabilirler. Örneğin, enjeksiyon kalıplama için proses süresi 1 dakikadan azdır.
- Termoplastik malzemeler, ısı ve basınç ile yeniden şekillendirilebilirler.
- Termoplastik malzemelerin geri dönüşümü mümkündür.

2.1.4. Kompozit Malzeme Üretim Teknikleri

A. El yatırma yöntemi

En ilkel üretim tekniğidir. Genel olarak dokuma şeklindeki lifler , hazırlanan kalıp içerisine yerleştirildikten sonra matrisi oluşturan reçine fırça gibi el aletleriyle elyaf tabakalarına emdirilir. Arzu edilen kalınlık elde edilinceye kadar bu işlem sürdürülür, böylece tabakalı kompozit yapıya sahip mamul üretilmiş olur. Bu metoda en uygun reçineler; polyester ve epoksidir. Tutuşmayı önlemek, hafiflik sağlamak, görüntüyü güzelleştirmek gibi sebeplerle reçineye değişik dolgu maddeleri eklenebilmektedir. Bu yöntemle, lif-reçine oranı %30'lara ulaşan kompozit üretimi yapılabilir, daha fazla lif-hacim oranı elde etmek için prepregler kullanılmalıdır. Prepregler, reçine emdirilmiş sürekli elyaftan oluşan ve kısmen kurutulmuş tabaka halinde kompozitlerdir ve uçak sanayisinde sıkça kullanılırlar.

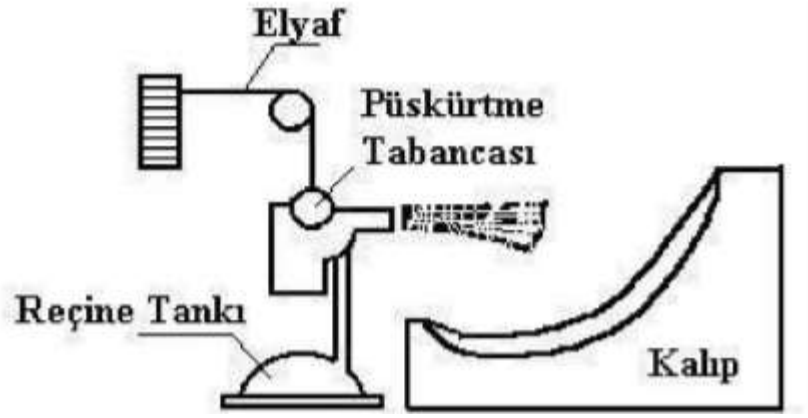


Şekil 2.5. El yatırma prosesi üretim şeması (Ersoy 2005)

El yatırma prosesinin temel sınırlaması, kalıplamada sadece bir yüzeyin olmasıdır. Boyutsal stabilitenin önemli olmadığı, düşük gerilime maruz kalacak parçalarda bu yöntemin uygulanması uygun olur. Parça kalınlığının, elyaf içeriğinin, arka yüzdeki yüzey kalitesinin kontrol edilememesi bu prosesin önemli dezavantajlarıdır.

B. Püskürtme yöntemi

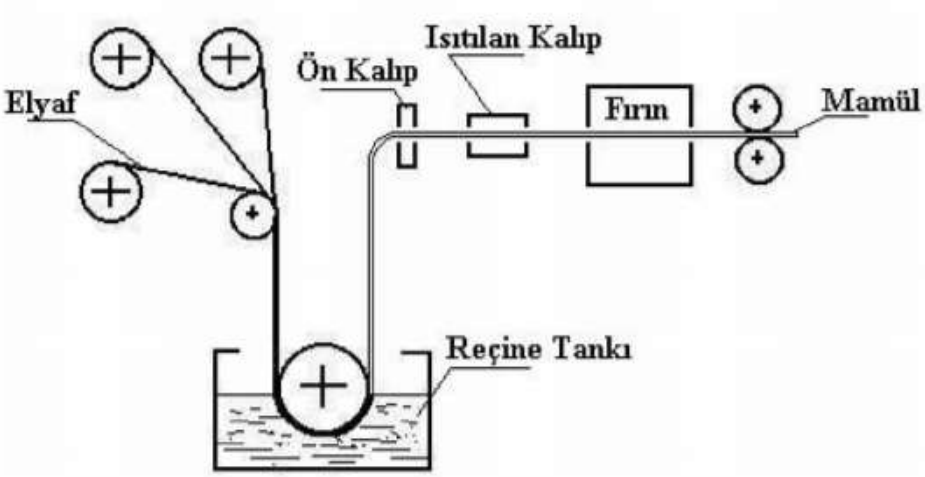
El yatırma yönteminin makinalaşmış halidir. Seri üretime daha uygun bir yöntemdir. Bir püskürtme tabancası ile kırpılmış elyaf ve reçine karışımı kalıba püskürtülerek kalıbın şeklini alması sağlanır



Şekil 2.6. Püskürtme üretim metodunun şeması (Ersoy 2005)

C. Profil çekme yöntemi

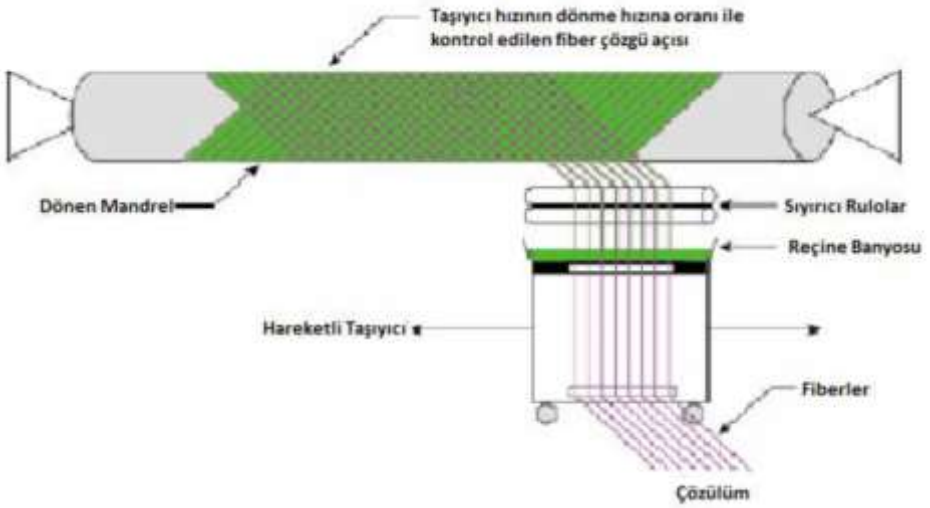
Makara etrafında reçine banyosuna daldırmak suretiyle liflerin üzerlerine reçine tatbik edilir. Bu yöntemle çubuk ve boru şeklinde mamuller elde edildiğinden, karışımın çubuk veya boru formunu alabilmesi için reçine banyosunun ardından kalıplardan çekilirler. Son olarak katılaşma işlemi için lifler bir fırının içinden geçirilir. Kapı ve pencere profilleri, kara yolları korkulukları gibi günlük hayatımızda kullandığımız gereçler bu teknikle üretilmektedir.



Şekil 2.7. Profil çekme üretim metodunun şeması (Ersoy 2005)

D. Elyaf sarma yöntemi

Bu yöntem, liflerin reçine banyosundan geçirilmesinin ardından iki punta arasında dönen ve üzerine ayırıcı tatbik edilmiş kalıp üzerine liflerin sarılmasından ibarettir. Dağıtım ünitesi ileri-geri hareket eder, mandrelse sabit bir hızla dönmektedir. Dağıtım ünitesinin ve mandrelin hızını kontrol etmek suretiyle istenen elyaf açısı elde edilir. Genel olarak; silindirik kaplar, silolar, basınçlı kaplar, güç iletim şaftları ve roket motor kasaları bu teknikle üretilmektedir. Bu metot yüksek kalite ve dayanıma sahip mamullerin üretilmesini mümkün kılar.

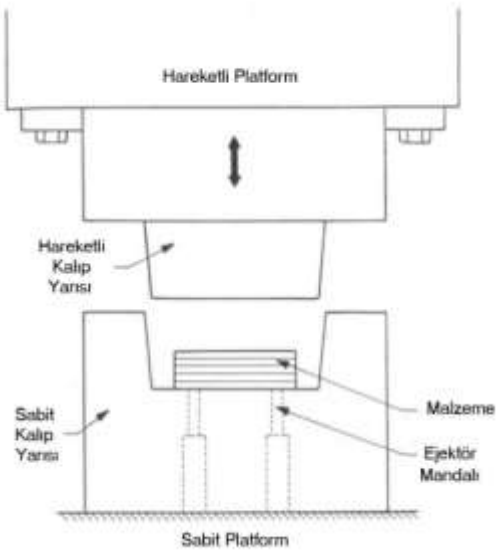


Şekil 2.8. Elyaf sarma yöntemi üretim şeması (Ataş 2018)

E. Baskı Kalıplama Prosesi

Baskı kalıplama otomotiv sanayisinde oldukça popülerdir. Bu metot kamyon gibi ağır ticari vasıtaların büyük otomobil panellerinin üretiminde kullanılır. Baskı kalıplama tekniğinde SMC (tabaka kalıp bileşeni) ve BMC (hacimli kalıp bileşeni) en çok kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemin temelinde prepreg, reçine ve basınç kullanarak yapısal panel üretimi yatmaktadır.

Baskı kalıplama, kalıp ve ekipman maliyeti düşük olan avantajlı bir yöntemdir. Ayrıca delik, flanş ve kalınlığı her yerinde eşit olmayan parçalar kalıplama esnasında üretilebilir ki bu da kaynak, delgi ve işleme gibi ikincil prosesleri elimine eder.



Şekil 2.9. Baskı kalıplama prosesi üretim şeması (Ersoy 2005)

F. Torba ile kalıplama

El yatırma ve püskürtme yöntemleri ile üretilen mamullerin yüzeylerini düzeltmek için kullanılırlar. Birbirinden çok küçük farklılıkları olan üç yöntemle üretim gerçekleştirilir.

a) Vakum torbasıyla üretim metodu

İş parçasının vakum tablasının üzerine yerleştirilmesinden sonra tablanın üstü vakum torbası ile kapatılır. Torbanın içindeki hava emilmeye başlanır. Hava tahliye oldukça vakum torbası iş parçasının üzerine yapışır ve iş parçasına basınç uygular. Böylece yüzey kalitesi daha iyi parça üretimi gerçekleşir. Vakum torbası olarak selefon veya naylon torbalar tercih edilir.

b) Otoklav üretim metodu

Vakum torbasıyla üretim tekniğinden farkı üretimin basınçlı bir metal bölmede gerçekleşmesi ve bir üst basıncın parça üzerine tatbik edilmesidir. Katılaşmanın hızlanması için basınç kabı ısıtılır veya içerisine sıcak gaz gönderilir.

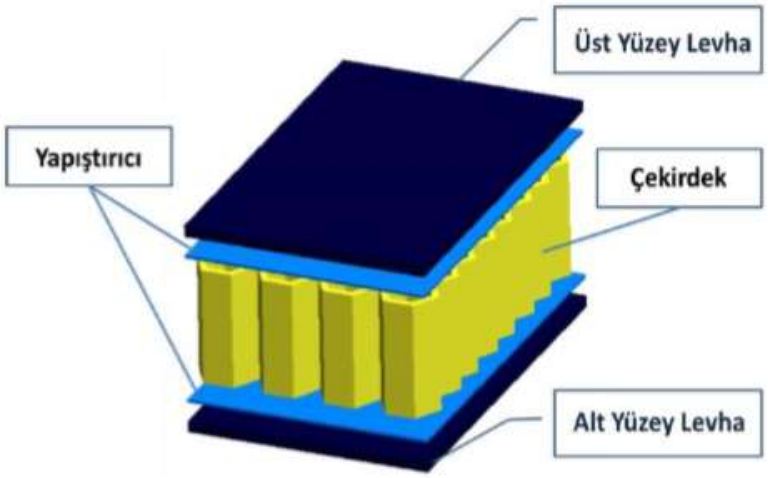
c) Basınç torbasıyla üretim metodu

Bu yöntem Vakum torbasıyla üretim yöntemine çok benzer. Vakum torbası yönteminden tek farkı torbadaki basıncın vakum olarak içeriden değil de dışarıdan verilmesidir

2.1.5 Sandviç Yapılar

İki adet ince ve rijit malzemeden istenilen boyutlarda kesilerek elde edilen alt ve üst yüzey tabaka arasına kalın ama oldukça hafif çekirdek malzemesinin yerleştirilmesiyle sandviç yapı elde edilir. Çekirdek yapı, kullanım alanına en uygun olan seçilmek suretiyle bal peteği, köpük veya kafes şeklinde olabilir. Kafes şeklindeki çekirdek yapılar genelde iki kompozit tabakanın arasında kullanılırlar. Buradaki maksat malzemenin kalınlığını artırırken aynı zamanda hafif olmasını sağlamak hem de malzeme eğilme direncini artırmaktır. Bu malzemeler, alt ve üst tabakalara kuvvet transferini güçlü yapıştırıcılar vasıtasıyla aktarırlar.

Çekirdek yapısı köpük şeklinde olan kompozitlerde ise en çok PVC köpük kullanılır. Sıcağa dayanıklı nispeten makul fiyatlıdırlar. PET köpükler ise poliüretandan üretilirler ama PVC'ye göre daha ağırdırlar.



Şekil 2.10. Sandviç yapı görüntüsü (Danacıoğlu 2013)

2.2. Kaynak Araştırması

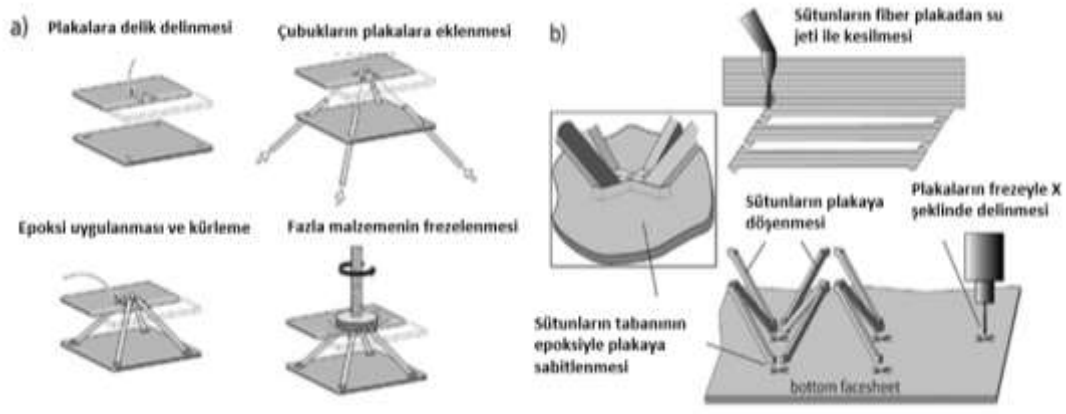
Sunulan tez çalışmasında kafes geometrili çekirdek yapıya sahip sandviç malzemeler geliştirilmiş ve performansları incelenmiştir. Kafes yapılı çekirdeğe sahip sandviçler güncel araştırma konuları arasındadır.

Finnegan ve ark. piramidal sandviç çekirdek yapısını oluşturmak için bağıl yoğunlukları %1 ile %10 arasında değişen karbon fiber takviyeli plakalardan su jetiyle parçalar kesmiş bunları birbirine kenetleme yöntemiyle birleştirmiştir. Testlerin sonucunda; yoğunluk %2' nin altında olduğunda Euler burkulması, yoğunluk %2'nin üzerinde olduğunda delaminasyon gibi hatalarla karşılaşılmıştır. Ayrıca 3 adet üretim yöntemini ve bunların test performanslarını birbiriyle karşılaştırmış fakat ilk iki yöntem (Şekil 2.11) testlerde başarısız sonuçlar vermesi sebebiyle reddedilmiştir.

İlk yöntem sırasıyla ;

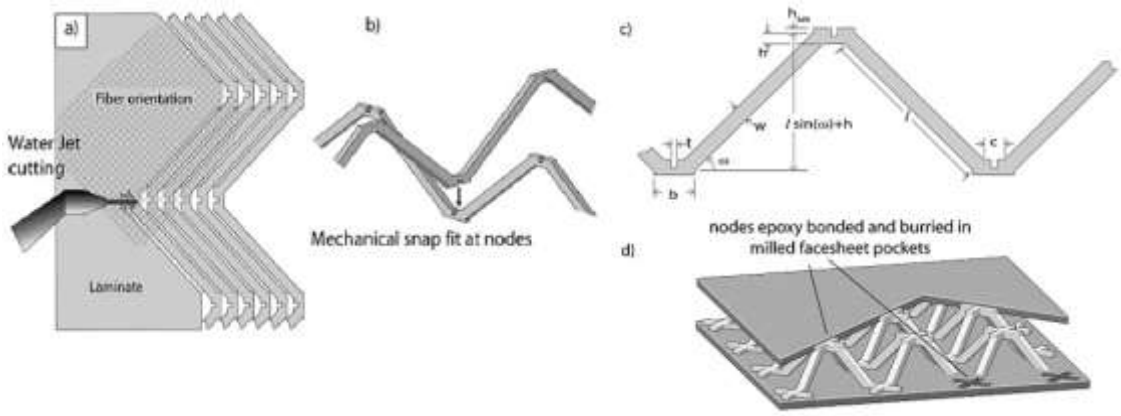
1. 0/90° ile yönlendirilmiş tabakalardan oluşan 1.5 mm kalınlığındaki karbon fiber plaka üzerinde 45 derecelik açıyla 4 adet delik delinmesi
2. Bu deliklerden, pultrüzyon yöntemiyle üretilmiş 2 mm çapındaki çubuk şeklinde karbon fiberleri geçirilmesi
3. Epoksi gibi güçlü bir yapıştırıcı ile bu çubukların plakalara sabitlenmesi ve kür işleminin gerçekleştirilmesi
4. Çubukların deliğin üstünde kalan kısmının traşlanması

Fakat bu yöntemde görülmüştür ki, epoksi yapıştırıcı fiber çubukları plaka üzerinde tutmakta başarısız olmuş ve çubuklar panelden dışarı çıkmışlardır.
İkinci yöntemde ise tek yönlü fiber plakalardan su jeti ile kesilen her bir parça, alt plaka çarpı şeklinde delindikten sonra deliğe epoksi yardımıyla yerleştirilirler. Fakat bu yöntemde ise fiberin tek yönlü olmasından dolayı kayma mekanizması kaynaklı hata oluşmuştur.



