

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**KARBON FİBER DESTEKLİ
POLİMER KOMPOZİT
PASARELLA TASARIM VE ÜRETİMİ**

Doruk Erdem YUNUS

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hasan YILDIZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 625.01.00.

Sunuş Tarihi : 14.12.2011

Bornova-İZMİR

2011

Doruk Erdem YUNUS tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “Karbon Fiber Destekli Polimer Kompozit Pasarella Tasarım ve Üretimi” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:**İmza**

Jüri Başkanı	:
Raportör Üye	:
Üye	:

ÖZET

KARBON FİBER DESTEKLİ POLİMER KOMPOZİT PASARELLA TASARIM VE ÜRETİMİ

YUNUS, Doruk Erdem

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Bölümü

Tez Yöneticisi: Prof. Dr. Hasan YILDIZ

Aralık 2011, 73 sayfa

Denizcilikte kullanılan Pasarella, tekne ve kara arasında geçiş sağlayan geçici bir köprüdür. Bir pasarellanın ağırlığı, özellikle kullanım kolaylığı açısından değerlendirilmesi gereken önemli bir kriterdir. Geleneksel malzemelerden üretilmiş yüksek bir taşıma kapasitesine sahip pasarellanın ağırlık gibi bir dezavantajı varken, hafif bir pasarellanın taşıma kapasitesi düşüktür. Karbon fiber destekli polimer kompozit pasarella bu iki probleme de çözüm getirir. Hafiftir ve daha fazla taşıma kapasitesine sahiptir.

Bu bağlamda, hedeflenen yüke dayanabilen ve ağırlığı minimize edilmiş bir pasarella başarılı bir üretimin temel koşuludur. Bu çalışmada, karbon fiber destekli polimer kompozit pasarellanın bu temel koşul çerçevesinde tasarımı ve üretimi hedeflenmiştir. Pasarella geometrisi ve yapısı, bilgisayar destekli tasarım ve mühendislik yazılımları kullanılarak tasarlanmıştır. Belirlenen bu tasarımın prototip üretimi yapıp, ardından deplasman testi uygulanmıştır. Ayrıca değişik dizilimler, sonlu elemanlar programı kullanılarak analiz edilmiştir. Oluşan gerilmeler ve deplasmanlar prototip test sonuçlarıyla kıyaslanarak analizin doğruluğu araştırılmıştır.

Anahtar sözcükler: Pasarella, karbon fiber destekli polimer (KFP) kompozit, sonlu elemanlar yöntemi.

ABSTRACT

**DESIGN AND MANUFACTURING OF
CARBON-FIBER-REINFORCED POLYMER COMPOSITE
GANGWAY**

YUNUS, Doruk Erdem

MSc in Mechanical Eng.

Supervisor: Prof. Dr. Hasan YILDIZ

December 2011, 73 pages

Gangway, used in shipping, is a temporary bridge that allows passing between the boat and land. The weight of a gangway is an important criterion that should be considered, especially in terms of ease of use. A gangway made of traditional materials has several disadvantages. While the ones with a good carrying capacity have a disadvantage of weight, on the other hand the carrying capacity of a light gangway is weak. The carbon fiber reinforced polymer composite gangway brings solution to both of these problems. It is light and has the capacity to carry more.

In this context, a gangway, which can withstand to the intended load with minimum weight, is the basic condition for a successful production. In this study, the design and production of the carbon fiber reinforced polymer composite gangway are targeted within the framework of this basic condition. Gangway's shape and structure were designed using computer aided design and engineering software. After the producing of this design, the displacement test was performed. In addition different sequences were analyzed using the finite element program. By comparing analysis with the test results, the accuracy of the finite element analysis was examined.

Keywords: Gangway, carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) composite, the finite elements method.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince gerekli verilerin sağlanmasında kolaylık gösteren Norm Denizcilik Gemi San. Ltd. Şti. çalışanlarına, özellikle kıymetli görüşlerinden yararlandığım ve yakın ilgisini esirgemeyen sayın Prof. Dr. Hasan Yıldız'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACTvii
TEŞEKKÜR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxii
1.GİRİŞ	1
1.1 Pasarella Çeşitleri	2
1.1.1 Taşınabilir tip katlanır veya sabit pasarella	2
1.1.2 Montajlı teleskopik pasarella	3
1.1.3 Montajlı katlanır pasarella	4
1.1.4 Kasalı pasarella	4
1.1.5 Özel imalat pasarellalar	7
1.2 Tez Çalışmasının Amacı	9
2.KOMPOZİT MALZEMELER	9
2.1 Kompozit Teknolojisinin Kullanım Alanları	10
2.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları	11

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.3 Kompozitlerin Gemi ve Denizcilik Yapılarında Kullanılma Nedenleri	13
3.DENİZCİLİKTE KULLANILAN KOMPOZİT MALZEME BİLEŞENLERİ	15
3.1 Elyaflar.....	15
3.1.1 Denizcilikte yaygın kullanılan elyaf türleri	15
3.1.2 Elyaf dokuma biçimleri.....	19
3.2 Matris Malzemesi.....	21
3.2.1 Polyester reçine matrisler.....	23
3.2.2 Vinylester reçine matrisler	24
3.2.3 Fenolik reçine matrisler	24
3.2.4 Epoksi reçine matrisler.....	24
3.3 Sandviç Malzemeler.....	26
3.3.1 Ahşap sandviçler	27
3.3.2 Köpük sandviçler	28
3.3.3 Bal peteği sandviçler.....	28
3.4 Prepreg Malzemeler	29
4. KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	30
4.1 Elle Yayma Yöntemi.....	30

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.2 Püskürtme Metodu.....	31
4.3 Vakum Torbalama ve Otoklav Yöntemleri	31
5. PASARELLA TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ.....	35
5.1 Pasarella Tasarımı.....	35
5.2 Prototip Pasarela Üretimi.....	36
5.2.1 Prepreg malzemenin kesilmesi ve malzemenin kür işlemine hazırlanması	36
5.2.2 Seçilen üretim yöntemi	38
5.2.3 Pasarellanın kürleştirilmesi.....	41
5.2.4 Pasarellanın test edilmesi.....	43
6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MEKANİK ANALİZ VE TASARIM İYİLEŞTİRMELERİ	44
6.1. Sonlu Elemanlar Metodu	44
6.1.1 Sonlu elemanlar metodunun uygulanışı ve cismin sonlu elemanlara bölünmesi.....	45
6.1.2 Eleman direngenlik matrisinin elde edilmesi	46
6.2 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Mekanik Analiz.....	46
6.2.1 Malzeme özelliklerinin girilmesi.....	47

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6.2.2 Analizde kullanılacak prepreg dizilimlerinin belirlenmesi	49
6.2.3 Sonlu elemanlar yönteminde kullanılacak modelin oluşturulması	49
6.2.4 Sınır koşullarının ve yük koşullarının belirlenmesi	50
6.2.5 Çözüm	51
6.2.6 Deplasman testiyle bilgisayar analizinin kıyaslanması.....	52
6.2.7 Değişik dizilimlerin araştırılması.....	53
6.3 Tasarım İyileştirmeleri	67
6.4 Analizlerin Tekrarlanması.....	68
7. SONUÇ	69
KAYNAKLAR DİZİNİ	71
ÖZGEÇMİŞ	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Örnek bir Pasarella	1
1.2 Sabit tip taşınabilir pasarella	2
1.3 Katlanır tip taşınabilir pasarella.....	3
1.4 Montajlı 3 kademeliteleskopik tip pasarellanın açık hali	3
1.5 Montajlı katlanır pasarella.....	4
1.6 Tek kademeli kasalı pasarella.....	5
1.7 Tek kademeli kasalı basamaklı pasarella	5
1.8 İki kademeli kasalı pasarella	6
1.9 Üç kademeli kasalı pasarella	6
1.10 Döner tip kasalı pasarella	7
1.11 Döner tip kasalı pasarellanın dönüş mekanizması.....	7
1.12 Yük kaldırmada kullanılan pasarella	8
1.13 Kasalı basamaklı tip pasarella	8
3.1 Düz Dokuma.....	19
3.2 Çapraz dokuma	20
3.3 Saten dokuma	20

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.4 Kıvrımsız kumaş	21
3.5 Sandviç bir yapının temel elemanları	26
3.6 Çeşitli petek yapıli kompozit uygulamaları (a) Helikopter, (b) Uydu, (c) Yat, (d) Bisiklet	27
4.1 Vakum torbalama uygulaması	32
4.2 Otoklav uygulaması	33
4.3 Vakum torbalama uygulamasında kullanılan yardımcı elemanlar	33
5.1 Pasarellanın montajlı hali.....	35
5.2 Alüminyum iskelet modeli.....	35
5.3 Alüminyum menteşe modeli	36
5.4 Alüminyum iskelete sarmak üzere kesilmiş prepreg tabakaları	37
5.5 Prepreg tabakaların alüminyum iskelete sarılışı	37
5.6 Prepreg tabakaların alüminyum iskelete sarılı hali.....	37
5.7 Malzemenin kür işlemine hazırlanması	38
5.8 SGL Firması tarafından E201 için verilen kür çevrimi	38
5.9 Kürleştirme işlemi için tasarlanan otoklav modeli	39
5.10 Rezistansların ve serpantin otoklav içerisindeki yerleşimi.....	39