Şekil 2.11. Piramidal çekirdek yapının iki farklı üretim basamakları (Finnegan 2007)

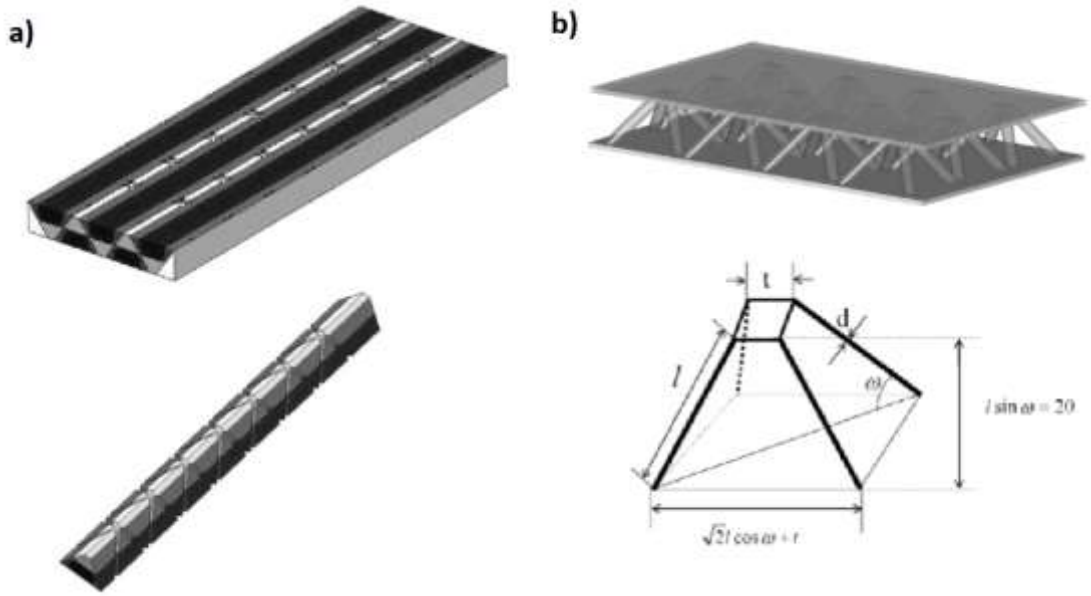
Üçüncü yöntem ise (Şekil 2.12) 0/90 derece yönlendirilmiş plakalardan su jetiyle kesilen parçaları birbirine kenetleme yöntemiyle birleştirdikten sonra yine epoksi yapıştırıcı kullanarak plaka içindeki çarpı şeklindeki deliğe yerleştirilmesi şeklindedir. Burada elde edilen bulgu piramit tabanının basma yüzeyi artırılarak ve çekirdek yoğunluğunun geometri parametreleri değiştirilerek artmasıyla birlikte mukavim bir tasarım elde edilebileceğidir.



Şekil 2.12. Piramit çekirdek geometrisinin kritik parametreleri (Finnegan 2007)

Wang ve ark. Sıcak pres yöntemiyle (Şekil 2.13) piramidal kafes yapıların üretimini gerçekleştirmiştir. Poligon şeklinde çelik plakaların kullanıldığı kalıplarda çapı kafes yapının çubuklarınınkine eşit yarı dairesel kanallar bulunmaktadır. 2 yarı dairesel kanal birleşerek 1 sütunu oluşturmaktadır. Karbon prepreg (hazır kalıplama bileşenleri) gerekli boyutlarda kesildikten sonra fiber çubuk haline dönüştürülmüş, alt ve üst plakalar fiber çubuklarla ilişkilendirilmiştir. Son olarak çubuklar kanalların içine yerleştirilmiştir.

Aynı prosesi tekrarlayarak prepreglerin her iki ucu da 4 adet plakanın içine entegre edilir. Daha sonra parça 170° 0,5 MPa basınç altında 3 saat boyunca kürlenir. Elde edilen sandviç paneller basma ve makaslama testlerine tabi tutulmuş ve görülmüştür ki, tek proseste üretim yöntemi sayesinde birleşme noktalarında kopma meydana gelmemiş sadece burkulma olmuştur.



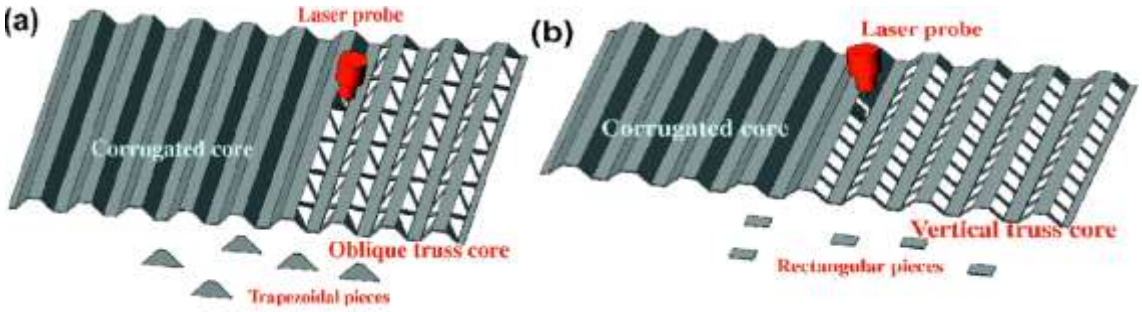
Şekil 2.13. Kalıp modeli, panelin görüntüsü ve hücrenin geometri parametreleri (Wang ve ark. 2010)

Xiong ve ark. Piramid kafes yapılı sandviç paneller üretmek için lazer kesme yöntemini kullanmışlardır (Şekil 2.14). Bu metodla aynı zamanda çok katmanlı ve dört yüzlü çekirdek yapılar oluşturabildiklerini ifade etmişlerdir. Üretim yöntemleri sırasıyla;

- 0,15 mm kalınlığında tek yönlü karbon fiber/epoksi prepreg levha önceden ısıtılmış bir kalıp içerisinde 0,5 MPa basınç ve 130 °C sıcaklıkta 1.5 saat kürlenir.

- Kalıptan çıkan dalgalı yapı daha sonra yüksek enerjili lazerle piramit şeklini alacak şekilde kesilir. Fakat bu prosesin önemli dezavantajı sıcaklıkla zarar gören kısımların çarpılmalara sebep olması ve boyutlardaki değişimin belirsizliğidir.

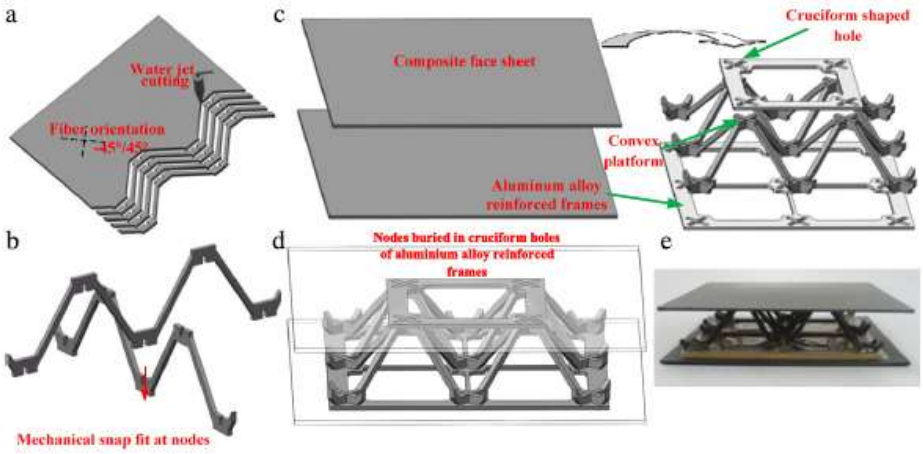
Makaslama ve basma testlerinin sonucunda delaminasyon ve sütunlarda kırılma görülmüştür. Fakat yapışma yüzeylerinde herhangi bir bozulma gözlemlenmemiştir. Bu yöntemle, kayma gerilmesi ve performansını artırmak amacıyla, bağıl çekirdek yoğunluğu artırılabilineceğine karar verilmiştir.



Şekil 2.14. İki farklı yapıda piramidimsi çekirdeğin lazerle kesimi (Xiong ve ark. 2012)

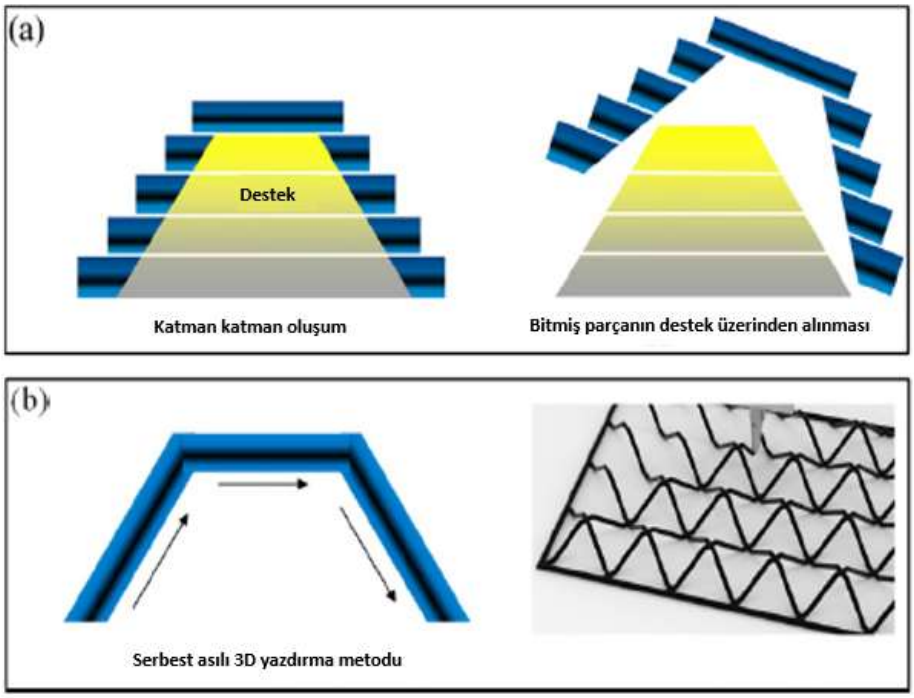
Xiaodong ve ark. Polimer matrisli sandwich panellerin sıcaklık değişimlerine karşı çok duyarlı olduklarını bildiklerinden dolayı yeni bir metod geliştirerek (Şekil 2.15) su jetiyle kestikleri −45/45° yönündeki parçaları (a), birbirlerine kenetlemek suretiyle piramidal yapı oluşturmuşlardır (b). Ardından 1,5 mm kalınlığında aluminyum alaşım plakadan su jeti yoluyla istavroz biçimde delikler delerek kafes yapıyla alüminyum plaka iç içe geçirilmiştir (d).Son olarak, epoksi yapıştırıcı vasıtasıyla bu delikler doldurulmuş ve karbon fiber levhalar aluminyum tabakayla birleştirilmiştir. Kürlenme işleminden sonra sandviç paneller oluşturulmuş olur (e).

Oluşturulan bu yapı −90°C ve 180°C arasında sıcaklıklarda test edilip bası altında eğilme durumları analiz edilmiştir.



Şekil 2.15. Aluminyum destekli piramidal çekirdek yapının üretim şeması (Xiaodong ve ark. 2016)

Shuting Liu ve ark. serbest asılı 3D yazdırma yöntemini sürekli fiber takviyeli termoplastik kafes yapılar oluşturmak için kullanmışlardır. Bu yöntemle farklı kalınlıklarda ve daha kompleks yapıların altta yapıyı destekleyen bir araç olmadan üretimini hedeflemektedirler.

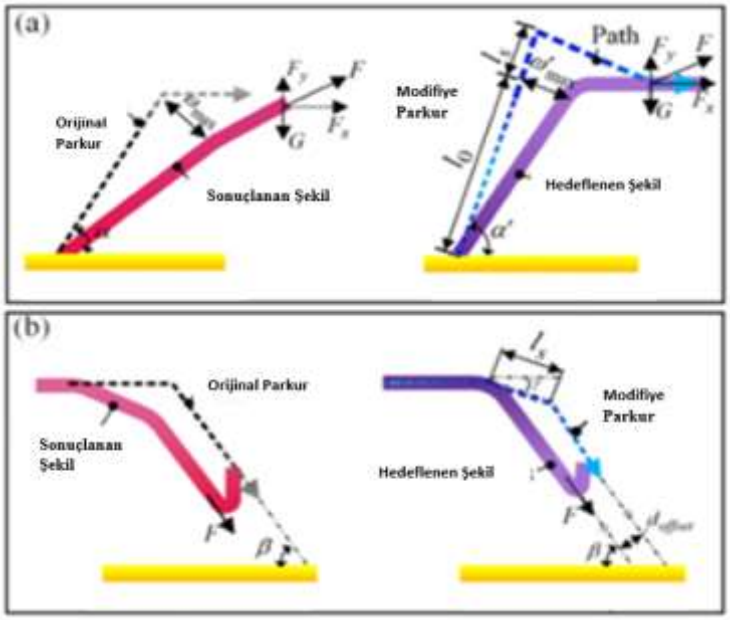


Şekil 2.16. Geleneksel 3D yazma (a) ve serbest asılı 3D yazma yöntemleri (b) (Shuting Liu ve ark. 2017)

3D yazıcı teknolojisi içi boş ve hafif yapıların üretilmesini mümkün kılar. Bu üretim yöntemi malzemelerin 2 boyutlu bir düzlem üzerine üst üste dizilmesi mekanizmasına dayanır. Serbest asılı 3D yazma metodu ise malzemeyi ekstrüzyon yöntemiyle direk püskürtme yöntemine dayanır. Bu sayede malzemenin altında bir desteğe ihtiyaç duyulmaz fakat bu yöntemin en önemli dezavantajı kalite ve hassas toleransların sağlanmasındaki zorluktur.

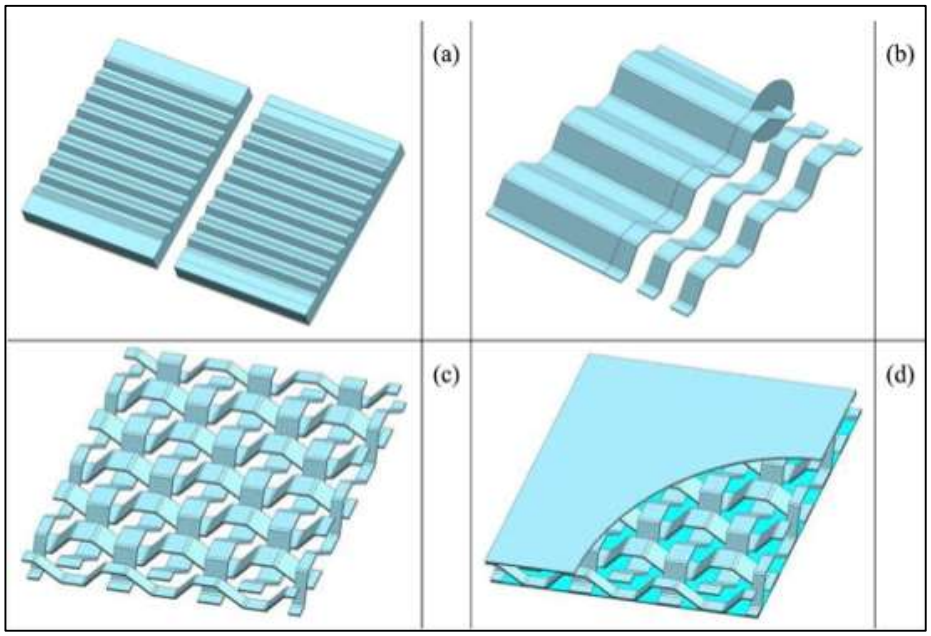
Sıcaklık etkisiyle malzeme yumuşak aşamadayken, parçanın yapısal anlamda bozulması kaçınılmazdır. Bunu önlemek için yörünge modifikasyonu yapılarak tahmin edilen deformasyon miktarı kadar yukarıdan ektrüzyon işlemi yapılır. Ayrıca hız ayarı da çok

iyi yapıldığı takdirde fiberlerin sürekliliği sağlanır veya bir diğer deyişle fiberlerin kırılması önlenir.



Şekil 2.17. Deformasyon mekanizması ve uygun parça üretimi için rota değiştirilmesinin şematik olarak gösterimi (Shuting Liu ve ark. 2017)

Hu Y. ve ark. (2016) oluk kirişli kafes yapılı kompozit sandviç panellerin imalatını ve mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Malzeme olarak karbon fiber takviyeli panel kullanmışlar (CFRC) , baskı kalıbı kullanarak kafes yapılı sandviç panel (LTSP) üretmişlerdir. Yapının mukavemet ve bozulma modlarını incelemek için sıkıştırma ve kesme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Prepreg karbon fiber tabakalar çok yönlü olarak [0°/±45] kalıba döşenir ve 120 ° de 4 saat kürlenir. Soğuduktan sonra şeritler halinde kesilen parçalar, kafes yapı oluşturacak şekilde sanki örgüymüş gibi epoksi ile yapıştırılarak 7 tabaka halinde dizilir, son olarak CFRC plakaya yapıştırılır. 1,75 kN kuvvet altında 12 saat oda sıcaklığında kürlenir.

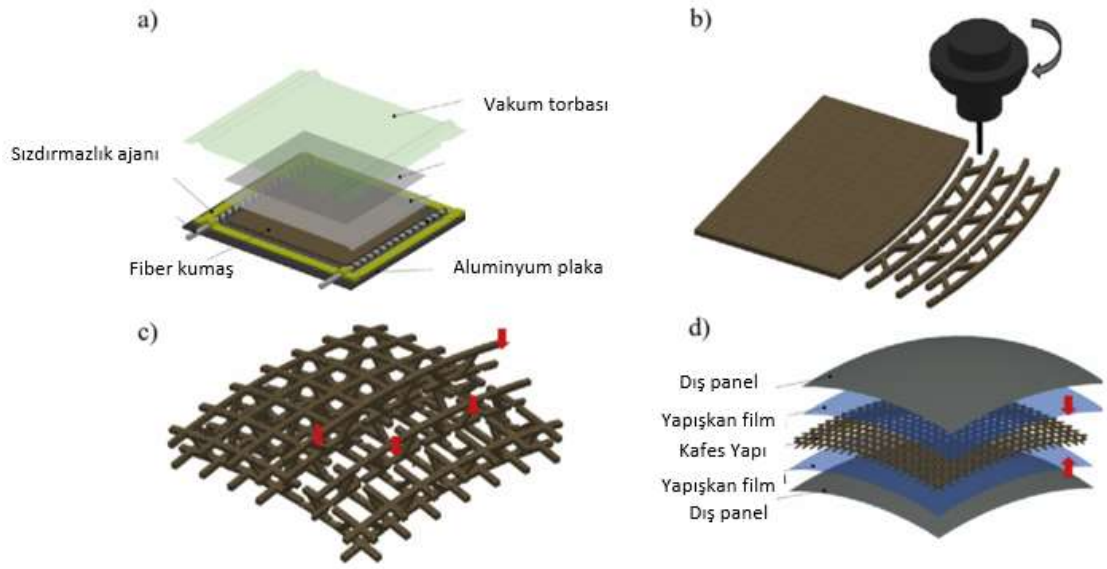


Şekil 2.18. Oluk kirişli kafes yapılı kompozit sandviç panellerin üretim basamakları şeması (Yang ve ark. 2016)

Bu yöntemin avantajları arasında, pres kalıbıyla üretimin karbon fiber hacmini ve dolayısıyla mukavemeti artırması, şeritlerin şekil tasarımının ayarlanabilmesi, plakayla şeritler arasındaki yüzey alanının genişlemesi ve böylelikle kayma mukavemetinin de yüksek olmasının sağlanması vardır.

Günümüzde yaya koruma kapasitesi en az hafif kaput üretimi kadar önemli bir konudur. Sha Yin ve arkadaşları çalışmalarında 2 adet fiberle takviye edilmiş kompozit panelin arasında kafes yapısına sahip bir çekirdek tasarlanmış, üretimi yapılan yeni ve hafif kompozit sandviç kaput Baş yaralanma kriterlerine göre (Head Injury Criterion) değerlendirilmiştir. Sandviç kaputun ticari uygulamasına oranla %25 daha hafif olduğu gözlemlenmiştir. Model üretilmeden önce LS-DYNA programında baş çarpma simülasyonlarına tabi tutulmuştur. Sonucun ticari versiyona göre çok daha iyi olduğu görülmüştür. Bu çalışmada sandviçli/sandviçsiz karşılaştırmasının yanında malzeme seçimi ve çekirdek yapı geometrisi de araştırılan konular arasında yer almaktadır. Panel kalınlığı ve panel malzemesi olarak karbon fiber takviyeli kompozit kullanılması da kafa yaralanmalarını minimumuma indirecek etmenler olduğu görülmüştür.

Sha Yin kendisinden önce yapılan piramit kafes yapı çalışmalarını incelediğinde 45° lik açının çok kademeli hata sayısını ve dolayısıyla darbe emme kabiliyetini artırdığını görmüş ve tasarımını buna göre yapmıştır. Yine kendisinden önce yapılan çalışmalardan elde ettiği bilgiye göre, piramidal kafes yapısı en düşük çekirdek geometrisinde bile enerjiyi iyi emebilmektedir. Gao ve ark. (Gao X, 2017) tarafından kafes yapılarda doğal fiberlerin kullanımının araştırıldığı, doğal fiberin kaput üretimi için çevre dostu, ucuz ve geri dönüştürülebilir bir seçenek olduğu Sha Yin'in çalışmasında da belirtilmiştir.



Şekil 2.19 Otomobil kaputunun piramidal kafes geometrili sandviç yapıda üretim şeması (Yin ve ark. 2018)

Güçlü ve ark. (Güçlü 2018) piramit geometri yapısına sahip 2 farklı yükseklikteki birim hücreleri birleştirerek 200 mm x 50 mm ebatlarında sandviç panel oluşturmuşlardır. Ürettikleri birim hücreleri bası testine, sandviç panelleri ise 3 nokta eğilme testine tabi tutmuşlardır. Test sonuçları, daha önce termoset matrisli yapılarla gerçekleştirilen deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Tez kapsamında üretilen sandviç panellerde üç temel malzeme kullanılmıştır. Karbon lif, PP ve bağlayıcı ve yapıştırıcı olarak ise EVA kullanılmıştır. Sürekli karbon liflerden üretilen polipropilen matrisli fiber yapının üretim aşamaları "3.2 Yöntem" başlığı altında detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu bölümde malzemelerin sadece fiziksel özelliklerinden bahsedilmiştir.

Karbon: Uzay ve uçak sanayisinde büyük bir uygulama alanı bulan karbon elyafı, kompozit teknolojisinde sıkça kullanılmaktadır. Cam elyafı genel amaçlı en çok kullanılan takviye malzemesi olmasına karşın, karbon elyafı daha ziyade ileri kompozitlerde kullanılır. Karbon elyafı, cam elyafına kıyasla daha hafiftir ve mekanik özellikleri daha iyidir bununla birlikte cam elyafa göre çok daha yüksek maliyetlidir. Karbon elyafının pek çok avantajı bulunmaktadır. Bunların içinde Elastisite modülü yüksekliği, yoğunluğunun düşük olması, sıcaklığa dayanımının yüksek olması ve korozyon dayanımı en çok öne çıkan özellikleridir. Karbon elyafının yorulma performansı çok iyi olmakla birlikte bütün reçinelerle uyumlu olup kompozit malzeme oluşturabilme yeteneğine sahiptir. Dezavantajı ise maliyetli oluşudur. Bu çalışmada sürekli karbon elyafı kullanılmıştır.

Polipropilen (PP): Mono kompozit filaman ve kompozit plaka üretiminde matris malzemesi olarak kullanılır. PP düşük özgül ağırlığa sahip, kimyasal ve elektriksel özellikleri iyi olan ayrıca camsı geçiş sıcaklığı altında rijit olan bir polimerdir. Mekanik özellikleri 0°C'nin altında zayıfladığı için bu sıcaklığın altındaki kullanım alanlarında tercih edilmez. 0 – 100°C arası ideal çalışma sıcaklık aralığıdır.

EVA(Etilen/Vinilasetat Kopolimer): Kafes yapıları kompozit plakalara yapıştırmak için kullanılan ve ısı ile eriyebilen yapıştırıcı kullanılmıştır.

3.2 Yöntem

3.2.1 Karbon fiber bazlı termoplastik plaka yapısı ve üretimi

Plaka şeklinde üretilen termoplastik kompozit malzemeler sürekli karbon elyaf malzeme üzerine PP malzemenin ekstrüzyon yöntemiyle kaplanarak üretilmesi ve erimiş halde iken basınç altında sıkıştırılması ile oluşan şerit demetlerinden oluşmaktadır.



Şekil 3.1. Plaka oluşumu için hazırlanmış kompozit şeritler (Akbulut 2018)

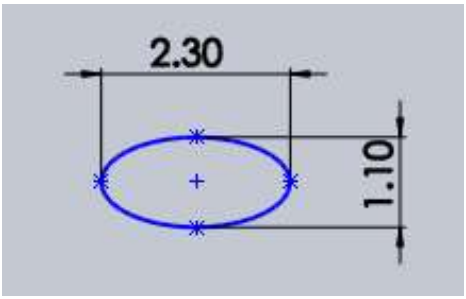
3.2.2 Termoplastik karbon fiber yapısı ve üretimi

Termoplastik monokompozit karbon fiber üretimi karbon fiber plaka üretimiyle benzerlikler gösterir. Karbon elyaf üzerine PP malzemenin ekstrüzyon yöntemiyle kaplanmasıyla oluşur. Tek fark, filamentler bir sonraki proses olan ezilme işlemine tabi tutulmaz ve makaralara sarımı yapılır.



Şekil 3.2. Termoplastik karbon fiber filament yapının kalıptan çıkışı **(**Güçlü ve ark. 2018**)**

Karbon fiber elips şeklindedir ve 1.1 x 2.3 mm ölçülere sahiptir. (Şekil 3.2) Kalıptan çıkan fiber bir mekanizma yardımıyla makaralara sarılır ve kullanıma hazır hale getirilir.



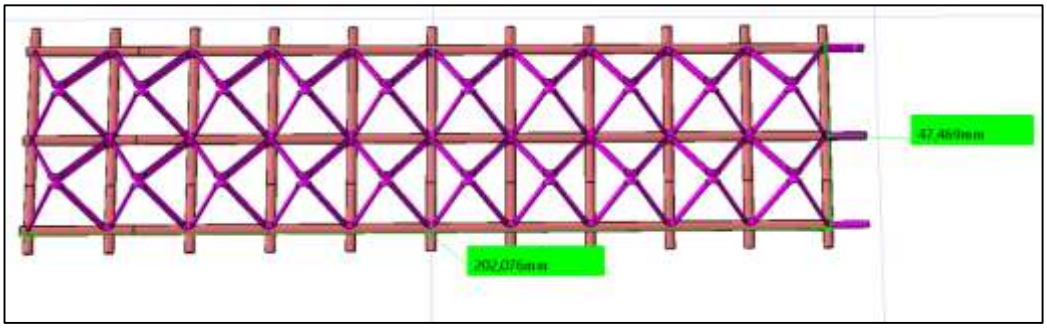
Şekil 3.3. Termoplastik karbon fiber malzemenin şekli ve ölçüleri (Akbulut , 2018)



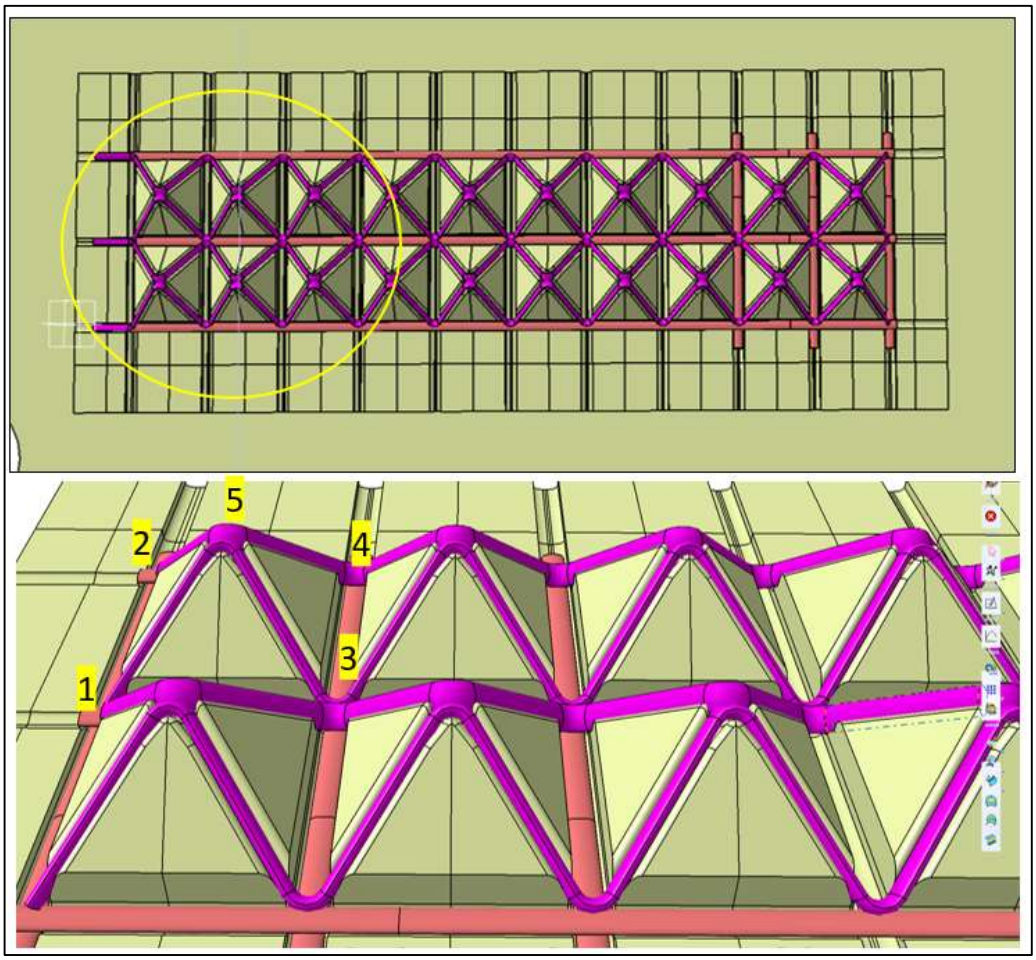
Şekil 3.4. Karbon fiber yapının makaralara sarılmış kullanıma hazır hali (Akbulut , 2018)

3.2.3 Sandviç panellerin tasarım ve imalat süreci

3D tasarım programında kalıp tasarımına başlamadan önce numunenin hangi ölçülere sahip olacağı ve prosesin hangi aşamalardan oluşacağı ön çalışmaları gerçekleşmiştir. Bu sebeple öncelikle 50 mm x200 mm ebatlarında karbon fiber plakalara yerleşim yapılabilecek şekilde CATIA V5'de kafes yapı tasarımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3) . Üretim prosesinin iki aşamadan oluşmasına karar kılındı. İlk aşama, Şekil 3.5'te pembe olarak gösterilen düz filamentlerin üzerine ön şekil verilmiş mor filamentlerin yerleştirilmesidir. İkinci aşama ise, ısının da etkisiyle beş adet temas bölgesinde (Şekil 3.6) PP malzemenin erimesi suretiyle filamentlerin birbirine kaynaması şeklindedir. Bu sebeple ön şekil verme işlemi için bir tane ve ikinci aşamayı oluşturan montajlama işlemi için de bir tane olmak üzere toplam iki adet kalıp tasarlanmıştır.