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.11 Üretilen sıcaklık ve basınç kontrollü otoklavın son hali	40
5.12 Otoklav kür grafiği	40
5.13 Numunenin kesilmiş kenar görüntüsü-1	41
5.14 Numunenin kesilmiş kenar görüntüsü-2.....	41
5.15 Pasarella üretimine ait otoklav kür grafiği-1	42
5.16 Pasarella üretimine ait otoklav kür grafiği-2	42
5.17 Prototip kompozit pasarella.....	43
5.18 Uygulanan deplasman testinin şematik görüntüsü	43
5.19 Prototip pasarellanın deplasman testi sonuçları	43
6.1 Modeldeki dairesel kesitlerin çokgen şekline getirilmesi	49
6.2 Elemanlarına ayrılmış pasarella modeli	50
6.3 Pasarellanın tekneye sabit mesnetli olarak bağlanan tarafı	50
6.4 Pasarellanın iskelede hareketli olarak mesnetli tarafı	51
6.5 Pasarellaya uygulanan 1000N yayılı yükün konumu	51
6.6 Pasarella prototip dizilimi ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi.....	52
6.7 Pasarella prototip dizilimi ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği.....	52

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.8 Analiz ve test sonuçlarının karşılaştırılması	52
6.9 Pasarella 2. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi	54
6.10 Pasarella 2. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği	54
6.11 Pasarella 3. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi	54
6.12 Pasarella 3. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği	55
6.13 Pasarella 4. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi	55
6.14 Pasarella 4. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği	55
6.15 Pasarella 5. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi	56
6.16 Pasarella 5. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği	56
6.17 Pasarella 6. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi	56
6.18 Pasarella 6. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği	57

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.19 Pasarella 7. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi.....	57
6.20 Pasarella 7. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği.....	57
6.21 Pasarella 8. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi.....	58
6.22 Pasarella 8. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği.....	58
6.23 Pasarella 9. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi.....	58
6.24 Pasarella 9. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği.....	59
6.25 Pasarella 10. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi.....	59
6.26 Pasarella 10. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği.....	59
6.27 Pasarella 11. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi.....	60
6.28 Pasarella 11. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği.....	60
6.29 Pasarella 12. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi.....	60

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.30 Pasarella 12. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği.....	61
6.31 Pasarella 13. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi	61
6.32 Pasarella 13. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği.....	61
6.33 Pasarella 14. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi	62
6.34 Pasarella 14. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği.....	62
6.35 Pasarella 14. Dizilim ile modellenmişken von mises gerilmelerinin dağılımı ve kritik olan bölge	66
6.36 Pasarella 14. Dizilim ile modellenmişken σ_{11} gerilmelerinin dağılımı ve kritik olan bölge	66
6.37 Pasarella 14. Dizilim ile modellenmişken σ_{22} gerilmelerinin dağılımı ve kritik olan bölge	66
6.38 Pasarellanın tasarımı iyileştirildikten sonraki dizilim ve kesitleri.....	67
6.39 Pasarella tasarım iyileştirmesine göre modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi.....	68
6.40 Pasarella tasarım iyileştirmesine göre modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Cam elyafın mekani özellikleri.....	17
3.2 Bazı matris malzemelerinin özellikleri.....	22
4.1 Vakum torbalama ve otoklav işlemleri karşılaştırması	32
6.1 SIGRAFIL® CE 1201-230-39 UD prepreg özellikleri	48
6.2 SIGRATEX® CE 8204-410-42S 2x2 twill prepreg özellikleri.....	48
6.3 UD prepreglerde analiz sonuçlarının değerlendirilme tablosu	63
6.4 Twill prepreglerde analiz sonuçlarının değerlendirilme tablosu	64
6.5 Analiz sonuçlarına göre dizilimlere bağlı deplasman değerleri ve pasarella ağırlıkları.....	65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
K	Direngenlik matrisi.
U	Düğüm yer değiştirmeleri
P	Düğüm dış kuvvetleri
σ_{mises}	Von Mises gerilmesi.
σ_{11}	Fiber doğrultusunda gerilme
σ_{22}	Fibere dik doğrultuda gerilme
<u>Kısaltmalar</u>	
KFP	Karbon fiber destekli polimer.
PAN	Poliakrilonitril.
SAN	Stiren akrilonitril.
PVC	Polivinil klorür.
PET	Poliyeten tereftalat.
PVA	Polivinil Alkol.
FEM	Finite Element Method, Sonlu elemanlar yöntemi.
UD	Unidirectional, Eş yönlü

1. GİRİŞ

Pasarella, insanların bir noktadan diğerine geçmesine izin veren platform ya da geçit olarak tanımlanabilir. Çoğunlukla yolcuların gemilerden iniş ve binişlerinde kolaylık ve güvenlik sağlamak amacıyla kullanılan ahşap veya metal bir mekanizmadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Örnek bir pasarella (Fassmer)

Pasarellalar; büyük gemilerde araba ve kamyon gibi araçların, büyük kargoların geçişini sağlamak amacıyla da kullanılmaktadır. Ayrıca gemiden gemiye transferlerde de kullanımları yaygındır. Gemiden iniş ve binişler için kullanılabilmesinin dışında, tersane ve yat limanlarına geçit oluşturmak için de kullanılabilir.

Denizcilik sektöründe kullanılan başlıca iki tür malzeme vardır. Bunlar paslanmaz çelik ve alüminyumdur. Çelik, alüminyuma göre daha dayanıklıdır, fakat çok daha ağırdır. Öte yandan aynı ağırlıktaki karbon fiber destekli polimer (KFP); çelik ve alüminyuma kıyasla daha hafif, dayanıklı ve serttir. Bu özellikler KFP'yi dayanım ve hafifliğin ön planda olduğu uygulamalar için ideal malzeme haline getirir. Bu nedenden dolayı dayanıklı ve hafif malzemelerden yapıma eğilimindeki modern pasarellalarda KFP kullanımını artmaktadır.

1.1. Pasarella Çeşitleri

Pasarellalar genel olarak beş tipe ayrılabilir;

1. Taşınabilir tip pasarella
2. Montajlı teleskopik pasarella
3. Montajlı katlanır pasarella
4. Kasalı pasarella
5. Özel imalat pasarellalar

1.1.1. Taşınabilir tip pasarella

Şekil 1.2 ve şekil 1.3’de görülen taşınabilir tip pasarellalar tekne kıyıya yanaştığında tekneden karaya veya kıyıdan tekneye el ile uzatılarak kullanılmaktadır. İnsan gücü ile çalıştığı için hafif olması istenmektedir. Bu nedenle ahşap, alüminyum veya kompozit malzemelerden imal edilmektedir. Pasarellanın hareketini ve taşınmasını kolaylaştırmak için tekerlekler kullanılır. Yürüme platformunun her iki tarafına veya tek tarafına yolcuların üzerinden güvenle geçmesini sağlamak için gerilmiş halat şeritler kullanılır.



Şekil 1.2. Sabit tip taşınabilir pasarella (Denizdukanı)



Şekil 1.3. Katlanır tip taşınabilir pasarella (Marintekstore)

1.1.2. Montajlı teleskopik pasarella

Genel olarak teknenin arka kısmına monte edilerek sabitlenirler ve çoğunlukla iki kademeli ve ışıklı olarak imal edilirler. Pasarella tekneye bağlantı mapaları ile bağlanır (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Montajlı 3 kademeli teleskopik tip pasarellanın açık hali (Ezbercimarine)

Pasarellayı çalışmak ve dengede tutmak üzere bir hidrolik piston kullanılır. Bir diğer hidrolik piston ile de pasarellanın kademeleri açılır. Bu hidrolik pistonların bağlı olduğu hidrolik santral ise elektronik devrelerin uzaktan kumanda sayesinde otomatik kontrolü ile hareketi sağlar. Pasarella parlatılmış veya koruyucu bir kaplama ile kaplanmış paslanmaz çelikten taşıyıcı kollara sahiptir. Bu kolların üzerine genellikle tik ağacından kaplama yapılır. Yürüme platformunun tek tarafına yolcuların üzerinden güvenle geçmesini sağlamak için

şeritler yerleştirilir. Bu şeritlerin buldukları çubuklar bir yay sistemine bağlıdır ve bu yay sistemi sayesinde şeritler pasarellanın açılması ile açılır ve kapanması ile kapanırlar.

1.1.3. Montajlı katlanır pasarella

Montajlı katlanır tip pasarellada, teleskopik pasarelladan farklı olarak kademeler birbiri içerisinde hareket etmezler. Kademeler menteşe sistemleri veya üç kol mekanizmaları ile birbiri üzerine hidrolik pistonun tahriki ile katlanırlar (Şekil 1.5). Pasarella katlandığı için iki kademeli ve katlama pasarellanın orta kısmından olacak şekilde tasarım yapılır.



Şekil 1.5. Montajlı katlanır pasarella (İlyas Genç, 2007)

1.1.4. Kasalı pasarella

Pasarellanın kullanılmadığı zamanlarda kış aynaya montajlı pasarellalar gibi teknenin dışında değil tekne içerisinde kapalı bir hacim içerisinde durması istenir. Pasarellanın durduğu bu kapalı hacim kasa olarak adlandırılır. Pasarellanın tasarım şekli, tekne içerisinde pasarellanın sığacağı uygun bir yerin olup olmamasına göre belirlenir. Yer sıkıntısı olmaması halinde pasarella tek kademeli olarak yapılır (Şekil 1.6). Bu tip pasarellalar kasa içerisinden araba mekanizması ile çıkarılır ve pasarellanın açısı da bir piston sayesinde yanaşılan iskelenin konumuna göre ayarlanır.



Şekil 1.6. Tek kademeli kasalı pasarella (İlyas Genç, 2007)

Bazı teknelerde teknenin geometrisi tek kademeli pasarella yapımına uygun olmayabilir. Pasarella yukarı aşağı hareket ettiğinde tekne geometrisinden dolayı biniş ve inişleri zorlaştırıcı durumda pasarella kademesine geçişte sürekli düz kalacak bir basamak oluşturulur (Şekil 1.7). Bu tekneye iniş ve binişleri kolaylaştırır.



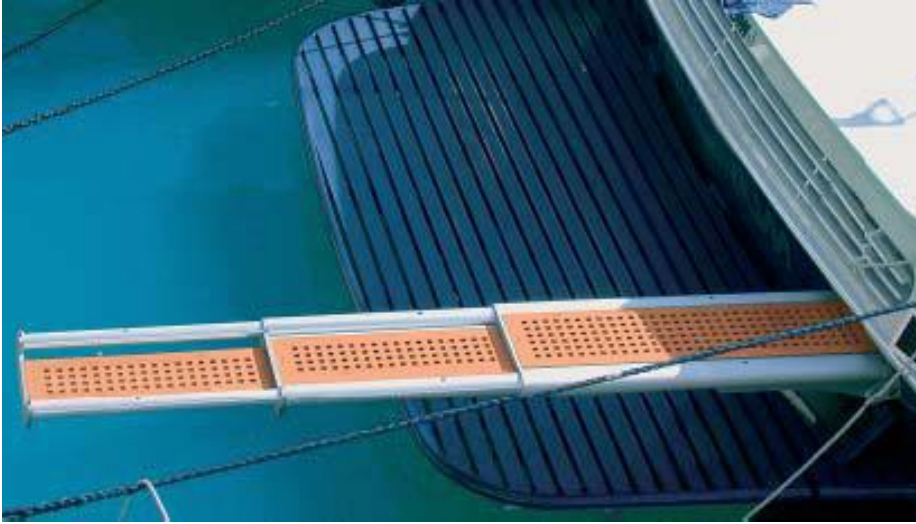
Şekil 1.7. Tek kademeli kasalı basamaklı pasarella (İlyas Genç, 2007)

Şekil 1.8’de görülen kasalı iki kademeli pasarella araba mekanizmasına bağlı bulunan teleskopik olarak açılıp kapanan iki kademedden oluşmaktadır. Kademeler birbiri içerisinde hareket eden (çalışan) belirli et kalınlığına sahip dikdörtgen veya silindirik profillerden oluşmaktadır. Pasarellaya isteğe bağlı olarak emniyet halatları ve platform aydınlatma düzenekleri de eklenmektedir.



Şekil 1.8. İki kademeli kasalı pasarella (İlyas Genç, 2007)

Üç kademeli kasalı pasarellalar otomatik kontrollü teleskopik kademelere sahiptir (Şekil 1.9). Üç kademeli pasarella uygulamalarında kademelerin hareketi iki türlü yapılabilmektedir.



Şekil 1.9. Üç kademeli kasalı pasarella (İlyas Genç, 2007)

1. Her bir kademe ayrı pistonlar ile açılıp kapatılır.
2. İkinci kademe bir piston sayesinde açıldıktan sonra üçüncü kademe halat-makara sistemi sayesinde açılıp kapanabilmektedir.



Şekil 1.10. Döner tip kasalı pasarella (Ezbercimarine)

Döner tip kasalı pasarella yukarı aşağı hareketi yanında sağa ve sola hareket de yapabilmektedir (Şekil 1.10). Bu hareket dönüş mekanizması ile sağlanmaktadır (Şekil 1.11). Bu sayede pasarellayı kıyıda en uygun yere pozisyonlandırmak kolaylaşır.



Şekil 1.11. Döner tip kasalı pasarellanın dönüş mekanizması (İlyas Genç, 2007)

1.1.5. Özel imalat pasarellalar

Özel imalat pasarellalar yük kaldırmak ve yüzme merdiveni olabilmek gibi asıl görevleri dışında ek özelliklere de sahip olan pasarellalardır.

1.1.5.1. Yük kaldırmada kullanılan pasarellalar

Bu pasarellalar yolcunun iniş binişi yanında teknede özel kullanım alanlarına da sahiptir. Bu pasarellalar tasarım esnasında kullanılacak fonksiyonuna uygun olarak tasarım yapılır. Şekil 1.12'de görüldüğü üzere bir botu tekneye almak veya denize indirmekte bir vinç görevi görecek pasarellanın profillerinin et kalınlığı ve emniyet katsayısı diğer pasarellalardan daha yüksek seçilir.



Şekil 1.12. Yük kaldırmada kullanılan pasarella (İlyas Genç, 2007)

1.1.5.2. Yüzme merdiveni olarak kullanılan pasarellalar

Pasarellanın yüzme merdiveni olarak kullanımlarında da pasarella bir kasa içerisinde muhafaza edilir ve kasalı basamaklı tip pasarella olarak adlandırılır (Şekil 1.13). Pasarellanın kasa içerisinden tekne dışarısına çıktığında pasarella tekneye biniş ve inişi sağlayan standart kullanım özelliğindedir. Ancak pasarellanın kol mekanizması bir pistonla tahrik edilir ve yatayla 90° açı yaparak belli bir miktar su içerisine girmesi sağlanır. Böylece pasarella yüzme merdivenine dönüşür ve kontrollü bir şekilde sudan tekneye veya tekneden suya giriş çıkışları sağlar.



Şekil 1.13. Kasalı basamaklı tip pasarella (Ezbercimarine)

Pasarellanın yüzme merdiveni uygulamalarında pasarella su ile uzun süreli temas ettiği için diğer uygulamalara göre daha çok korozyona maruz kalır. Bu etkiden pasarellayı korumak için pasarellanın imalatında korozyon direnci daha iyi olan paslanmaz çelikler seçilir. Bu tür paslanmaz çeliklerin talaşlı imalatlarının zorluğu nedeniyle çelik yerine kompozit malzemelerin kullanılması daha uygun olmaktadır.

1.2. Tez Çalışmasının Amacı

Bu çalışmada katlanır tip taşınabilir prototip bir pasarellanın tasarım ve üretimi konu edilmiştir. Üç boyutlu modellemede SolidWorks paket programı kullanılmıştır. Gerilme analizleri ise bir sonlu elemanlar analiz paket programı olan ABAQUS' de yapılmıştır. Gerçekleştirilen bu analizler ile alüminyum iskeleti çevreleyecek olan optimum karbon fiber dizilimleri belirlenmiştir. Bu prototip için en kritik durum olarak pasarellanın normal çalışma durumu olan tekerleklerin karaya basması ve üzerinde ortalama bir kişilik yük olması durumu değerlendirilmiştir. Bu kritik yükleme altında değişik dizilimlerin gerilme analizleri yapılmış ve seçilen emniyet katsayısına göre minimum ağırlık ve kalınlıklar belirlenmiştir. Seçilen dizilim ile prototip üretiminin yapılmasının ardından analiz koşulları ile eşdeğer koşullarda test edilmesi ve bu şekilde elde edilen test sonuçları ile sonlu elemanlar analizinin sonuçlarının kıyaslanması amaçlanmıştır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, belirli bir amaca yönelik olarak birbirine karışmayan iki veya daha fazla katının bileşimiyle meydana gelen malzeme grubudur. Doğadaki malzemelerin çoğu kompozit tanımına uyan bileşik yapıli maddelerden oluşur. Bu karışımın özelliği, kendini oluşturan maddelerin özelliklerinden çok daha üstün olmasıdır.

Kompozit malzemeler, alışılmış malzemelerden elde edilemeyecek fonksiyonellik ve estetiğin bir arada bulunduğu, optimum performansa sahip ürünlerin üretilmesini sağlar.

En tipik örnek, artık günümüzde gelenekselleşmeye başlayan ve "fiberglas" olarak bilinen polyeşter esaslı reçinelerin cam elyaf ile takviyesiyle üretilen malzemelerdir. Ancak bugün ileri kompozitler grubunda daha üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip elyaflar kullanılmaktadır.

2.1. Kompozit Teknolojisinin Kullanım Alanları

Kompozit malzemelerin bilinen en eski ve en geniş kullanım alanı inşaat sektörüdür. Saman ile liflendirilmiş çamurdan yapılan duvarlar ilk kompozit malzeme örneklerindedir. Bugün taş, kum, kireç, demir, ve çimento ile oluşturulan kompozit malzeme evlerimizi oluşturmaktadır. Kompozit malzemeye en güncel örneklerden biri de kağıttır. Selüloz ve reçineden oluşan kağıt, günümüzde yaşamımızın her alanında insanlığın hizmetine sunulmuştur.