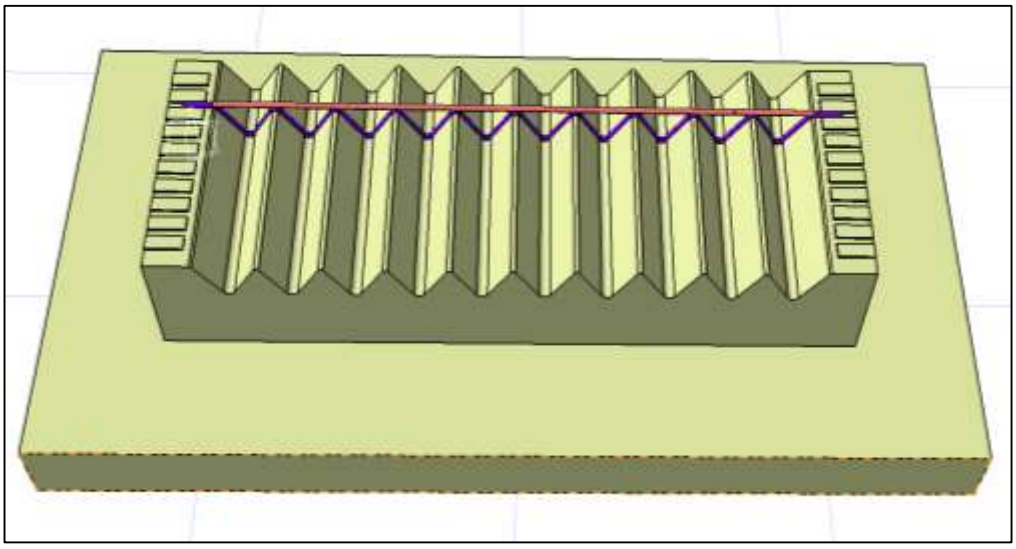
Şekil 3.5. Piramit kafes geometrisinin 3D tasarım programındaki görünümü



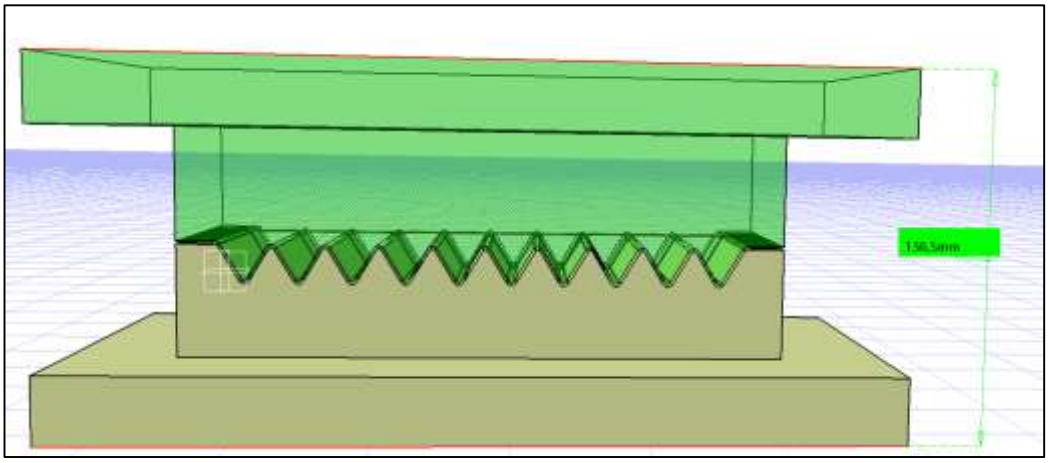
Şekil 3.6. Montaj kalıbının 3D tasarım görünümü ve filamentlerin temas bölgelerinin numaralandırılmış olarak gösterilmesi

Üretim basamakları sırasıyla şöyledir;

- İkinci kalıp üzerine, makaradan düz olarak kesilmiş 60 mm ebatlarında 11 adet filament yerleştirilmiş ve üzerlerine 210 mm ebatlarında 3 adet filament havya ile temas noktalarından kaynatmak suretiyle konulmuştur. Bu sayede kafes yapının tabanı oluşturulmuştur.
- İlk kalıptan (Şekil 3.6 ve şekil 3.7) çıkan 4 adet şekil almış filament ikinci kalıbın yanal yüzeylerine yatırılır.
- Son olarak 170 °C sıcaklık ve 0.03 MPa basınç altında fırında 2 saat bekletilir.



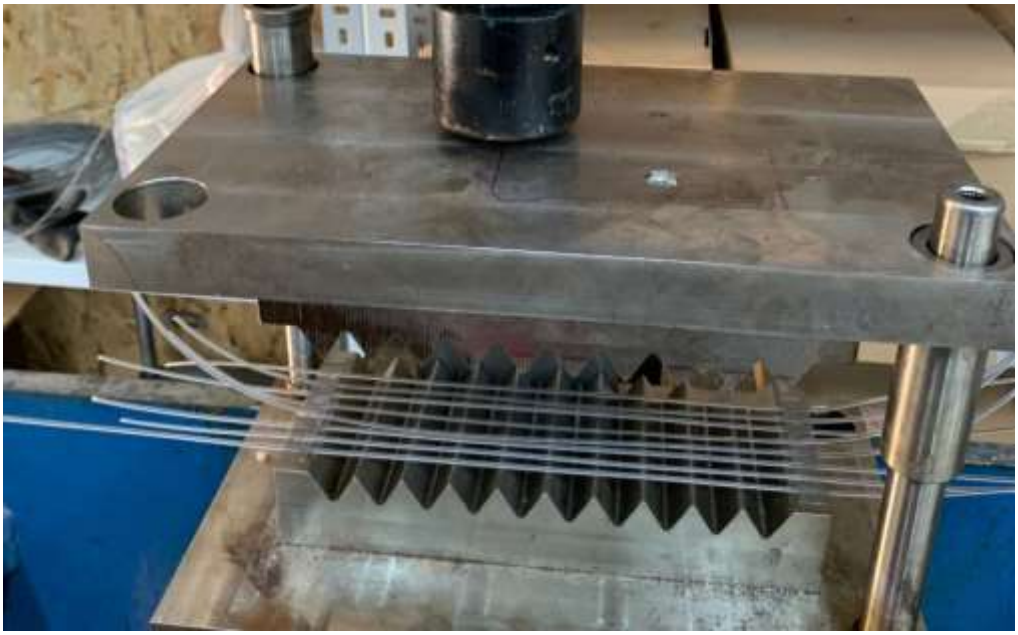
Şekil 3.7. Filamentin ilk kalıpta şekil almadan önceki ve aldıktan sonraki durumu



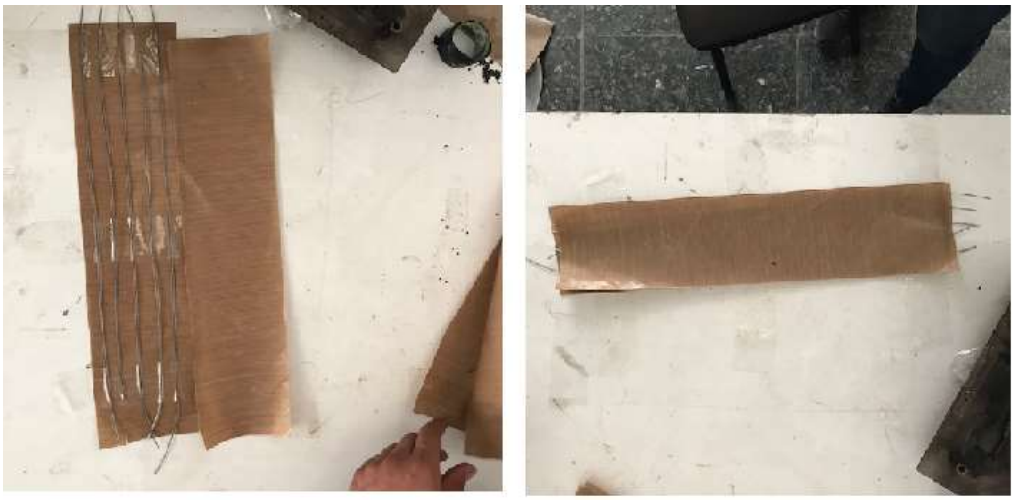
Şekil 3.8. Ön şekil verme kalıbının 3D tasarım olarak görüntüsü

Üretim aşamasında pek çok zorlayıcı etkenlerle karşılaşılmıştır. İlk kalıpta şekil verirken karşılaşılan problem, karbon fiber filament parçanın kalıbın tam orta bölgesinde kopması olmuştur. Kopmayı engellemek ve PP akışını sağlamak için kalıp 70-100 °C sıcaklık arasında ısıtılmış ve tekrar parça basılmıştır. Fakat bu sefer filament kesiti incelmiş hatta kopma noktasına kadar gelmiştir. Bu da göstermiştir ki, sıcaklık artışı viskoziteyi düşürmüş ama yine de polimer ve kalıp arasındaki sürtünmeyi azaltmada tek başına yeterli olmamıştır. İleri çalışmalarda sürtünmeyi engellemek için kalıp üzerine teflon bazlı kaplama uygulanabilir. Böylelikle kalıp ve filament arasındaki sürtünme azalır, dolayısıyla kopmayan ve kesiti fazla incelmeyen bütün halde filament

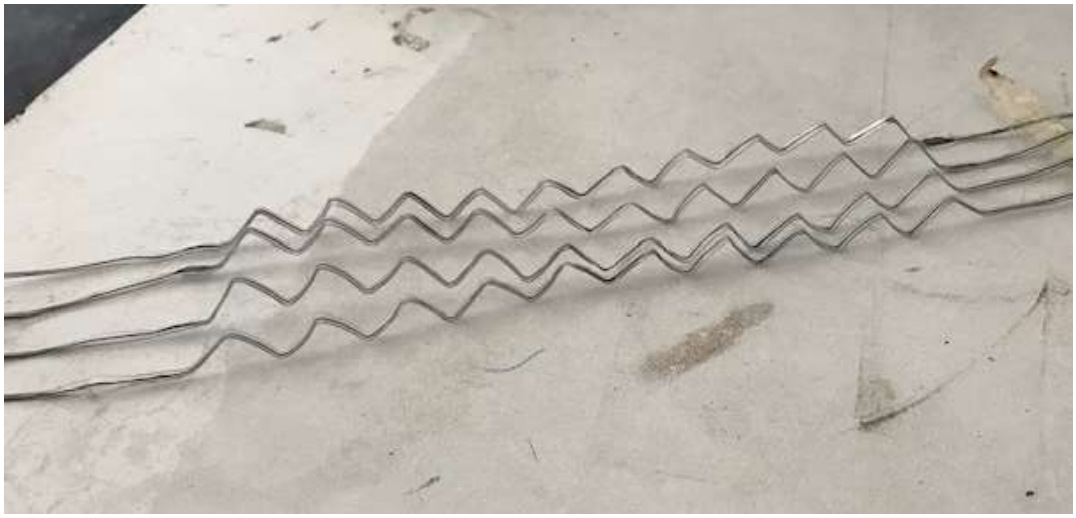
elde edilebilir. Şekil 3.10' de gösterildiği gibi bu yöntem teflon kaplı cam kumaş kullanılarak denenmiş ve kopmadan filament üretimi yapılabilmiştir. Fakat bu yöntemde de cam fiber kumaşın mukavemeti sebebiyle kalıp stroğunu tamamlamakta sorun yaşanmış ve piramitlerin yanal yüzeylerinin şekillendirilmesinde ideal ölçüler yakalanamamıştır.



Şekil 3.9. Filamentlerin basılmadan önce gergin bir pozisyonda dizilmiş halde görüntüsü



Şekil 3.10. Teflon kaplı cam kumaş arasına dizilmiş filamentlerden bir görünüm



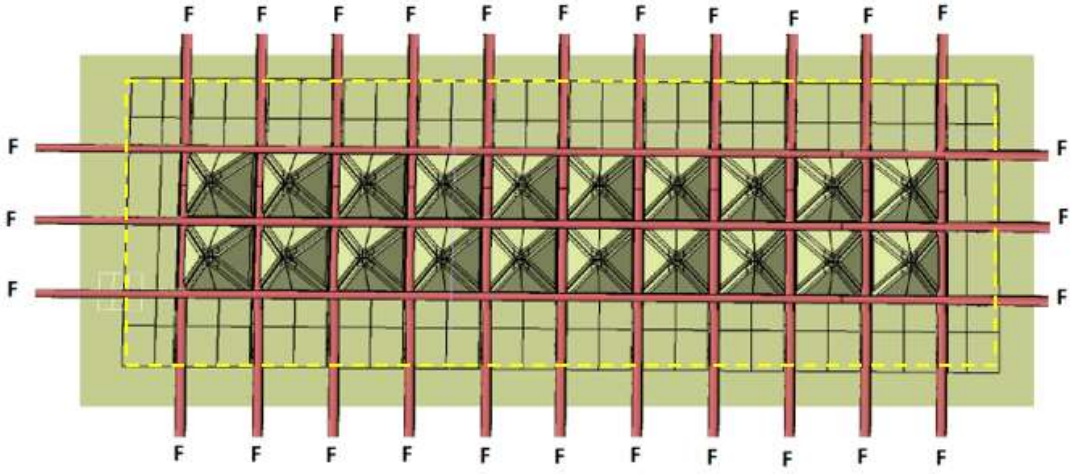
Şekil 3.11. Filamentlerin teflon cam kumaş arasında basılarak aldıkları görünüm

Birinci kalıptan çıkan parçalar ikinci kalıpta kullanılmak üzere kenara ayırıldılar. İkinci aşamaya yani montaj prosesine geçmeden evvel filament makarasından kesilen 3 adet 210 mm ebatlarında filament kalıba havyalanarak yapıştırıldı. Ardından da 11 adet 60 mm uzunluğundaki filamentler bağlantı nodlarından havyalanarak, piramit kafes yapının tabanı hazırlanmış oldu.

Bu işlemin ardından ilk kalıptan elde edilen 4 adet filament (Şekil 3.11) , tabanın üzerine yerleştirildi. Son olarak üst kalıp kapatılarak sıcaklık ve basınç altında filamentlerin kontak bölgelerinden eriyerek birbirine kaynaması sağlandı.

Fakat, sunulan bu tez çalışmasında erime noktasını geçen parçalar, kalıba kalıp ayırıcı sürülmesine rağmen, yapışmış ve kalıptan çıkmamıştır. Bunun en önemli sebebi, tabanı oluşturan filamentlerin oturduğu kanalların daha geniş yapılmaması ve kanal duvarlarına çıkma açısı olarak bir veya iki derece açı verilmemiş olmasıdır. Bu önlemler kalıp tasarım aşamasında alınmamış olması nedeni ile polimerin kanal duvarlarına bahsedilen yapışma sorunu yaşanmıştır.

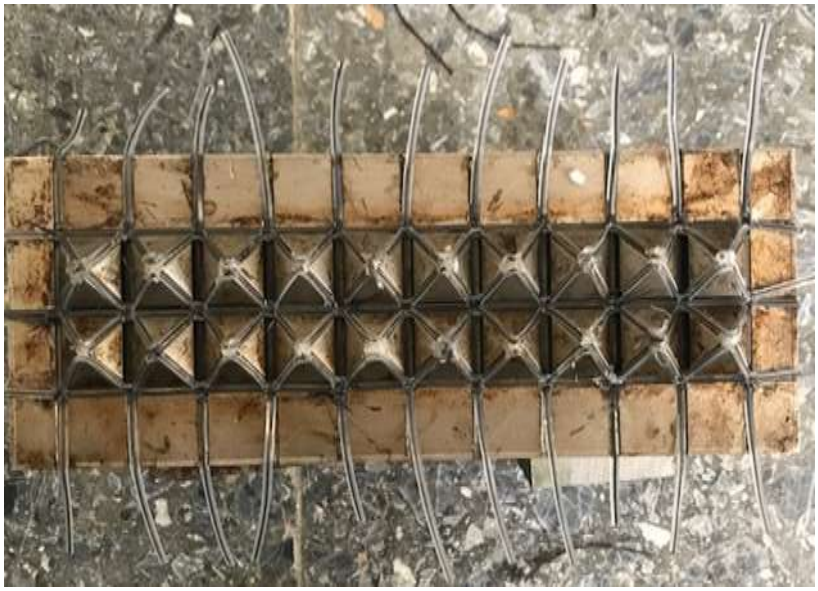
Bu sebeple bizim çalışmamızda, ön şekil verilen filamentler montaj kalıbında havya ile ısıtılarak birbirine kaynatılmıştır. Şekil 3.13'de el yardımı üretmiş olduğumuz bir numunenin kalıp üzerindeki görüntüsü bulunmaktadır



Şekil 3.12. Piramit kafes yapının otomasyon vasıtasıyla gergin halde tutulan tabanının şematik olarak gösterimi

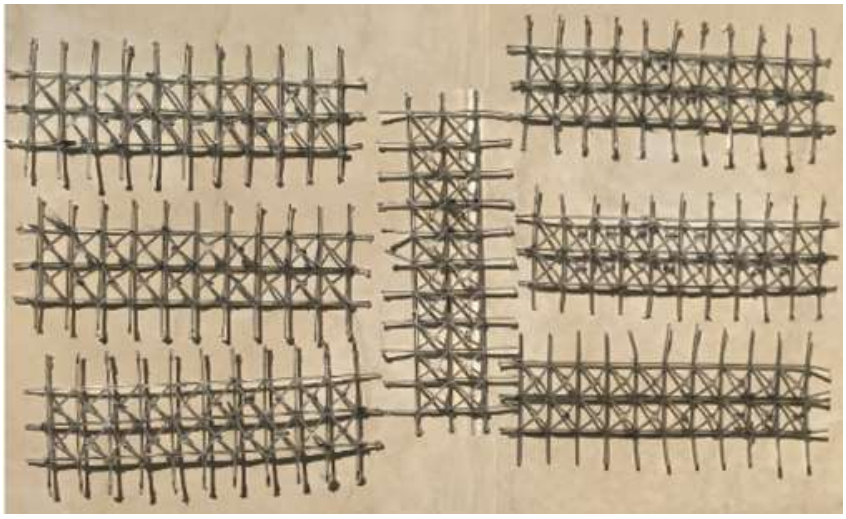
Optimize edilmiş bir proseste, montaj esnasındaki işlemler seri şartlarda şöyle gerçekleştirebilir:

- Robotik bir tutucu (gripper) 5 N gibi düşük bir F kuvvetiyle filamentleri gergin tutmak amacıyla çeker (Şekil 3.13)
- Ardından her bir nod (bağlantı noktası) 160-170 °C sıcaklıkta birbirine kaynatılır.
- İlk kalıpta şekil almış 4 adet filament, montaj kalıbında piramidin kanallarına yerleştirilir, manuel olarak ısı vermek suretiyle başlangıç ve bitiş nodlarından kaynatılır ve böylelikle parçalar kalıba sabitlenir.
- -Üst kalıp kapatılarak, sıcaklık ve basınç altında filamentlerin değme noktalarının birbirine kaynaması sağlanır ve Şekil 3.13' teki gibi nihai parça üretilmiş olur.