Günümüzde kompozit malzemelerin kullanım alanı çok geniş boyutlara ulaşmıştır. Kompozit malzemelerin başlıca kullanım alanları ve bu alanlarda sağlanan avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- 1) **Şehircilik** : Bu alanda kompozitler, toplu konut yapımında, çevre güzelleştirme çalışmalarında (heykel, banklar, elektrik direkleri v.s.) kullanılmaktadır. Üreticinin çok sayıda standart ürünü kısa zamanda imal edebilmesi, montajdan tasarruf ve ucuz maliyet imkanları, kullanıcıya da yüksek izolasyon kapasitesi, hafiflik ve yüksek mekanik dayanım imkanları sağlamaktadır.
- 2) **Ev Aletleri** : Masa, sandalye, televizyon kabinleri, dikiş makinesi parçaları, saç kurutma makinesi gibi çok kullanılan ev aletlerinde ve

dekoratif ev eşyalarında kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu şekilde komple ve karışık parça üretimi, montaj kolaylığı, elektriksel etkilerden korunum ve hafiflik gibi avantajlar sağlamaktadır.

- 3) **Elektrik ve Elektronik Sanayi** : Kompozitler, başta elektriksel izolasyon olmak üzere her tür elektrik ve elektronik malzemenin yapımında kullanılmaktadır.
- 4) **Havacılık Sanayi** : Havacılık sanayisinde kompozitler, gün geçtikçe daha geniş bir uygulama alanına sahip olmaktadır. Planör gövdesi, uçak modelleri, uçak gövde ve iç dekorasyonu, helikopter parçaları ve uzay araçlarında başarıyla kullanılmaktadır. Daha hafif malzemeyle atmosfer şartlarına dayanım ve yüksek mukavemet sağlanmaktadır.
- 5) **Otomotiv Sanayi** : Bu alanda kompozitlerden oluşan başlıca ürünler; otomobil kaportası parçaları, iç donanımı, bazı motor parçaları, tamponlar ve oto lastikleridir.
- 6) **İş Makinaları** : İş makinalarının kapakları ve çalışma kabinleri yapımında da kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu şekilde üretimde kullanılan parça sayısı azaltılabilmekte, tek parça üretim mümkün olmaktadır. Ayrıca elektrik izolasyon malzemelerinden de tasarruf sağlanmaktadır.
- 7) **İnşaat Sektörü** : Cephe korumaları, tatil evleri, büfeler, otobüs durakları, soğuk hava depoları, inşaat kalıpları birer kompozit malzeme uygulamalarıdır. Tasarım esnek ve kolay olmakta, nakliye ve montajda büyük avantajlar sağlamaktadır. İzolasyon problemi çözülmekte ve bakım giderleri azalmaktadır.
- 8) **Tarım Sektörü** : Seralar, tahıl toplama siloları, su boruları ve sulama kanalları yapımında kompozitler özel bir öneme sahiptirler. Kompozit malzemelerden yapılan bu örnekler istenirse ışık geçirgenliği, tabiat şartlarına ve korozyona dayanıklılık, düşük yatırım ve kolay montaj gibi avantajlar sağlamaktadır.

2.2. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler, metallere göre birçok konuda farklı özellik göstermesinden dolayı, metal malzemelere göre önem kazanmışlardır. Kompozitlerin düşük özgül ağırlığı, hafif konstrüksiyonlarda kullanımı açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, fiber takviyeli polimer kompozit

malzemelerin korozyon dayanımlarının iyi olması; ayrıca ısı, ses ve elektrik izolasyonu da sağlamaları ilgili kullanım alanları için bir üstünlük sağlamaktadır.

Kompozit malzemelerin sağladığı avantajların bazıları şunlardır:

- 1) **Yüksek Mukavemet:** Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı kompozitlere istenen yönde ve bölgede gerekli mukavemet verilebilir. Böylece malzemedan tasarruf yapılarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilir.
- 2) **Kolay Şekillendirebilme:** Büyük ve kompleks parçalar tek işlemle bir parça halinde kalıplanabilir. Bu da malzeme ve işçilikten kazanç sağlar.
- 3) **Elektriksel Özellikler:** Uygun malzemelerin seçilmesiyle çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilir. Bugün büyük enerji nakil hatlarında kompozitler iyi bir iletken ve gerektiğinde de başka bir yapıda, iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler.
- 4) **Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Mukavemet:** Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilerden zarar görmezler. Bu özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır. Özellikle korozyona karşı mukavemetli olması, endüstride birçok alanda avantaj sağlamaktadır.
- 5) **Isıya ve Ateşe Dayanıklılığı:** Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özelliği, yüksek ısı altında kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı artırılabilir.
- 6) **Kalıcı Renklendirme:** Kompozit malzemeye, kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde istenen renk verilebilir. Bu işlem ek bir masraf ve işçilik gerektirmez.
- 7) **Titreşim Sönümlenme:** Kompozit malzemelerde süneklik nedeniyle doğal bir titreşim sönümlenme ve şok yutabilme özelliği vardır. Çatlak yürümesi olayı da böylece minimize edilmiş olmaktadır.

Bu olumlu yanların dışında kompozit malzemelerin uygun olmayan yanları da şu şekilde sıralanabilir:

- 1) Kompozit malzeme içerisindeki hava boşlukları malzemenin yorulma dayanımını olumsuz etkilemektedir.
- 2) Kompozit malzemeler değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler gösterirler.
- 3) Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.
- 4) Kompozit malzemelerde delik delme, kesme türü operasyonlar liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.

Görüldüğü gibi kompozit malzemeler, bazı dezavantajlarına rağmen çelik ve alüminyuma göre birçok avantaja sahiptir. Bu özellikleri ile kompozitler otomobil gövde ve tamponlarından teknelere, bina cephe ve panolarından banyo ünitelerine, ev eşyalarından tarım araçlarına kadar bir çok sanayi kolunda problemleri çözümlenecek bir malzemedir.

2.3. Kompozitlerin Gemi ve Denizcilik Yapılarında Kullanılma Nedenleri

Günümüzde kompozit malzemeler, gemi ve denizcilik yapılarında önce olduğundan daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozitler; çelik ve alüminyum gibi metallerde dahil olmak üzere diğer çoğu malzemedeki; ağırlıklarına göre daha yüksek rijitlik ve dayanıma sahiptir. Ticari ve şahsi gemilerin çeşitli parçalarının kompozitten yapılması; aynı tip gemilerden daha yüksek hızlara ulaşabilen ve yakıt tüketimi düşük daha hafif gemilerin üretilmesini sağlamıştır.

Kompozitler genellikle geminin üst güvertesinde daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun nedeni kompozit malzeme kullanımı ağırlığı düşürmesinin bir sonucu olarak, dönme dengesinden fedakarlık yapmadan daha fazla ekipman yerleştirilebilmesidir. Botlar alabora olmadan güvenilir ölçülerde dönmeyi taşıyabilecek şekilde tasarlanmalarına rağmen; baş kısmı ağır olan bir yapıya uygulanacak yeterli güçteki bir kuvvet alaborsa neden olacaktır. Daha hafif olması nedeniyle alabora riskini orantılı olarak yükseltmeden, daha büyük üst güverteler kompozitten üretilebilir.

Kompozitlerin, gemi yapımında ve çeşitli denizcilik uygulamalarında kullanılmasının bir diğer nedeni de korozyon direncidir. Aşınan ve paslanan

metallardan farklı olarak kompozitler yıllarca dayanır. Sonuç olarak kompozitler yüksek sıcaklık ve deniz suyu gibi korozif ortamlar için idealdir. Ayrıca pervane şafları, şamandralar gibi sürekli deniz suyuna maruz kalan gemi aparatları da uzun ömürlü olabilmeleri için kompozitten üretilir.

3. DENİZCİLİKTE KULLANILAN KOMPOZİT MALZEME BİLEŞENLERİ

3.1. Elyaf lar

Günümüzde kompozit malzeme uzay, deniz, kara, inşaat ve daha pek çok alanda kullanılır. Denizcilik sektöründe kullanılan en yaygın kompozit ince elyaf ların matris yapıda yer almasıyla meydana gelir. Bu basit yapıda bile o kadar çeşitli malzemeler kullanmak mümkündür ki, sonuçta sonsuz bir kombinasyon karşımıza çıkar.

Elyaf ların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyaf ların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaf lar doğ rultusunda yüksek mukavemet sağ lanırken, elyaf lara dik doğ rultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağ lanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaf larla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür.

Elyaf ların mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca elyaf ların uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından elyaf lara iletilen yük miktarı artmaktadır. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir.

Kompozit yapının mukavemetinde önemli olan diğ er bir unsur ise elyaf matris arasındaki bağın yapısıdır. Matris yapıda boşluklar söz konusu ise elyaf larla temas azalacaktır. Nem absorpsiyonu da elyaf ile matris arasındaki bağ ı bozan olumsuz bir özelliktir.

3.1.1. Denizcilikte Yaygın Kullanılan Elyaf Türleri

Aramid, karbon, cam, dyneema (ya da spectra) ve bazalt gibi malzemelerden elyaf üretilmektedir. Denizcilik sektöründe en yaygın kullanılanı cam elyaf tır. Aramid ve karbon da sıklıkla kullanılır.

3.1.1.1. Cam Elyaf lar

Cam elyaf lar, sıradan bir şişe camından yüksek saflıktaki quartz camına kadar pek çok tipte imal edilirler. Cam amorf bir malzemedir ve polimerik yapıdadır.

Cam elyaf ların bazı özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 1) Yüksek çekme mukavemetine sahiptirler.
- 2) Isıl dirençleri düşüktür. Yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar. Bu özellikleri katkı malzemeleri kullanılarak iyileştirilebilir.
- 3) Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler.
- 4) Nem absorbe etme özellikleri yoktur. Ancak cam elyaf lı kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabılır.
- 5) Elektriği iletmezler. Bu özellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda kullanılırlar.

Cam elyaf imalinde silis kumuna çeşitli katkı malzemeleri eklendiğinde, yapı bu malzemelerin etkisi ile farklı özellikler kazanır. Dört farklı tipte cam elyaf mevcuttur

- **A-Glass:** A-Glass yüksek oranda alkali içeren bir camdır. Bu nedenle elektriksel yalıtkanlık özelliği kötüdür. Kimyasal direnci yüksek olan A camı, en yaygın cam tipidir.
- **C-Glass:** Kimyasal çözeltilere direnci çok yüksektir.
- **E-Glass:** Düşük alkali oranı nedeniyle elektriksel yalıtkanlığı diğer cam tiplerine göre çok iyidir. Mukavemeti oldukça yüksektir. Suyu karşı direnci de oldukça iyidir. Nemli ortamlar için geliştirilen kompozitlerde genellikle E-Glass kullanılır.
- **S-Glass:** Yüksek mukavemetli bir camdır. Çekme mukavemeti E-Glass oranla % 33 daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir yorulma direncine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle havacılıkta ve uzay endüstrisinde tercih edilir.

Cam elyaf lar genellikle plastik veya epoksi reçineler ile kullanılırlar.

Çizelge 3.1 Cam elyafların mekanik özellikleri (Eren Vatangül, 2008).

Özellikler	A-Glass	C-Glass	E-Glass	S-Glass
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,50	2,49	2,54	2,48
Elastisite Modülü (GPa)	-	69,0	72,4	85,5
Çekme Mukavemeti (MPa)	3033,0	3033,0	3448,0	4585,0
Isıl Genleşme Katsayısı	8,6	7,2	5,0	5,6

3.1.1.2. Aramid Elyafı

Aramid "aromatik polyamid" in kısaltılmış adıdır. Polyamidler uzun zincirli polimerlerdir. Aramidin moleküler yapısında altı karbon atomu birbirine hidrojen atomu ile bağlanmışlardır.

Aramid çoğunlukla darbeye maruz kalan ürünlerde enerjiyi absorbe etme özelliği ve yüksek aşınma dayanımı özelliklerinden dolayı tercih edilen düşük yoğunluklu bir elyaftır. Aramid elyaflar yüksek çekme mukavemeti ve düşük maliyet özelliklerine sahiptirler. Doğal kimyasallara dirençlidirler, ancak asit ve alkalilerden etkilenirler.

2344 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler ve kopma uzamaları % 1.8'dir. Yoğunlukları cam ve grafit elyafların yoğunluklarından daha düşüktür.

Kevlar 49/epoksi kompozitlerinin darbe mukavemeti grafit/epoksi kompozitlere oranla yedi kat, bor/epoksi kompozitlere oranla dört kat daha iyidir.

Özellikle ısıya karşı yüksek mukavemet gösterir ve bu yüzden yanmaz ürünlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Geçmişte camdan sonra en yaygın olarak kullanılan malzeme olmuştur. Bugün de eskisi kadar yoğun olmasa da spesifik noktalarda halen kullanılmaktadır. Fiyat olarak camdan pahalı karbondan ucuzdur.

Uçak yapılarında, düşük basma mukavemetleri nedeniyle, karbon elyaflarla birlikte hibrid kompozit olarak kumanda yüzeylerinde kullanılmaktadırlar. Aramid elyaflar elektriksel iletkenliğe sahip değildirler. Basma mukavemetlerinin iyi olmamasının yanı sıra kevlar/epoksi kompozitlerinin nem absorbe etme özellikleri kötüdür.

3.1.1.3. Karbon Elyaf lar

Karbon, yoğunluğu 2.268 g/cm³ olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon elyaf lar cam elyaf lar dan daha sonra geliş en ve çok yaygın olarak kullanılan bir elyaf grubudur Hem karbon hem de grafit elyaf lar aynı esaslı malzemeden üretilirler. Bu malzemeler hammadde olarak bilinirler. Karbon elyaf ların üretiminde üç adet hammadde mevcuttur.

Bunlardan ilki rayon dur (suni ipek). Bu hammadde inert bir atmosferde 1000 °C civarına ısıtılır ve aynı zamanda çekme kuvveti uygulanır. Bu işlem mukavemet ve tokluk sağlar. Ancak yüksek maliyet nedeniyle rayon elyaf lar uygun değildirler.

Elyaf imalatında genellikle rayonun yerine poliakrilonitril (PAN) kullanılır. PAN bazlı elyaf lar 2413 ile 3102 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler ve maliyetleri düşüktür. Bu nedenle belirgin bir üstünlüğe sahiptirler.

Petrolün rafinesi ile elde edilen zift bazlı elyaf lar ise 2069 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler. Mekanik özellikleri PAN bazlı elyaf lar kadar iyi değildir. Maliyetleri düşüktür.

Karbon elyaf lar yüksek dayanım, yüksek rijitlik ve hafiflik gibi özelliklerin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılır. Karbon kompozit bir malzeme aynı mukavemet değerleri için cam kompozitten yüzde 40 hafiftir. Bunun dışında karbon cama göre çok daha rijit bir malzemedir ve çok daha az esneme yapar.

Karbon elyaf lar yüksek dayanım, orta modül, yüksek modül, çok yüksek modül sınıflarında üretilebilir. Bu sınıflar farklı mukavemet özellikleri ve farklı fiyatlara sahiptirler.

- **Standart modül karbon:** Bu tip karbon en ucuz fiyatlı olanıdır, genelde karbon tekneler bu tip karbondan üretilirler.
- **Orta modül karbon:** Bu karbon standart olandan daha yüksek mekanik değerlere sahiptir ağırlığın daha önemli ve yüksek mukavemet gerektiren noktalarda kullanılırlar.
- **Yüksek modül karbon:** Bu elyaf tipi daha yeni yeni havacılık ve uzay endüstrisinden çıkıp daha basit kompozitler için kullanılmaya

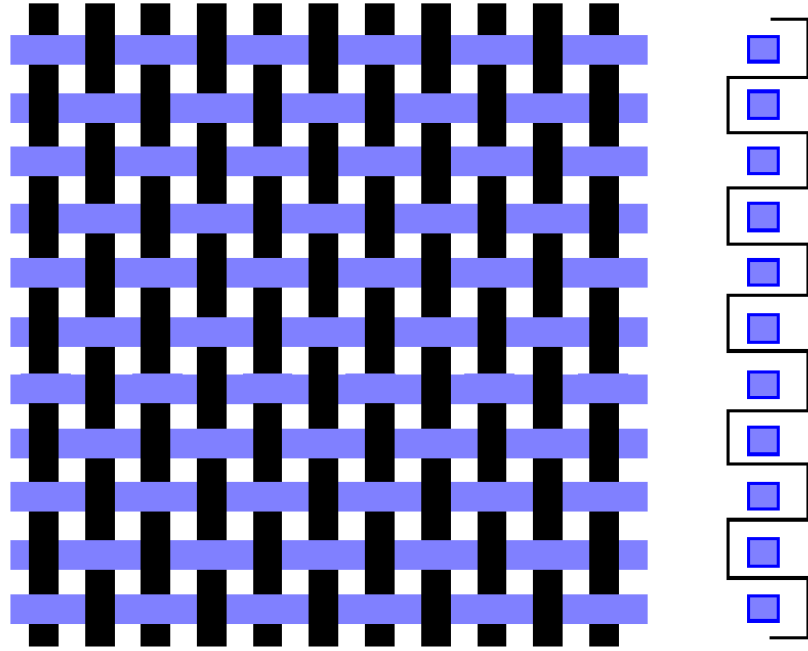
başlamıştır. Bugün TP52, VOR70 teknelerinin direkleri bu karbondan üretilmektedir.

- **Ultra yüksek modül karbon:** Bu karbonun henüz denizcilik endüstrisinde kullanım alanı yoktur, aşırı yüksek fiyata sahiptir, sadece uzay mekikleri ve uçaklarda kullanılmaktadır.

3.1.2. Elyaf Dokuma Biçimleri

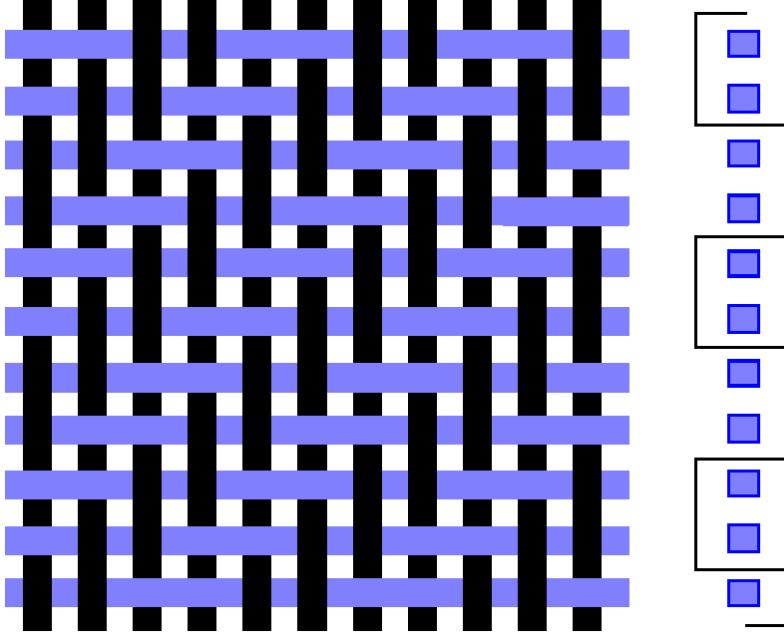
Örülü elyaf en az iki doğrultuda uzanan fiberlerden oluşur. Boyuna uzanan uzun elyaflar çözgü terimiyle, enine uzanan nispeten daha kısa olan elyaflar ise askı terimiyle adlandırılır. Atkı ve çözgü fiberler değişik aralıklarla birbirlerinin altından geçerek farklı örgü tiplerini oluşturur.