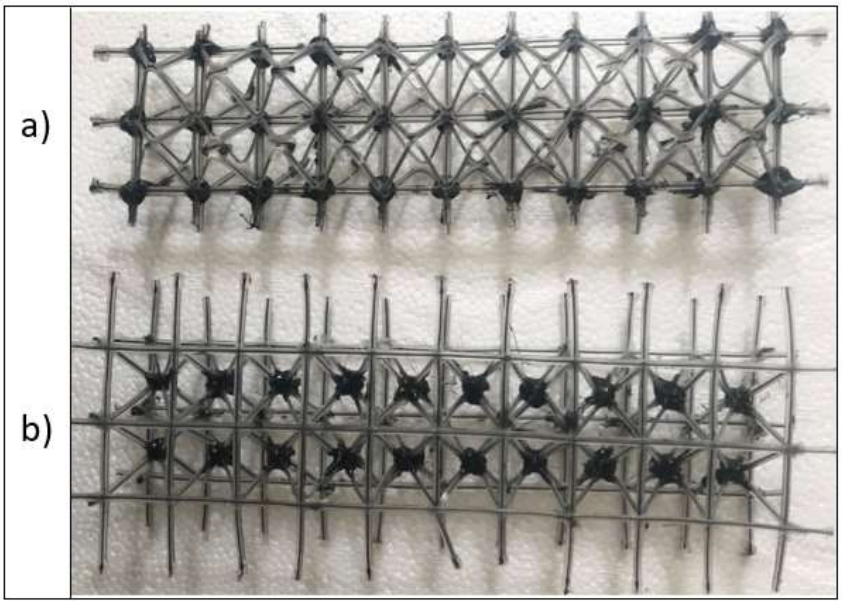


Şekil 3.13. Manuel şartlarda üretilen piramit kafes yapının görüntüsü

Yukarıdaki numunede görüldüğü üzere, bazı hücrelerde saptanamayan sebeplerden dolayı piramitlerin tepe noktaları örtüşmediği için, o bölgelere ekstra polipropilen konulmuştur. Bu yöntemle Şekil 3.14 teki gibi 8 adet numune üretilmiştir. Üretilen piramit tabakalardan 4 tanesi her hücrenin üst noktalarından EVA (Etilen/Vinilasetat Kopolimer) yapıştırıcı vasıtasıyla birbirine yapıştırılmış, diğer 4 tabaka her hücre tabanındaki 4 bağlantı noktasından birbirlerine yapıştırılmak suretiyle kafes yapılar oluşturulmuştur. (Şekil 3.15)



Şekil 3.14. Üretilen piramit tabakaların üstten görünüşü



Şekil 3.15. a) Taban tabana ve b) uç uca ekleme metoduyla üretilen kafes yapıların görüntüsü

Üretimin son aşaması ise üretilen kafes yapıların karbon fiber plakalara yapıştırılmasıdır. Karbon fiber plakalar , 1.5 mm kalınlığında ve 50x200 mm boyutlarında, termoplastik matris içerisinde fiberleri 90°/0°/90° doğrultusunda yerleştirilmiş yapıdadırlar. Bu işlemde de EVA yapıştırıcı kullanılmış ve toplamda 4 adet test numunesi elde edilmiştir



Şekil 3.16. a) Uç uca , b) taban tabana ekleme metoduyla üretilmiş sandviç plakalar

3.2.4 Uygulanan testler ve özellikleri

Üretilen kompozit malzeme numunelerine bası testi ve yüksek hızlı darbe deneyi uygulanmıştır.

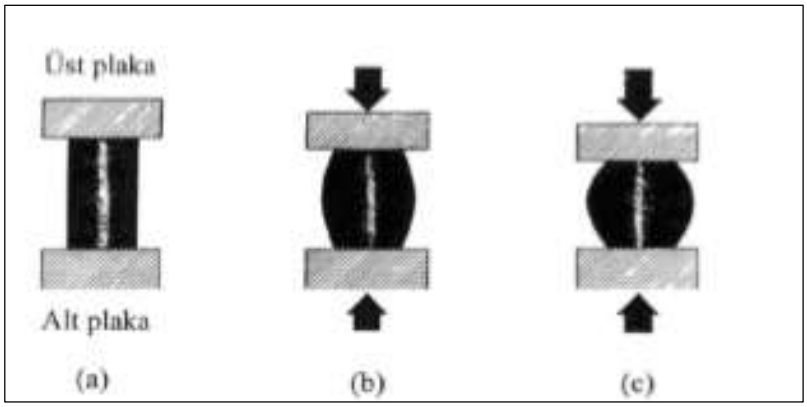
1- Bası testi

Mühendislik malzemeleri uygulanan çeşitli yükler altında kalıcı olarak şekil değiştirebilir, buna plastik şekil değişimi denilmektedir. Malzemelerin ne zaman kalıcı şekil değiştireceklerini ve bu durumun hangi koşullar altında gerçekleşeceğini tasarım aşamasında bilmek çok önemlidir. Çeşitli yapısal elemanların veya çalışan mekanizma parçalarının şekillerini değiştirmesi çoğunlukla istenmeyen bir durumdur.

Bası testinin pratikte çekme testinin neredeyse tam tersi olduğu söylenebilir. Bası kuvvetinin öncelikli olduğu durumlarda kullanılan malzeme türlerinin mukavemet değerleri bu testle belirlenebilir. Basma deneyi numunelerinde, numune yüksekliği (h_0) ve çapı (d_0) arasındaki h_0/d_0 oranı oldukça önemlidir. Numunenin h_0/d_0 oranının çok büyük olması ya da çok küçük olması numunenin hasara uğramasına veya deneyden sağlıklı veriler elde edilememesine neden olur.

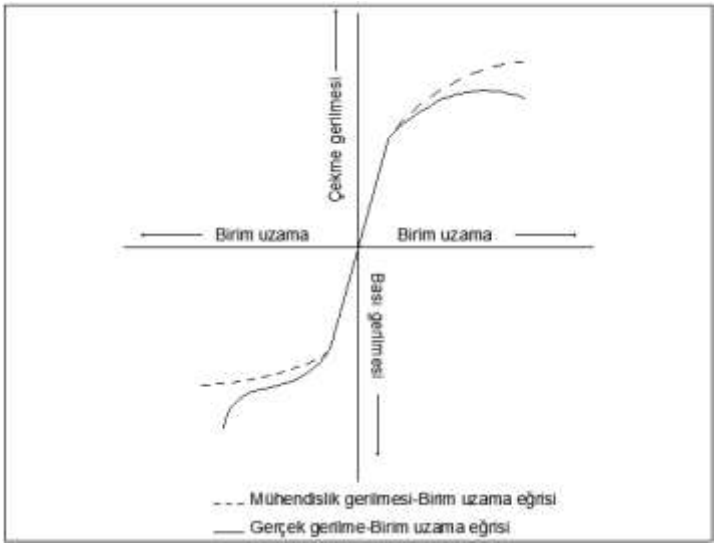
Bası testi, doğal olarak numunenin kesitinin artmasından dolayı çekme testi gibi boyun vermeyle sonuçlanmaz. Bası testi, özellikle gevrek malzeme tiplerinin sünek olup olmadığını ölçmede başvurulan bir yöntemdir, çünkü bu tür malzemelerin süneklikleri çekme testi ile hassas bir biçimde anlaşılamaz. Bu tür malzemelerin kopmadan önceki % uzamaları ve kesitlerinin % daralması sıfır denecek kadar azdır. Bası testinin çekme testine göre avantajlarından bir diğeri ise çok küçük boyuttaki malzeme numunelerinin de kullanılabilmesidir.

Bası testi, deney numunesinin hasara uğrayıncaya kadar yani yük taşıyamayacak duruma gelinceye kadar tek eksende, belirli bir sıcaklıkta, sabit ve düşük hızda basılma işlemidir. Yükün uygulandığı plakaların üst yüzeyi ve alt yüzeyleri, numunenin eksenine dik ve birbirlerine paralel olması gerekir. Basma testi sırasında sünek malzemelerde kesit artışı sebebiyle fıçı gibi bir görününüm oluşmaktadır (Şekil 3.17)



Şekil 3.17. Bası kuvveti uygulamasında sünek numunedeki fıçı şekli oluşumu (Akbulut 2018)

Basma diyagramı, bası testinin sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrisidir ve çekme diyagramıyla benzerlik gösterir. Basma diyagramında akma sınırı geçildiğinde tıpkı çekme diyagramında olduğu gibi gerilme oranında azalma meydana gelir. Ancak bir noktadan sonra basma diyagramında kuvvet deplasman eğrisi eksponansiyel artış gösterir. Bunun sebebi bası esnasında malzeme kesitinin sürekli büyümesidir (Şekil 3.17)



Şekil 3.18. Metal özellikli bir malzemenin bası ve çekme diyagramları (Akbulut 2018)

Bası testi sonucunda aşağıdaki mekanik özelliklerin belirlenmesi mümkündür.

a)Akma dayanımı(σ_a): Gerilme halinin aşağı yukarı sabit olmasına karşılık, plastik şekil değişimi önemli bir miktarda arttığı ve bası diyagramında düzgünsüzlük gösteren gerilim değeridir.

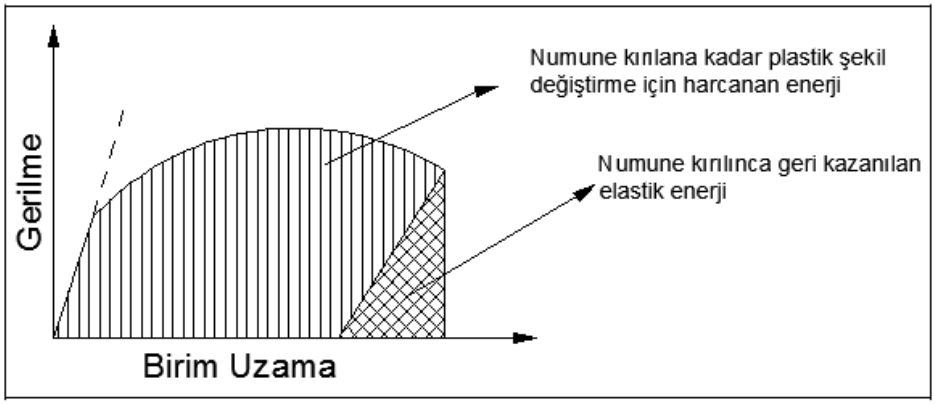
b)Basma dayanımı (σ_b): Malzemenin hasara uğramadan dayanabildiği en yüksek gerilme değeridir. Bu gerilim, bası diyagramındaki en üst gerilmedir $\sigma b = Fmax/A0$ formülü ile hesaplanır. Bu noktaya kadar numunenin kesiti her yönde eşit büyür, bu aşamadan sonra çok az bir gerilim durumunda dahi numune hasara uğrar.

c)Orantı sınırı (σ_0): Gerilme ile birim uzama arasında $\sigma = E.\varepsilon$ Hooke kanununun geçerli olduğu lineer kısmı belirler. Bu ifadede bulunan orantı katsayısı E, elastikiyet modülü olarak adlandırılır ve doğrunun eğimi hesaplanarak bulunur. Ahşap ve kauçuk gibi malzemelerin gerilme- uzama grafiğinde lineer bölge bulunmadığından, sabit elastikiyet modülleri de olmaz. Bir malzemenin elastikiyet modülü ne kadar fazlaysa, elastik şekil değiştirmeye olan direnci de fazladır.

d) Kopma Uzaması (K.U.): Basma numunesinin kopuncaya veya kırılıncaya kadar uzadığı miktar yüzde uzama olarak tanımlanır. $\Delta l_k = l_k - l_0$ yardımıyla $K.U. = \% (\Delta l_k / l_0) x100$ formülü ile hesaplanır. Elde edilen değer ne kadar büyükse malzemenin o derece sünek olduğu anlaşılabilir.

e) Rezilyans: Malzemenin sadece elastik şekil değiştirme esnasında enerjiyi emme yeteneği olarak tanımlanır. Enerji miktarı, gerilme- birim uzama eğrisinde elastik bölgenin altında kalan alanın hesaplanmasıyla bulunur.

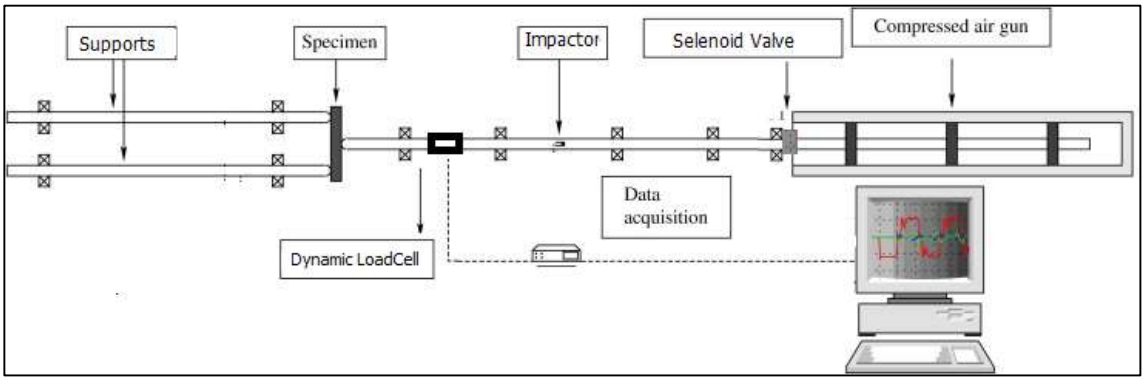
f) Tokluk: Malzemenin kırılıncaya kadar depoladığı enerji miktarı tokluğunu gösterir. Çoğunlukla gerilme – birim uzama eğrisinin altındaki alanın hesaplanması ile bulunur.



Şekil 3.19. Gerilme-birim uzama eğrisinin altındaki alan malzemenin tokluğunu verir

2- Yüksek Hızlı Darbe Testi

Basma deneyi sanki-statik olarak kabul edilen çok düşük hızlarda gerçekleştirilmektedir. Çarpışma durumlarında ise çok daha yüksek hızlarda enerji/kuvvet parçaya aktarılır. Malzemelerin bu yüksek deformasyon hızlarında, statik testlerden çok daha farklı davranış sergiledikleri bilindiği için bu tür statik testler çarpışma, patlama gibi yüksek deformasyon hızlarında malzeme özelliklerini belirlemede yetersiz kalmaktadır. Bu durumun üstesinden gelebilmek için malzemeler yüksek deformasyon hızlarında yeniden düzenlenen testlere tabi tutulmaktadır.



Şekil 3.20. Dinamik üç nokta eğilme düzeneği (OTO4003 2017)

Testin yapılacağı düzenek Split Hopkinson dinamik bası düzeneğinde yapılan değişiklikle elde edilmiş bir dinamik test sistemidir. Sistemin ana yapıları; basıncın depolanıp itme kuvvetinin sağlandığı bir gaz tabancası, gaz tabancasından aldığı basınçla ivmelenip numuneye çarpacak olan impaktör, dinamik kuvvetin ölçümünü

sağlayan dinamik yük hücresi, gaz tabancasındaki basınçlı gazın namluya verilmesini sağlayan solenoid valf, dinamik yük hücresinden gelen verileri işlemeye yarayan veri toplayıcı ve bu sistemin bağlı olduğu bir bilgisayardan ibarettir.

Testin yapılışı: Gaz tabancası 1.25 bar basınçla doldurulup test edilecek numuneler duvara yapıştırıcı vasıtasıyla sabitlenir. İmpaktörün bağlı olduğu çubuk, numuneye çok hızlı bir şekilde çarpar. Deney sonunda yük hücresi aracılığıyla elde edilen Kuvvet-Zaman verileri değerlendirilir.