- **Düz Dokuma:** Atkı fiberlerin, çözgü fiberlerin bir altından bir üzerinden geçmesiyle oluşturulan örgü tipidir (Bkz. Şekil 3.1). Elde edilen örgü çok stabil olduğundan keskin profil değişimlerine uydurulması ve bükülmesi zor olabilir.



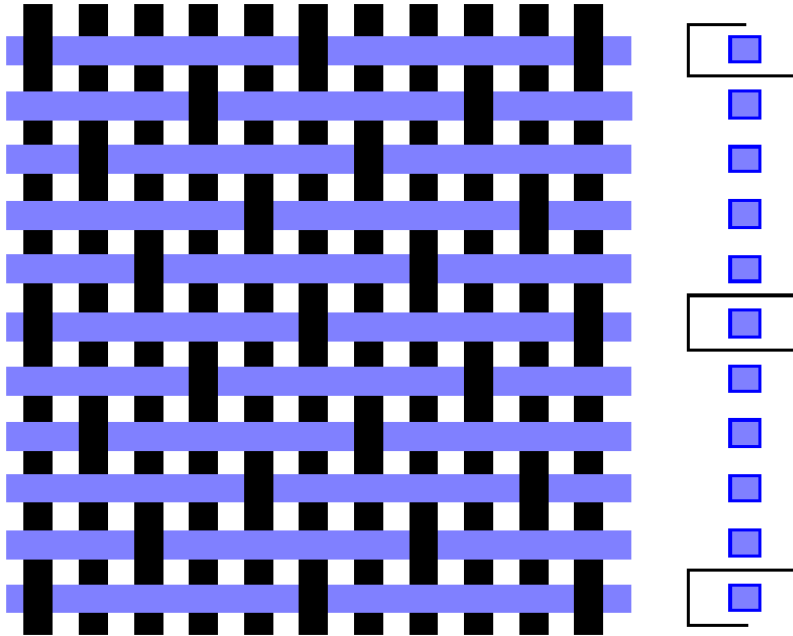
Şekil 3.1. Düz Dokuma (Advanced Composites Group, 2009)

- **Çapraz Dokuma:** Atkı fiberlerin, çözgü fiberlerin belli bir sayıda altından ve yine aynı sayıda üstünden geçmesiyle oluşturulan örgü biçimidir (Bkz. Şekil 3.2). Çarpılması ve bükülmesi daha kolaydır. Bu sayede istenen profile daha kolay yerleştirilebilir.



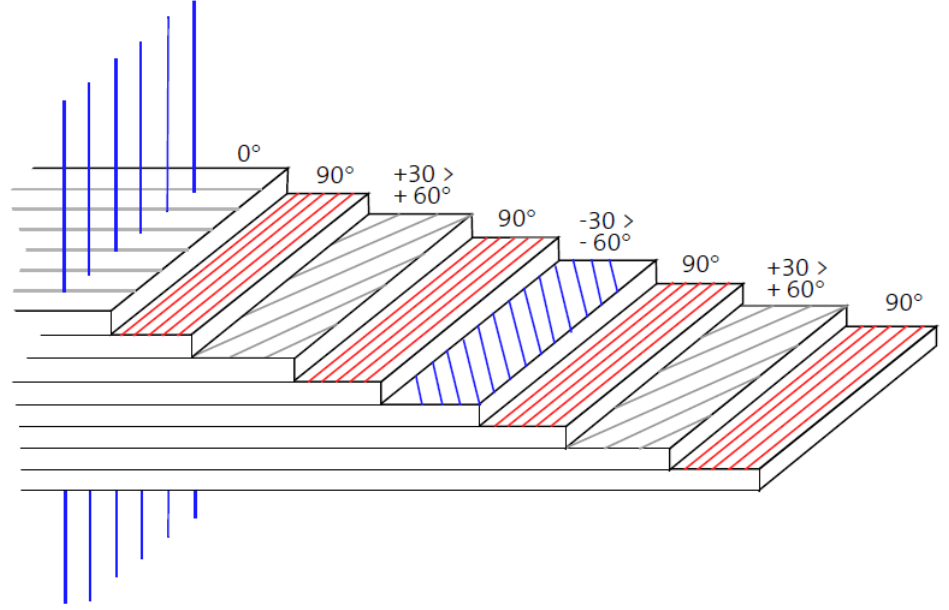
Şekil 3.2. Çapraz Dokuma (Advanced Composites Group, 2009)

- **Saten Dokuma:** Atkı fiberlerin, bir çözgü fiberin altından geçtikten sonra belli sayıda çözgünün üstünden geçmesiyle oluşturulan örgü biçimidir (Bkz. Şekil 3.3). Atkının üstünden geçtiği çözgü sayısı saten tiine göre belirlenir. Bu örgü tipi kumaşa çok daha düzgün bir yüzey verir. Çarpılması ve bükülmesi çok kolaydır. Bu da karmaşık yüzeylerin şeklini almasını kolaylaştırır. Ancak dengesiz yüzeyler oluşturduğu için iki yüzeyin davranışı birbirinden farklı olur.



Şekil 3.3. Saten Dokuma (Advanced Composites Group, 2009)

- **Kıvrımsız, Dikişli Kumaş:** Eş yönlü fiberlerin farklı açı oryantasyonlarında (örneğin 0° , -45° , 90° , $+45^\circ$, 0°) üst üste yerleştirilmesiyle oluşturulur ve dikilerek birbirine sabitlenir (Şekil 3.4). Dokunmuş kumaşlarla üretilmeyecek kalınlıktaki yapıların imalatında masraflarını ve harcanan zamanı azaltmak için kullanılan kumaş tipidir. Karmaşık şekiller için kolaylıkla kullanılabilir.



Şekil 3.4. Kıvrımsız Kumaş (Advanced Composites Group, 2009)

3.2. Matris Malzemesi

Matris malzemesi, kompozit malzemenin ana çimentosudur. Kompozit malzeme dahilindeki sandviç ve elyaflar arasındaki boşlukları doldurarak, katmanı bir arada tutan ve bunları yüzeye yapıştıran malzemedir.

Kompozit yapılarda matrisin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, elyafları bir arada tutmak, yükü elyaflara dağıtmak ve elyafları çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra elyafları sağlam ve uygun şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir.

Kompozit yapılarda yükü taşıyan elyafların fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Örneğin matris malzemesi olmaksızın bir elyaf demeti düşünüldüğünde yük bir ya da birkaç elyaf tarafından taşınacaktır. Matrisin varlığı ise yükün tüm elyaflara eşit

olarak dağılımını sağlayacaktır. Kesme yükü altındaki bir gerilmeye dayanım, elyaflarla matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kesme mukavemeti özelliklerini gerektirir.

Elyaf yönlenmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetim belirleyici önemli hususlardır. Matris elyafa göre daha zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Matrisin kesme mukavemeti ve matris ile elyaf arası bağ kuvvetleri çok yüksek ise elyaf ya da matriste oluşacak bir çatlağın yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkündür. Bu durumda kompozit gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma yüzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Eğer bağ mukavemeti çok düşükse, elyaflar boşluktaki bir elyaf demeti gibi davranır ve kompozit zayıflar. Orta seviyede bir bağ mukavemetinde ise elyaf veya matristen başlayan enlemesine doğrultuda bir çatlak elyaf/matris ara yüzeyine dönüp elyaf doğrultusunda ilerleyebilir. Bu durumda kompozit sünek malzemelerin kopması gibi lifli bir yüzey sergiler.

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan matris malzeme tipleri epoksi, polyester, vinylester ve fenolik reçinelerdir. Yüksek mukavemet göstermeyen durumlarda en çok kullanılan matris malzemesi polyester reçinesidir. Gelişmiş kompozitlerin üretiminde ise genellikle epoksi reçinesi kullanılmaktadır. Matris iyileştirilmesi çalışmaları özellikle yüksek sıcaklıkta kullanıma uygun ve düşük nem duyarlılığına sahip yapıların üretilmesi doğrultusundadır.

Çizelge 3.2 Bazı matris malzemelerinin özellikleri (Volkan Kazanç, 2002).

Özellikler	Epoksi Oda Sıc. Kürlenmiş	Epoksi Yük. Sıc. Kürlenmiş	Epoksi	Polyester	Fenolik
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	1,1 – 1,3	1,2 – 1,4	1,3	1,2	1,2 – 1,3
Elastisite Modülü (GPa)	2 – 3	2,5 – 3,0	3,5	2 – 3	5 – 11
Çekme Muk. (MPa)	50 – 70	70 – 90	60	50 – 60	50 – 60
Kopma Uzaması (%)	2 – 6	2 – 5	2	2 – 3	1,2
Maks. İşlem Sıc. (°C)	70 – 100	100 – 180	180	60 – 80	100 – 125

3.2.1. Polyester Reçine Matrisler

Polyester matrisler dibazik asitlerin, dihidrik alkoller (glikol) ya da dihidrik fenollerle karışımının yoğunlaşması ile şekil alırlar. Polyesterin ana tipleri, polyester bileşeninin doymuş asitle ya da alternatif malzeme olarak glikolle modifikasyonu temeline dayanır. Ayrıca kür işlemi ile matrisin esnekliği iyileştirilerek kopma gerilmesi arttırılabilir.

Polyesterin keşfi 1. Dünya Savaşı dönemlerine dayanmaktadır. İlk kompozit teknelerin üretiminde ve günümüzde de bir çok tersanede kullanılan reçinedir. Farklı viskozitelerde el yatırması yada infüzyon tipi üretim için çeşitleri bulunmaktadır.

Polyester matrislerin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Avantajları:

- 1) Düşük maliyetlidirler.
- 2) Çeşitli uygulamalar için geniş bir sınır içinde kolay imal edilebilirler.
- 3) Çevresel dayanımları iyidir.

Dezavantajları:

- 1) Kür sırasındaki yüksek egzotermik reaksiyon zayıf elyaf/matris bağ mukavemetine neden olur.
- 2) Mekanik değerleri düşüktür. Sistem gevrekleşmeye eğilimlidir.
- 3) Diğer reçinelere göre daha fazla su absorbe eder. Bu nedenle polyester teknelerde ozmosa çok sık rastlanır.
- 4) Maksimum işlem sıcaklığı diğer reçinelere göre düşüktür.
- 5) Sertleşme anında aşırı ısınma yaparak uygulandığı bir önceki katmanda bozukluklara yol açabilir ve ürün kalıptan çıktıktan sonra şeklini kaybedebilir. Bu yüzden polyester ürünler montaj anına kadar kalıbında bekletilmelidir.
- 6) Çok seyreltik alkalilere bile zayıf kimyasal direnç gösterir.

Polyester reçinelerin, epoksi reçinelere göre elyaf/matris arası bağ mukavemetinin daha düşük olması nedeniyle, uçak yapılarındaki kullanım alanları küçük uçaklarla ve planörlerle sınırlıdır.

3.2.2. Vinylester Reçine Matrisler

Polyesterlere benzerler. En önemli avantajları elyaf ve matris arasında iyileştirilmiş bir bağ mukavemetine sahip olmalarıdır. Polyesterde glikolun bir kısmının yerine doymamış hidrosilik bileşenlerin kullanılması ile elde edilirler. Tüm özellikleri polyesterden daha iyidir ve ozmosa karşı çok iyi mukavemet sağlar. Uygulamasında polyesterle aynı sertleştiriciler kullanılması açısından benzerlikler gösterir. Yapışma ve çekme özellikleri polyester'den çok daha iyi epoksi'den düşüktür. Buna karşılık form kaybı gibi bir durum vinylester'de söz konusu değildir.

Günümüzde vinylester, epoksi'ye göre uygun fiyatıyla önemli bir pazar payına sahip olmuştur ve bir çok üretici polyesterden vinylestere geçiş yapmaktadır. X-Yachtlar ve birçokları ozmosa karşı dış 2 katman vinylester, diğer katlar polyester olacak şekilde üretim yaparlar. Kullanımı polyesterden daha zordur. Malzemenin mutlak değerlerine sahip olabilmesi için belli süreler için yüksek sıcaklıklarda bekletilmesi gerekir.

3.2.3. Fenolik Reçine Matrisler

Fenol, alkalın şartlar altında formaldeitle yoğuştuğunda polimerizasyon oluşur. Polimerizasyon asidik şartlar altında yapılır. Fenolik reçinelerin en büyük avantajı yüksek sıcaklık dirençleridir. En önemli dezavantajları ise, diğer matris malzemelerine göre mekanik özelliklerinin düşük olmasıdır. Bu nedenler uçak yapılarında tercih edilmezler.

3.2.4. Epoksi Reçine Matrisler

Epoksiler iki ya da daha fazla epoksit içeren bileşenlerden oluşurlar. Polifenol'ün epikloridin ile bazik şartlarda reaksiyonu sonucu elde edilirler. Viskoz ve açık renkli bir sıvı halindedirler.

Epoksilere uygulanan kür işlemleri ile yüksek sıcaklıklara dayanımları 150-200 °C seviyelerine arttırılabilir. Saydam ve yapışkan hal amorf polimerlerin

karakteristiğidir. Tüm polimerler düşük sıcaklıkta saydamlaşırlar ve yüksek sıcaklıkta kauçuklaşırlar. Geçişin meydana geldiği sıcaklık aralığına "cam geçiş sıcaklığı" adı verilir. Cam geçiş sıcaklığı, maksimum çalışabilme sıcaklığının bir ölçüsüdür. 100 °C'de uygulanan bir kür işlemi ile maksimum çalışma sıcaklığı 90-100 °C arttırılabilir. 150-250 °C arasında uygulanacak bir kür ile 150-250 °C arasında uygulanan maksimum çalışma sıcaklığı sağlanabilir. Kür işlemleri uygun katalizörlerin kullanılması ile hızlandırılabilir.

Epoksilerin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Avantajları:

- 1) Yüksek aşınma direncine sahiptirler.
- 2) Uçucu değildirler ve kimyasal dirençleri yüksektir.
- 3) Düşük ve yüksek sıcaklıklarda sertleşebilme özelliğine sahiptirler.
- 4) En az su absorbe eden reçinedir.
- 5) Minimum ısınma ve büzülme yapar bu sayede dış katmanı en az etkileyen reçinedir.
- 6) Elyaf yapılarla yüksek bağ mukavemeti sağlarlar.

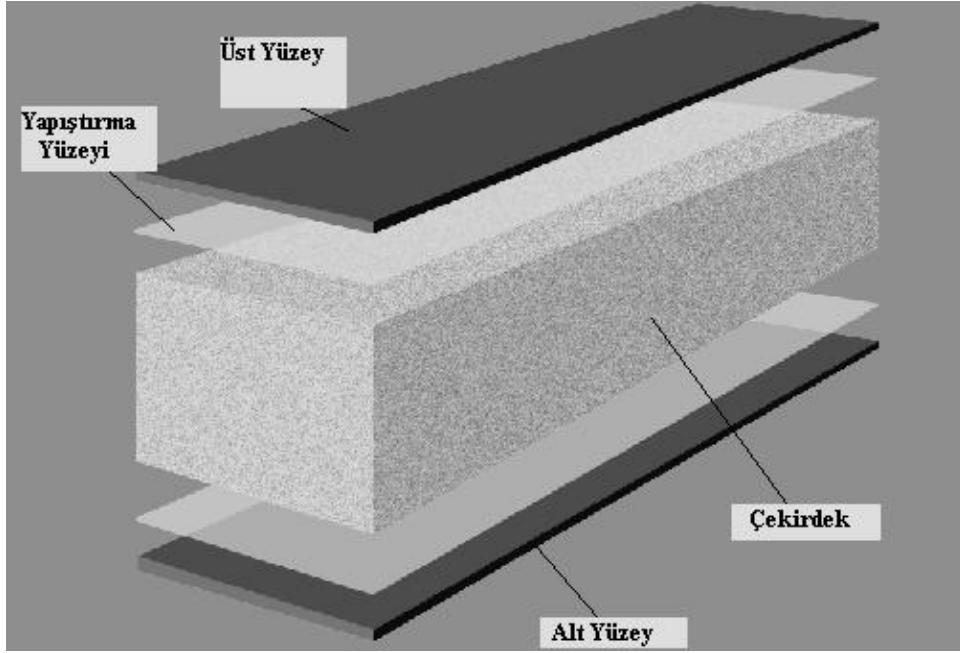
Dezavantajları:

- 1) Polyesterle karşılaştırıldığında pahalıdır.
- 2) Polyester jelkotlu yüzeylerde sorun yaratır. Mutlaka vinylester ya da epoksi jelkot kullanılması gerekir.
- 3) Polyestere oranla yüksek viskoziteye daha az uygundur.

Epoksiler avantajlarının çokluğu ve tüm elyaf malzemelerle kullanılabilir yapılar olmaları nedeniyle, uçak yapısında tabakalı kompozit yapılar olarak yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Genellikle karbon elyaflarla birlikte kullanılırlar. Bugün bütün kaliteli tekneler, AC tekneleri, VOR70 tekneleri, TP52 ve daha birçokları kıyaslama yapmaksızın epoksiyi tercih etmektedirler

3.3. Sandviç Malzemeler

Sandviç bir yapı temel olarak üç önemli elemana sahiptir. Şekil 3.5’de gösterildiği üzere en dışta alt ve üst yüzeyler, orta kısımda çekirdek olarak adlandırılan malzeme ve bağlantıyı sağlayan yapıştırma katmanlarından oluşmaktadır. Dış yüzeyler ince ancak mukavim bir yapıya sahipken, çekirdek malzemenin mukavemet değeri düşük ve hafiftir. Bu sayede mukavemeti yüksek bir eleman oluşturduğumuz gibi konstrüktif açıdan da düşük ağırlıklı bir yapı elde etmiş oluruz.