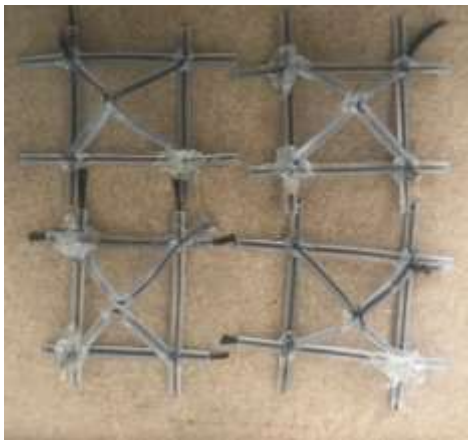
Şekil 3.21. Yüksek hızlı darbe testinde numunenin duvara sabitlenmiş görüntüsü

4. BULGULAR

4.1 Hücresel Bazda Yapılan Testler

1- Statik Basma Deneyi

Testler için Şekil 4.1'de görüldüğü gibi beş adet hücresel birim üretilmiştir. Bunlardan üç tanesi statik basma testine tabi tutulmuştur. Basma testi için Zwick Roell Z010 makinası kullanılmış, test10 mm/dak ve 5 N ön yükleme koşullarında gerçekleşmiştir. Test sonucunda numunelerden ikisinin nodlarında hasar oluşmadığı sadece bir tanesinde polimerlerin birbirine yeterince kaynamamasından kaynaklı kopma gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 4.1. Test için üretilen numunelerin üstten görünüşü

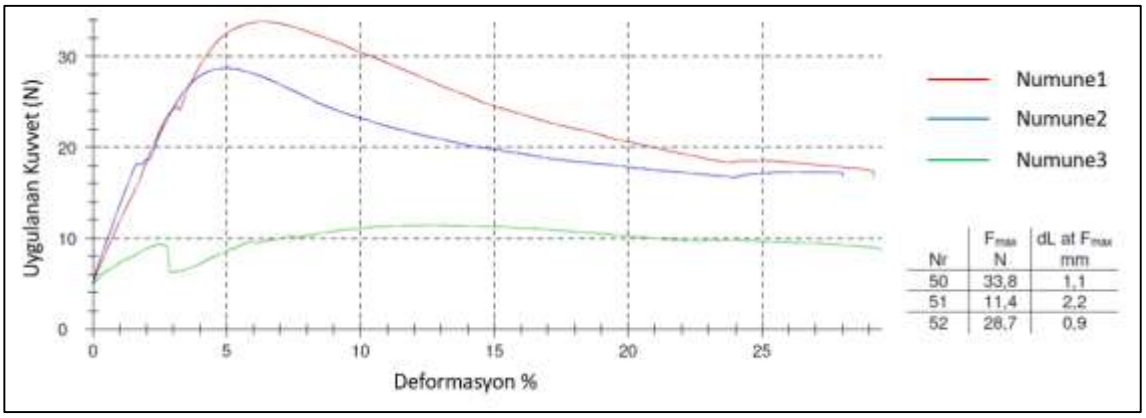


Şekil 4.2. Zwick Roell Z010 Basma testi makinesi ve teste hazır numunenin çeneler arasındaki görüntüsü

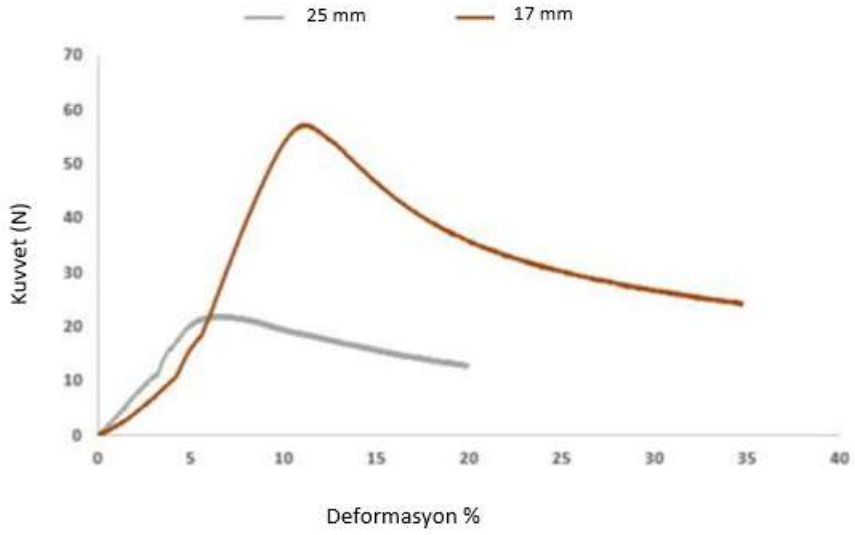


Şekil 4.3. Basma testi sonrasında numunelerin görüntüsü

Şekil 4.4'teki grafiklerden de anlaşılacağı üzere numune 3 yapışma zafiyetinden dolayı en fazla 10 N taşıyabilmiş, numune 1 ve numune 2'ye göre daha düşük dayanım sergilemiştir. Numune 2 ve Numune 3 sırasıyla 28.7 N ve 33.8 N taşıyabilmiştir. Elde edilen bulgular daha önce yapılan bir benzer çalışma ile karşılaştırılmıştır. Güçlü ve ark. (Güçlü 2018) tarafından yapılan araştırmada 17 mm ve 25 mm sütun boyundaki birim hücreler statik bası testine tabi tutulmuştur. Söz konusu çalışmada, sunulan tezde kullanılan monokompozit Karbon/PP filamentler kullanılarak birim kafes yapıların kenarları ayrı ayrı boyutlarda kesilmiş ve aparat yardımı ile üçgen piramit formunda EVA yapıştırıcı ile yapıştırılarak birim çekirdek hücreler elde edilmiştir. Aynı test siteminde gerçekleşen deneylere göre, sunulan tezdeki maksimum dinamik kuvvet değerleri %50 daha düşük çıkmıştır. Bunun iki önemli sebebi olduğu düşünülmektedir: a) Bu çalışmada kullanılan piramit sütunları tek tek kesilmemiş, kalıptan V biçiminde şekillenerek elde edilmiştir. Kalıpta şekil alırken polimerin kesiti daralmıştır. b) Bu çalışmada piramidi oluşturmak için sütunlar tek tek kesilip EVA yapıştırıcı ile yapıştırılmadan, sadece polimerin birbirine kaynaması vasıtasıyla oluşturulmuştur. Birleşme noktalarına bir polimer ilavesi yapılmamıştır. Bu nedenle birleşme noktalarında polimer yetmezliği söz konusu olduğu ve mükemmel bir birleşme oluşamadığı gözlemlenmiştir.



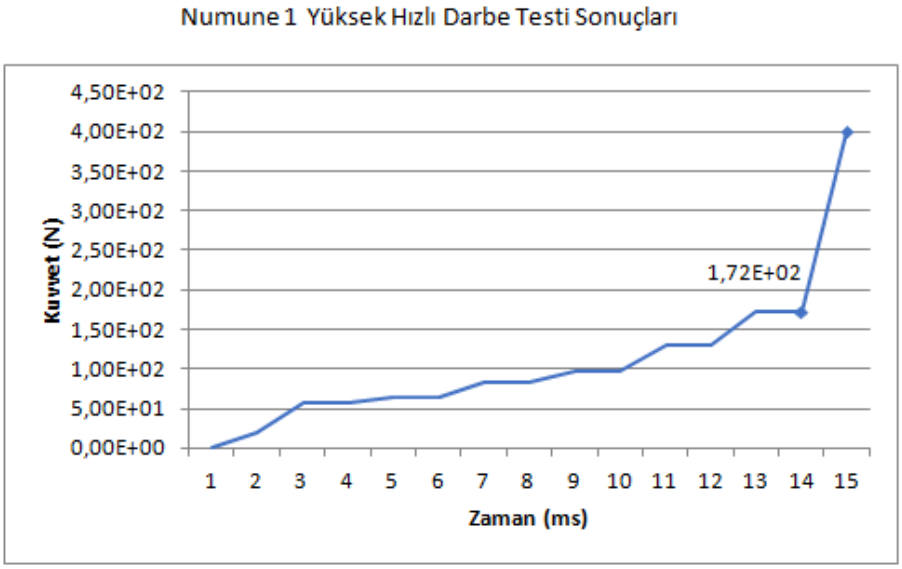
Şekil 4.4. Basma numunelerinin kuvvet-deformasyon eğrileri



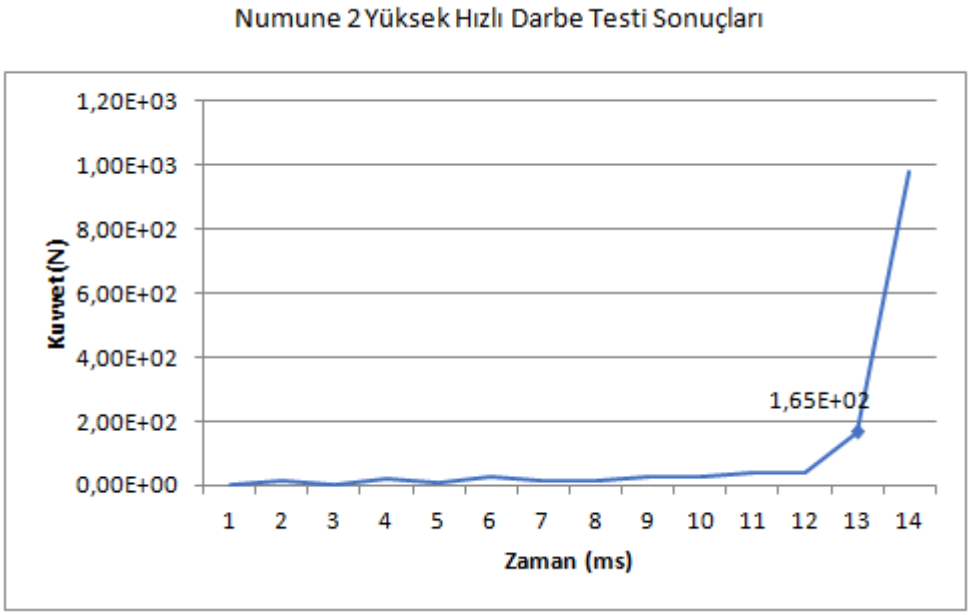
Şekil 4.5. 17 mm ve 25 mm sütun boyuna sahip birim hücrelerin bası testine tabi tutulmaları sonucu elde edilen değerler (Güçlü ve ark. 2018)

2-Yüksek Hızlı Darbe Testi

Beş adet numunenin üç tanesi basma kalan ikisi de yüksek hızlı darbe deneyi için kullanılmıştır. Darbe deneyi sonucunda numune arasındaki piramit katman tamamen ezilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Numune 1 180 N, Numune 2 ise 220 N kuvvete dayanabilmiştir.



Şekil 4.6. Numune 1 yüksek hızlı darbe deneyi grafiği



Şekil 4.7. Numune 2 yüksek hızlı darbe deneyi grafiği

4.2 Sandviç Plakalarda Gerçekleştirilen Statik Üç Nokta Eğilme Testleri

Her bir plaka 6-7 dakika süre içerisinde toplamda 30 mmlik yer değiştirmeye tabi tutulmuştur. Plakaları incelediğimizde, bağlantı noktalarının plakadan ayrıldığı gözlemlenmiştir. Bu durumun karbon fiber plaka ve çekirdek yapı arasındaki yapışma zafiyetinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Test sonuçlarına bakıldığında, plakaların

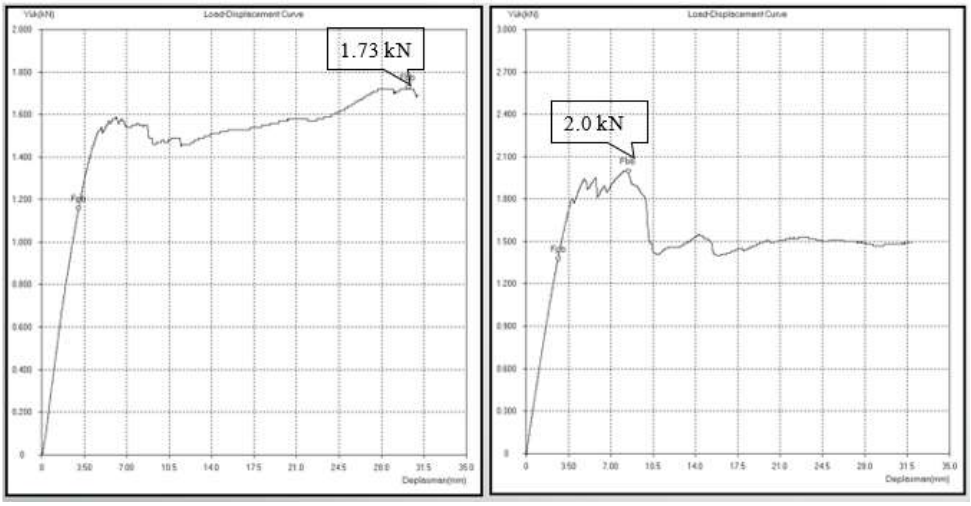
en düşük 1.73 kN en yüksek 2.0 kN yüke dayanım gösterdiği ve sonuçların çekirdek geometrisinden etkilenmediği anlaşılmıştır.



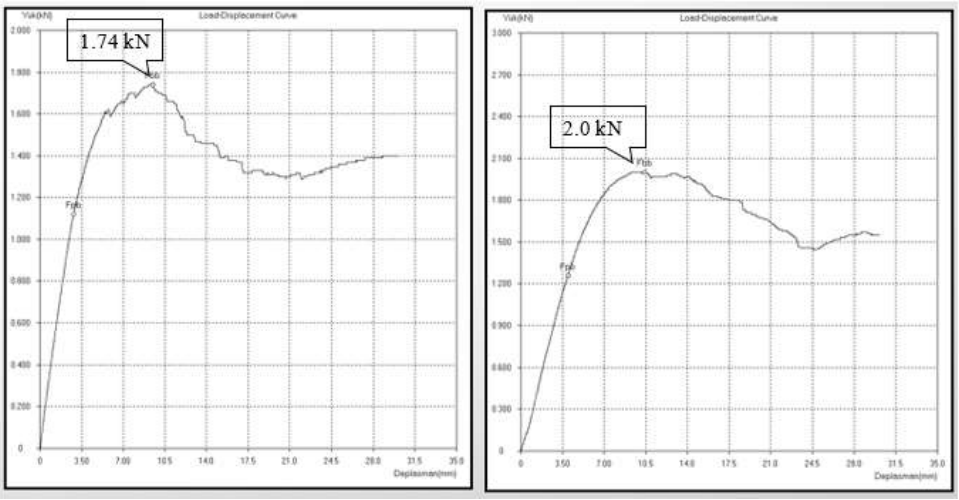
Şekil 4.8. Üç nokta eğilme test düzeneğinin görünümü

Çizelge 4.1. Statik Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları

Numune Geometrisi	Maksimum Kuvvet (kN)	Soğurulan Enerji (J)
Taban tabana 1	1.73	45729
Taban tabana 2	2.0	48167
Uç uca 1	1.74	41199
Uç uca 2	2.0	47793



Şekil 4.9. Taban tabana yapıştırılan numunelerin kuvvet deplasman grafikleri

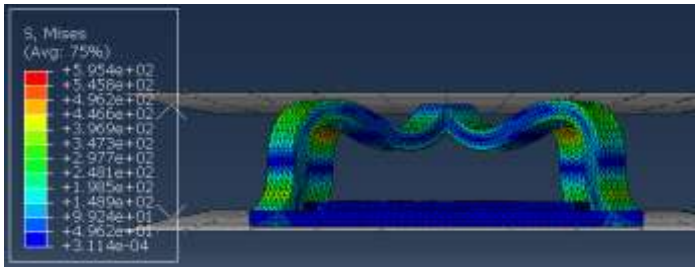


Şekil 4.10. Uç uca yapıştırılan numunelerin kuvvet deplasman grafikleri

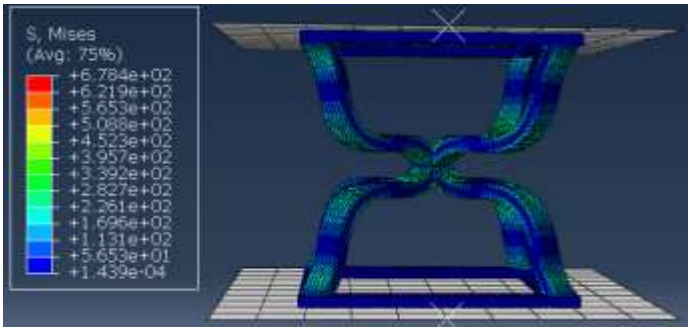
4.3. Sayısal Analiz Bulguları

1- Birim hücreler için gerçekleştirilen basma analizleri

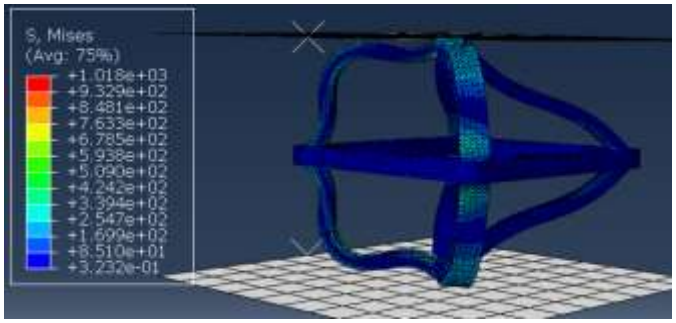
Sayısal analiz için Abaqus V17 kullanılmıştır. Hücreler bir bütün olarak Catia V5 programında modellendikten sonra Abaqus'e aktarılmıştır. Sınır koşulu olarak üst plaka ile parça arasında sürtünme katsayısı 0.4 olacak şekilde genel kontak tanımı yapılmıştır. Alt plaka ankastre şeklinde sabitlenmiş, üst plakanın hareketi düşey yön hariç engellenmiştir. Ayrıca üst plakaya sabit hız tanımı yapılmış ve düşey yönde 1000 mm/saat değer girilmiştir.



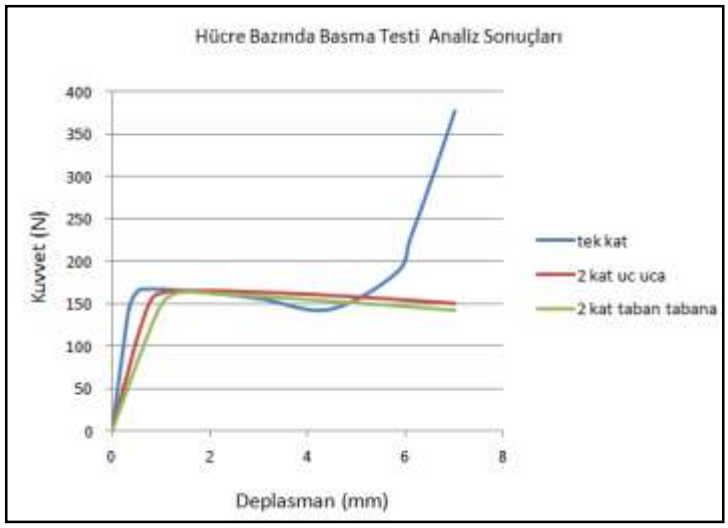
Şekil 4.11. Tek katlı hücre yapısında gerçekleştirilen basma analizinin görüntüsü



Şekil 4.12. Çift katlı ve uç uca ekli hücre yapısında basma analizi görüntüsü



Şekil 4.13. Çift katlı ve taban tabana hücre yapısında basma analizi görüntüsü



Şekil 4.14. Basma analizlerinin kuvvet- deplasman grafikleri

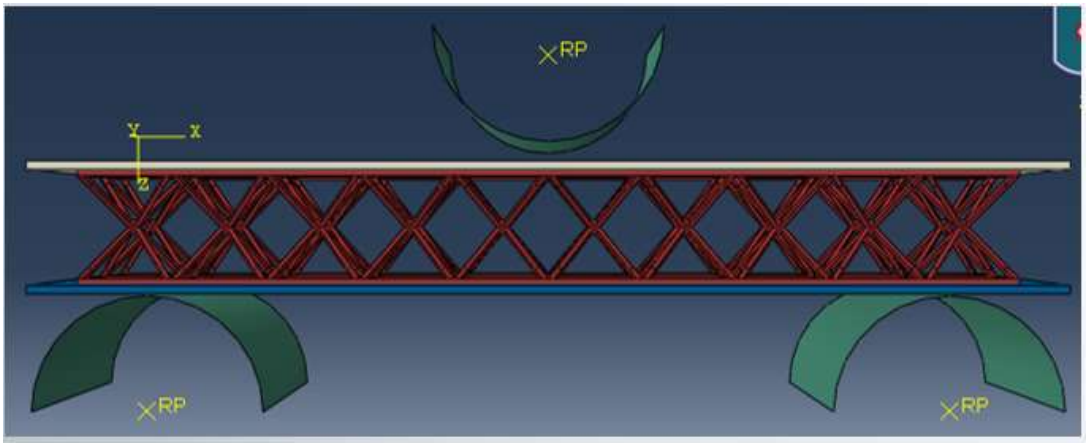
Şekil 4.14 'te görüldüğü üzere çekirdek geometrisi ve tabaka sayısının çekirdeğin eksenel yük taşıma kapasitesi üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı, sadece soğurulan enerji miktarının minimal düzeyde değiştiği görülmüştür. Ancak açık bir şekilde görülmektedir ki, katman sayısının artması plato bölgesinin artmasını sağlamaktadır. Dolayısı ile sandviç çekirdeklerinin enerji sönümleme davranışı açısından beklenen en

önemli özelliği olan plato bölgesinin (yük artmadan şekil değiştirme gerçekleşen bölge) yüksek olması beklentisi sağlanmaktadır. Deneylerden elde edilen sonuçlarda da aynı deformasyon davranışı görülmektedir (Şekil 4.4).

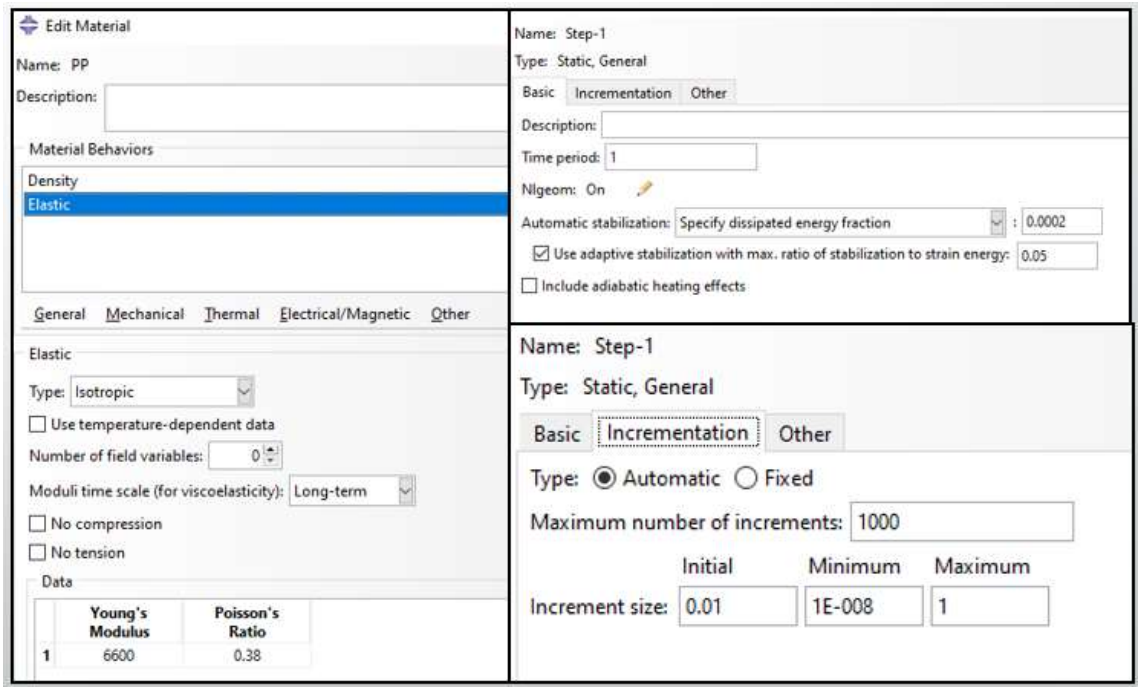
2- Sandviç Plakalar için Gerçekleştirilen Üç Nokta Eğilme Analizleri

Plakalar için gerçekleştirilen üç nokta eğilme analizlerinde araştırılan konulardan bir tanesi 2 katman ve 1 katman arasındaki dayanım farkının belirlenmesi ve bununla birlikte çekirdek yapının oluşturulma biçiminin (taban tabana veya uç uca) sandviç plakaların tokluk ve mukavemeti üzerindeki etkilerin belirlenmesidir.

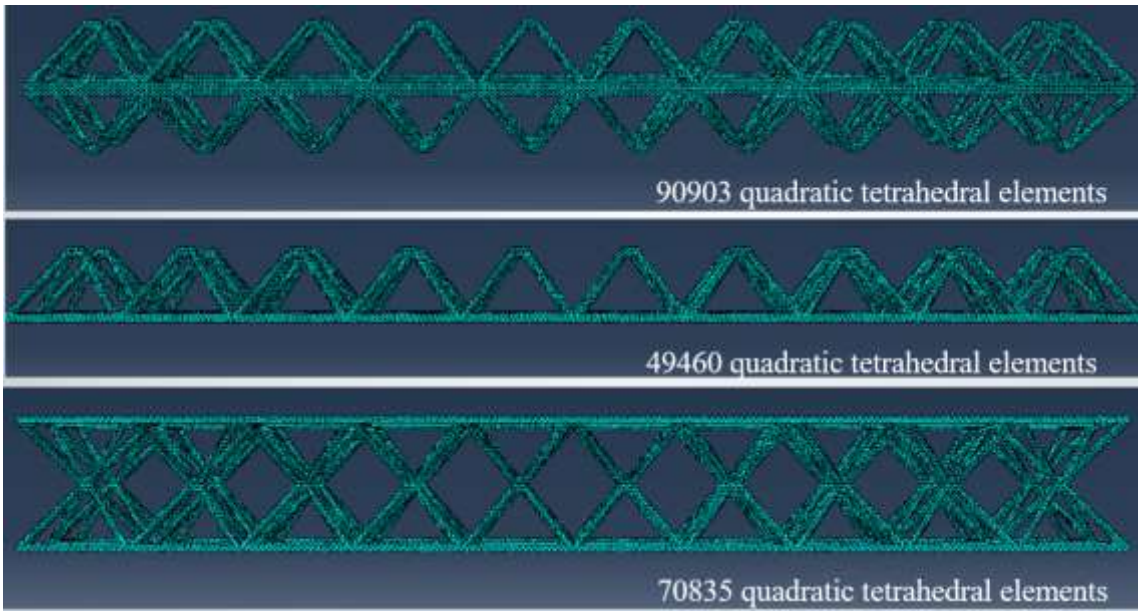
Çekirdek geometri bir bütün olarak Catia V5 programında modellendikten sonra Abaqus'e aktarılmıştır. Sınır koşulu olarak, üst plaka-yük mesneti ve alt plaka- destek mesnetleri arasında sürtünme katsayısı 0.4 olacak şekilde 'tangential' ve 'normal' davranış tanımı yapılmıştır. Destek mesnetleri ankastre şeklinde sabitlenmiş, yük mesneti plakadan 3 mm yukarıda konumlandırılmış ve hareketi düşey yön hariç engellenmiştir. Malzeme değerleri daha önce PP/Karbon bileşimi filamentin çekme deneyinden elde edilmiştir. Dolayısıyla analizde malzeme tanımı yapılırken izotropi tanımlanmış elastisite modülüsü 6600 MPa, poisson oranı ise 0,38 girilmiştir (Şekil 4.16). Mesh eleman olarak quadratic tetrahedral elemanlar kullanılmıştır. (Şekil 4.17)



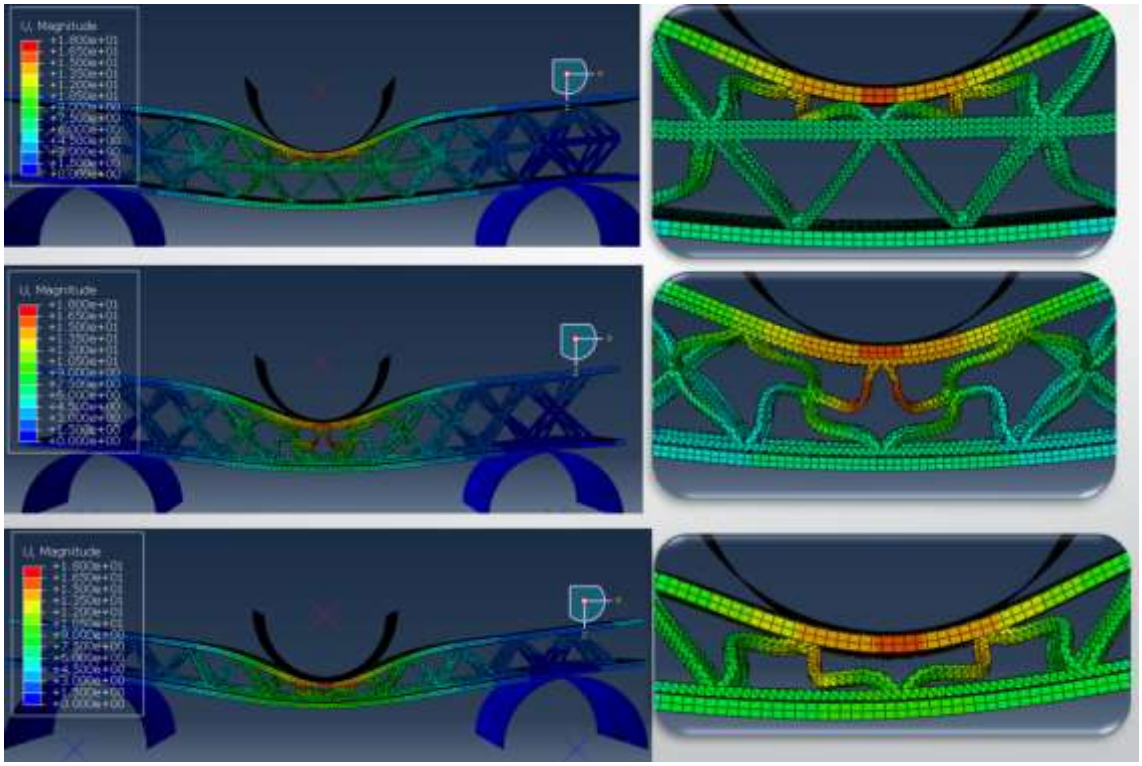
Şekil 4.15. Analizde kullanılan üç nokta eğilme düzeneği tasarımı



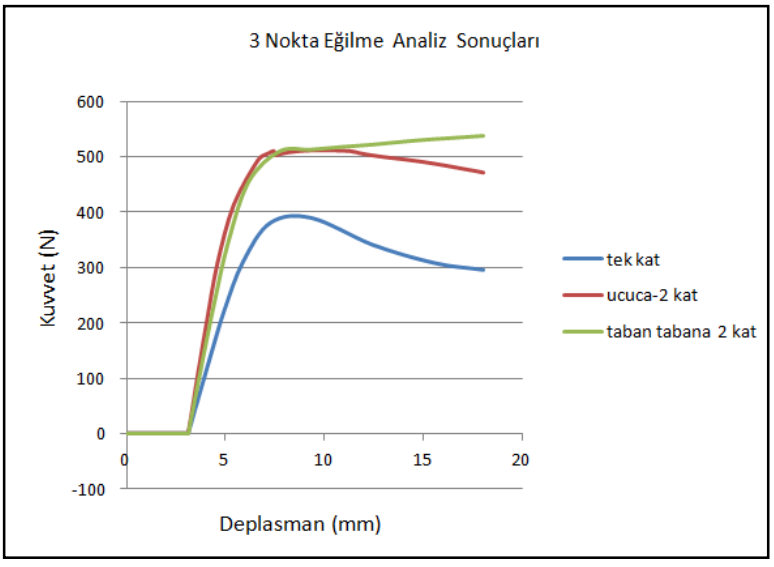
Şekil 4.16. Malzeme değerleri ve çözüm adımı parametreleri



Şekil 4.17. Analizde kullanılan mesh eleman çeşidi ve sayıları



Şekil 4.18. Yukarıdan aşağıya sırasıyla; taban tabana, uç uca eklenmiş ve tek katlı çekirdek yapıların analizinden elde edilen deformasyon görüntüleri



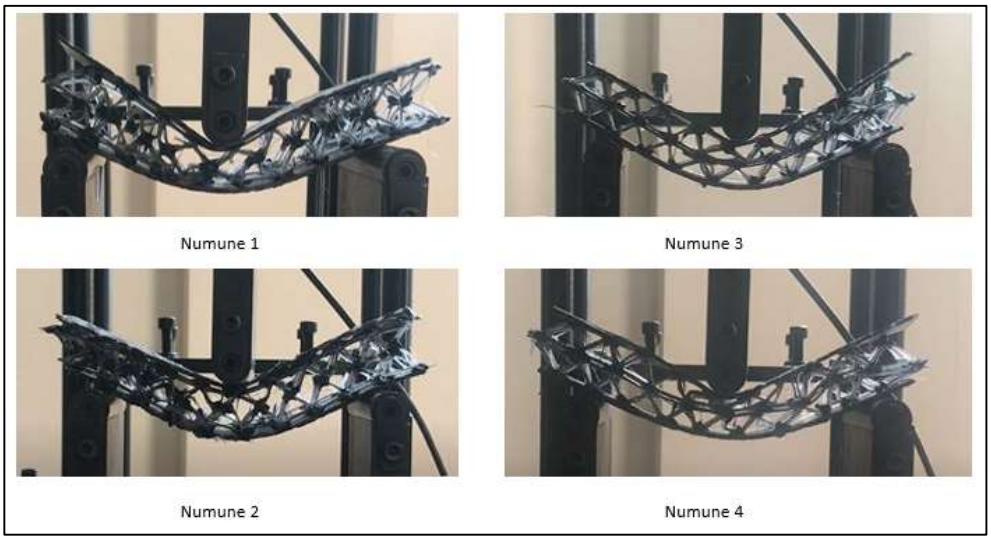
Şekil 4.19. Üç nokta eğilme analizlerinin kuvvet-deplasman grafikleri

Grafikte görüldüğü üzere, çift kat sandviç plakaların dayanımı tek kat sandviç plakaya göre %30 daha fazladır. Bu artışı sağlayan mekanizma sandviç plakanın kesit alanında

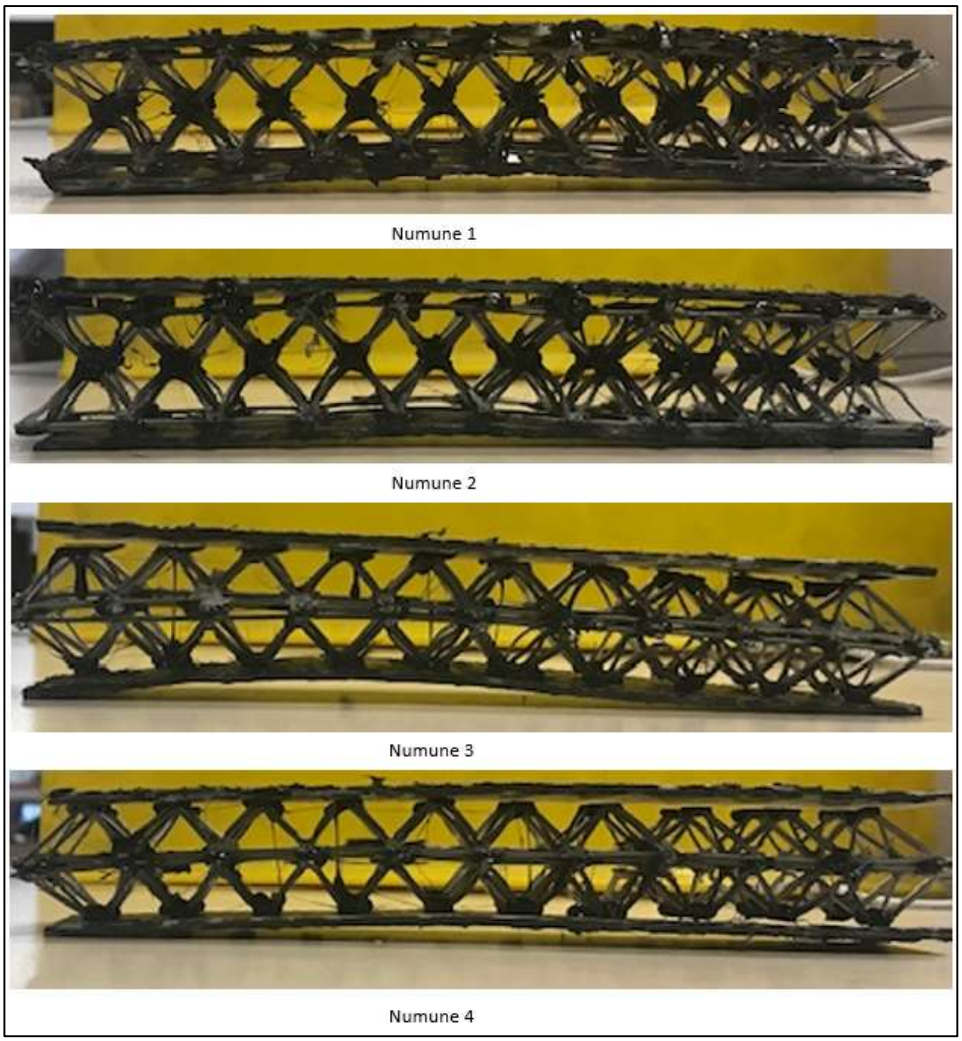
ve dolayısıyla alan atalet momentindeki artıştır. Fakat çekirdek yapı içerisindeki taban tabana veya uç uca birleşme biçiminin mukavemete etkisinin olmadığı görülmüş ve sadece taban tabana birleşmiş yapının enerjiyi soğurma miktarının minimal düzeyde fazla olduğu tespit edilmiştir

4.4 Kafes Yapılı Çekirdeğe Sahip Sandviç Malzemelerin Deformasyon Sonrası Toparlanma Davranışı

Yukarıda verilen statik, dinamik deneysel veriler ve Sonlu Elemanlar Analiz sonuçlarına göre kafes yapılı sandviç çekirdek malzeme elasto-plastik davranış göstermektedir. Bu davranış ona yüksek darbe sönümleme kabiliyeti kazandırmaktadır. Mühendislik malzemelerinde görülen elasto-plastik davranıştan farklı olarak, deney sonrası belli bir süre sonra deforme olan sandviç çekirdeğinin bağlantı noktalarında bir kopma gerçekleşmediği durumlarda yüksek değerde bir toparlanma gösterdiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak çekirdekte görülen ve plastik şekil değiştirmeye veya köpük yapılardaki plato bölgesinde oluşan ezilmeye karşılık gelen davranış, başka bir ifade ile yük artmadığı halde deplasmanın büyük şekil değiştirmeler yapacak şekilde artmış olması, malzemenin plastik şekil değiştirmesinden veya hücre duvarlarının içe çökmesinden değil kafes yapıyı oluşturan tek boyutlu mono kompozit elemanların elastik burkulma davranışından kaynaklanmaktadır. Burkulma esnasında içerisinde karbon elyaf bulunan PP matristen oluşan mono kompozit çubuklar gösterdiği elastik davranışı geri vermek sureti ile zaman içinde sandviç çekirdeğinin eski boyutlarına yakın hale geri dönmesini sağlamıştır. Şekil 4.21'de testlerden 14 gün sonra çekilmiş numune görüntüleri bulunmaktadır. Şekil 4.20'de bulunan test esnasındaki deformasyon görüntüsü de karşılaştırma amacı ile bu şekle dahil edilmiştir. Ayrıca geri toparlanma oranını belirleme adına, testlerden 14 gün sonra alt ve üst plakalarda ölçülen kalıcı deplasman miktarları tablo halinde verilmiştir.



Şekil 4.20. Numunelerin test esnasındaki deformasyon görüntüleri



Şekil 4.21. Testten 14 gün sonra çekilen kalıcı deformasyon görüntüleri

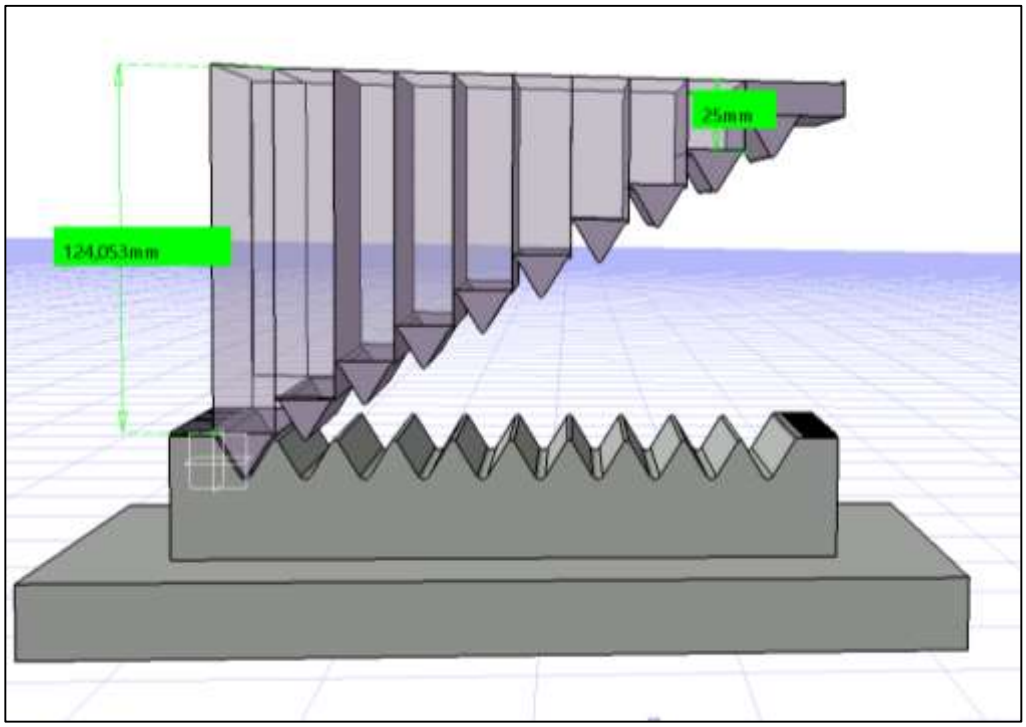
Çizelge 4.2. Numunelerin kalıcı deformasyon miktarları

Numune Adı	Kalıcı Deformasyon miktarı (mm)
Numune 1	7
Numune 2	5
Numune 3	5
Numune 4	3

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Numunelerde yapılan testler sonucunda, birleşme noktalarından birbirine iyi kaynamış olan numunelerde burkulmalar meydana gelirken, birbirine iyi kaynamayan hücrelerde piramit kafes geometrili çekirdeğin kenarları bağlantı yerlerinden ayrılmıştır. Söz konusu burkulma davranışı nedeni ile çekirdek yapı elasto-plastik malzeme davranışı göstermiştir. Bu davranış ise piramit kafes yapılı çekirdekli sandviç yapılara güçlü bir darbe sönümleme yeteneği kazandırmıştır. Yüksek plastik davranış göstermiş numunelerin zamana bağlı olarak ilk boyutlarına yakın değere gelecek şekilde bir geri toparlanma gösterdiği tespit edilmiştir. Bu ise bağlantı noktalarından deforme olmayacak şekilde iyi bir üretim gerçekleştirilmiş, monokompozit karbon/pp filamentler ile oluşturulacak piramit kafes yapıların uzun ömürlü darbe sönümleme özelliği ile avantaj oluşturabileceğini göstermektedir.

Ayrıca üretim kalıbında yaşanan bazı problemler ve yapıştırıcı miktarının kontrol edilemeyişi, numunelerin birbirinden farklı olmasına sebep olmuştur. Filamentlerin ilk kalıpta kopması ve kesitinin incelmesi probleminin üstesinden gelebilmek için ilk kalıbın Şekil 5.1 deki gibi kademeli üretilmesi birim hücrelerin mukavemetini artıracaktır. Tabi ki böyle bir proseste filamenti sabit ve düşük kuvvette düz tutacak bir makara mutlaka olmalıdır. Kademeli olarak şekil verecek üst kalıp pnömatik sistem varlığında kademeli olarak kursunu tamamlayabilir.



Şekil 5.1 İlk şekil verme kalıbının yerine önerilen kademeli şekil verme prosesinin 3D tasarım görüntüsü

Tez çalışmamda incelenen konulardan biri olan piramit kafes yapılı çekirdek katman sayısındaki artışın sandviç plakanın mukavemetinin ve soğurduğu enerjinin artmasını sağladığı sonlu elemanlar analizi ile anlaşılmıştır. Bu sebeple reelde gerçekleştirilen üç nokta eğilme testlerinde sadece çekirdek yapının oluşturulma biçiminin (taban-tabana veya uç-uca) etkisi incelenmiş ve mukavemet üzerinde bir etkiye sahip olmadığı ancak deformasyon miktarını önemli ölçüde arttırdığı veya başka bir ifade ile çekirdek yapının plato bölgesin büyümesine yol açtığı görülmüştür. Bu sayede çekirdek katman sayısı arttıkça sandviç malzemenin darbe enerjisi sönümleme kapasitesinin artacağı görülmektedir. Aynı şekilde Sonlu Elemanlar Analiz sonuçları da bu yargıyı desteklemektedir.

Bu çalışmada elde edilen üç nokta eğilme testinin sonuçları, Akbulut (2018) tarafından gerçekleştirilen ve aynı malzemeler ile üretilmiş sandviç malzeme test sonuçlarıyla karşılaştırıldığında 6 kat fazla olduğu görülmüştür. Akbulut çalışmasında kullanılan sandviç malzeme, sunulan bu çalışmadan farklı olarak, karbon/PP monokompozit piramit yapılı kafes çekirdek yapı tek katman olarak kullanılmıştır. Sunulan çalışmada,

farklı olarak çekirdek geometrisinde çift katlı kafes yapı kullanılmıştır. Sandviç kirişin yüzey plakalarının tarafsız düzlemden iki katı uzaklaşması sağlanmıştır. Bu sayede üst ve alt plakaların hasara uğraması için gerekli mukavemet değeri iki katına çıkarılmıştır. Ayrıca, çekirdek yapının kesit alan atalet momenti de yükselmiştir. Bir başka neden olarak da, kafes çekirdek yapı oluşturulurken, sunulan tez çalışmasında Akbulut (2018) tarafından yapılan çalışmadan farklı olarak kalıpta ön şekil almış sürekli filament kullanılmış ve kafes yapının eğilme rijitliği yükseltilmiştir.

KAYNAKLAR

Agarwal, B.D., 1980. Analysis and performance of fiber composites, Wiley- Interscience, New York, , 355 pp

Akbulut G., 2018 . Sürekli Karbon Elyaf Takviyeli Termoplastik Monokompozit Filament Esaslı, Kafes Geometrili Çekirdek Yapıların Kullanıldığı Hafif Sandviç Paneller Geliştirilmesi Ve Statik Ve Dinamik Yükler Altında Performansının Deneysel Olarak Belirlenmesi, Uludağ Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Altınel, E., 2006. Kompozitlerin Darbe Davranışına, İmpektör Geometrisi, Plaka Boyutu ve Kalınlığın Etkisi, Bitirme projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine mühendisliği Bölümü

Ataş,A.2018. Balıkesir Üniversitesi, Kompozit Malzemelere Giriş Ders Notu

Danacıoğlu,K.,2013.Özgün Petek Yapılı Sandviç Kompozit Panelin Üretimi ve Düşük Hızlı Darbe Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı,Kayseri

Ersoy, M. S., 2005. Lif Takviyeli Kompozit Malzeme Tasarımı, K. Maraş Sütçü İmam Üniversitesi ,Fen Bilimleri Enstitüsü , Tekstil Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi

Finnegan, Kevin A., 2007 . Carbon Fiber CompositePyramidal Lattice Structures , University of Virginia ,Master of Engineering (Engineering Physics) Thesis

Güçlü,H.,Can,Y.,Türkoğlu,İ.K.,Yazıcı,M. 2018.The bending response of carbon fiber reinforced thermoplastic mono-composite pyramidal lattice truss core sandwich structures. 9th. International Automotive Technologies Congres,OTEKON 2018,7-8 Mayıs 2018,Bursa.

J.Xiong , L.Ma , A.Vaziri , J.Yang, L.Wu , **2012** . Mechanical behavior of carbon fiber composite lattice core sandwich panels fabricated by laser cutting , Acta Materialia, Volume 60, Issues 13–14, August 2012, Pages 5322-5334

Mallick, P. K., 1988. Fiber-Reinforced Composites Materials, Manufacturing and Desıgn**" ,** Marcel Dekker Inc., New York, 469 pages

Mazumdar,S.K., 2002. Composite Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering," CRC Press LLC, 392 pp

OTO4003, 2017 Otomotiv Mühendisliği Laboratuvarı Deney Föyü,Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Bursa .

Philips, L.N.,1989. Design with Advanced Composite Materials. Biddles Ltd., Guilford and Kings Lynn, Great Britain.

Pişkin, E.,1999. Polimerler II Mühendislik Polimerleri. Pagyay Yayıncılık, İstanbul, 145s.

Rosato ,V.R.,1997. Designing with Reinforced Composites. Carl Hanser Verlag, New York, 1997

Sha Yin , Haoyu Chen, Yaobo Wu, Yibing Lid, Jun Xu ,2018. Introducing composite lattice core sandwich structure as an alternative proposal for engine hood , Composite Structures 201 (2018) 131–140

Shuting Liu, Yingguang Li , Nanya Li ,2017 . A novel free-hanging 3D printing method for continuous carbon fiber reinforced thermoplastic lattice truss core structures,Materials and Design 137 (2018) 235–244

Türkmen ,İ., 2012. Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin ve Darbe Dayanımının İncelenmesi, yüksek lisans tezi, Celal Bayar Üniversitesi , Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Wang, B., Wu L., Ma L., Sun, Y.,Du,,S., 2010. Mechanical behavior of the sandwich structures with carbon fiber-reinforced pyramidal lattice truss core , Materials and Design 31 (2010) 2659–2663

Xiaodong Li, Linzhi Wu, Li Ma, Xiangqiao Yan , 2016 . Effect of temperature on the compressive behavior of carbon fiber composite pyramidal truss cores sandwich panels with reinforced frames , Theoretical and Applied Mechanics Letters 6 (2016) 76–80

Yang Hu , Wanxin Li, Xiyue An , Hualin Fan, 2016. Fabrication and mechanical behaviours of corrugated lattice truss composite sandwich panels, Composites Science and Technology 125 (2016) 114-122

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ece GÜRCAN SEVİNÇ
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa / 18.06.1989
Yabancı Dil : İngilizce / İleri Seviye
Fransızca / Orta Seviye
Eğitim Durumu
Lise : Bursa Ali Osman Sönmez Fen Lisesi 2003-2007
Lisans : Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği 2007-2011
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği 2015-2019

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : **Ford Otosan Otomobil Fabrikası**
Kalıp Proses Mühendisi 2012-2014
Oyak Renault Otomobil Fabrikaları
Araç Mimari Sorumlusu 2014 -….

İletişim (e-posta) : ecegurcan@hotmail.com

Yayınları : Sevinç E., Can Y., Türkoğlu İ.K, Yazıcı M., "Continuous Carbon Fiber/Polypropylene Thermoplastic Composite Based Multilayer Pyramidal Lattice Core Ultra-Light Sandwich Panels" 6th International Conference On Computational And Experimental Science And Engineering (ICCESEN-2019) 23-27 October 2019, Kemer/Antalya/Turkey