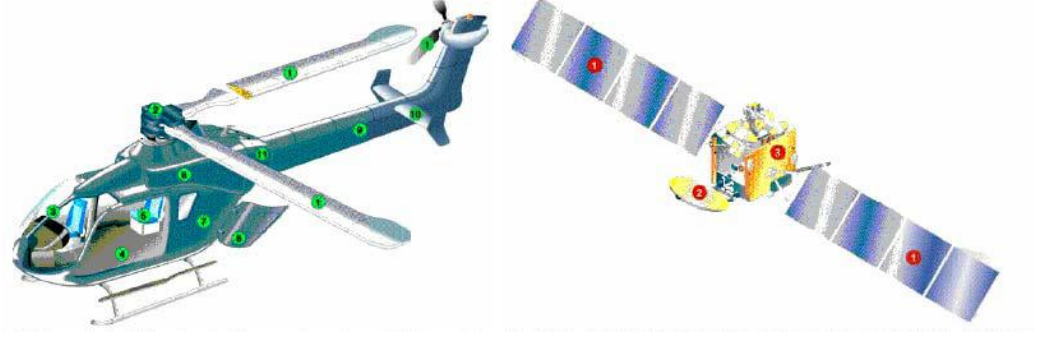


Şekil 3.5. Sandviç bir yapının temel elemanları (Alper Tortoç, 2009)

İçerideki çekirdek malzemenin temel görevi dış yüzeyler arasındaki mesafeyi muhafaza etmektir; çünkü bu mesafe sandviç malzemenin kesit alanına ait atalet momentinin ve de bükülme rijitliğinin yüksek olmasını sağlamaktadır. Kısaca bir sandviç yapının sahip olması gereken özellikleri özetlemek gerekirse;

- Mukavemetli yüzeyler, düşük yoğunluklu çekirdek
- Rijit ve mukavim bir yapıştırma bağlantısıdır.

Sandviç yapı yüksek burulma ve bükülme rijitliğine sahiptir. Ayrıca sandviç malzemelerin sağladığı diğer bir avantaj da konstrüksiyon rijitliğidir.



(a) 1.Kanat, 7.Gövde, 8.Kargo kapıları, 9.Kuyruk: (b) 1.Güneş panelleri, 2.Yansıtıcı antenler, 3.Gövde



(c) 2. ve 6. Gövde dış kısmı, 4. Asma tavanlar, 7. Kamara bölmeleri, 9. Hava kalkanı: Petek yapılı kompoziti



(d) 1. Aramid kağıdından yapılmış petek yapılı
2. Karbon fiber kompoziti

Şekil 3.6. Çeşitli petek yapılı kompozit uygulamaları (a) helikopter, (b) Uydu, (c) Yat, (d) Bisiklet (Ö. Gökmen Vatandaş, 2007)

3.3.1. Ahşap Sandviçler

Bu grupta kontrplak ve balsa'yı örnek verebiliriz. Fakat sandviç yapının en önemli özelliği olan hafiflik için en uygun ahşap balsa ağacından yapılan çekirdektir.

Hafif balsa ağacı, elyafları deriye dik gelecek şekilde (end grain) kesilerek çekirdek olarak kullanılır. Balsa çekirdekli sandviçler çok iyi bir rijitlik sağlarlar. Ancak, kırılmaları ani ve büyük boyutlu olur. Bunun yanı sıra, tabii kaynaklı malzemenin standardizasyonu imkansız denecek kadar zordur. Nispeten yüksek yoğunluğu ise, PVC köpük gibi geniş bir seçim şansı vermez. Ayrıca bir darbe anında ahşap su emeceği için tamir esnasında çok geniş bir alanı tamir etmek gerekir.

3.3.2. Köpük Sandviçler

Köpük sandviçlerde en sık kullanılan malzeme PVC köpüktür. Sıcağa mukavimdir, nispeten makul fiyatı ve farklı yoğunlukta çeşitleri vardır. PET köpükler polietilenden üretilirler. Aynı mukavemetteki PVC köpüğe göre daha ağırdır.

SAN köpükler yine PVC köpük benzeri bir sandviç malzemedir. Köpük çekirdekler en sık kullanılan sandviç materyaldir. İnfüzyon uygulaması için delikli ve kanallı olanları mevcuttur. Hatta dilerseviz kaplanacak alanın şeklinde PVC köpük ürettirmek mümkündür Bu sayede boşluksuz ve mükemmel bir kaplama yapılabilir

3.3.3. Bal Peteği Sandviçler

Bal peteği metalik veya kompozit esaslı olabilir. Metalik bal peteği çok ince alüminyumdan, kompozit bal peteği ise kağıt veya naylon/aramid elyafları ve epoksi veya fenolik bir reçineden yapılırlar. Ateşe dayanıklı Nomex en popüler bal petek sistemlerinden biridir. Bal petek sistemleri dış derilere yapıştırılması oldukça zor, ama üstün mukavemet/ağırlık oranları sağlayan çekirdek yapıları oluştururlar. Ayrıca, eğimli yüzeyleri bal peteği ile kaplamak için özel bir teknik gerekmektedir. (Kaan N.Z.Onuk 2003)

Bal peteği, form itibarıyla ezilmeye çok mukavimdir. Plastik bal petekleri daha çok yapısal olmayan hafif paneller üretmekte kullanılır. Alüminyum petekler ise ağırlığına göre oldukça yüksek mukavemet sunarken düşük maliyete sahiptir.

Nomex yani Aramid pal peteği kevlar kağıttan üretilir, sadece prepreg uygulamalarında kullanılır. Çok hafif ve ezilmeye karşı çok mukavim bir malzemedir. Fiyatı çok yüksektir. Buna karşılık Karbon/Nomex bir yapı en hafif, rijit ve sağlam kompozittir.

Sandviç malzemeler, kompozitin kalitesini ve malzeme maliyetini artırır fakat sandviç bir kompozit için monolitik eş bir yapıya göre daha az miktarda malzeme kullanılır. Böylece işçilikten tasarruf edilir. Günümüzde çekirdek materyallerin fiyatı düşüğe, kompozitlerde, özellikle teknelerde çok daha fazla kullanılmaya başlanacaktır.

3.4. Prepreg malzemeler

Prepregler, önceden belirli oranlarda kontrollü olarak reçine emdirilmiş, tek yönlü ya da dokunmuş elyaflardır. Özel saklama koşullarında tutulurlar ve belli bir raf ömürleri vardır. Üretim esnasında ayrıca bir reçine emdirme işlemine gerek kalmadığı için işlenirken, tehlikeli kimyasallarla temas gerektirmemektedir. İstenen parça kolaylıkla kesilip, tabakalar halinde yerleştirilir. Bu sayede kullanıcı çok rahat bir şekilde prepreg malzemeyi üretime hazırlayarak, belirlenmiş basınç ve sıcaklık değerlerinde kürleştirebilir.

Prepregler, dayanım kaybına sebep olan tabaka kaymaları ya da fazla reçineli bölgelerin oluşumu gibi üretim hatalarının oluşmasını önler ve bu nedenle kolayca birleştirilebilir. Bu kolaylık sayesinde elyaf doğrultuları istenildiği şekilde kontrol edilir ve üretim anında tabakalar kalıp içerisinde isabetli biçimde pozisyonlanabilir.

Endüstride sıklıkla hammadde olarak prepreg malzemelerin tercih edilmesindeki ana sebepler performans ve maliyetleridir. Prepreg malzemeler üretim, tasarım ve son üründe ortaya çıkan; performans ve maliyet üstünlükleri sebebiyle denizcilik, havacılık, uzay, enerji sektörlerine ve spor araç gereçlerinde tercih edilmektedir. Bu üstünlükler aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Düşük üretim giderleri
- Azaltılmış enerji tüketimi
- Azaltılmış parça sayısı
- Fiber içeriğinin tam kontrolü
- Ağırlık/performans oranının optimize edilebilmesi
- Yorulma ve çekme dayanımının daha iyi olması
- Rijitliği
- Korozyon dayanımı
- Düşük bakım gereksinimi

4. KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİ

4.1. Elle Yayma Metodu

Bu yöntemde, malzemenin projelendirilmesi ve imalinde gerekli yerlerde malzemeyi yığma ile şekil ve mukavemetin kontrolüne imkan tanınır. İmalat kapasitesinin düşük olduğu üretimlerde en çok kullanılan ve ekonomik olan metottur. Bu metotta üretim üç ana kısımdan oluşur. Bunlar, kalıbın hazırlanması, cam keçe veya cam kumaş serilmesi ve sonra da üzerine polyester tatbik edilmesidir.

Elle yayma metodunda kullanılacak kalıp, üretilmek istenen malzemeye uygun olarak seçilir. Tahta, alçı, plastik, cam takviyeli plastik veya başka bir malzemeden üretilecek ürüne uygun kalıp yapılır. Kalıp yapılırken kalıp yüzeyinin çok düzgün olması, hava kabarcığı, delik, çatlak gibi hataların bulunmaması gerekir.

Kalıp üzerine daha sonra ayırıcı malzeme tatbik edilir. Bu ayırıcı malzeme aynı zamanda plastik ve kalıbın birbirinden kolaylıkla ayrılmasını sağlar. İki kat olarak sürülür. Birinci kata yumuşak bir bez veya üstübü yardımı ile kalıp ayırıcı vaks sürülür, 10 dakika kadar kurumaması için beklenir. İkinci kat olarak vaksın üzerine plastik sünger yardımı ile PVA (Polivinil Alkol) sürülür. PVA sürülürken tek yönlü olarak tatbik edilmesine ve sürülmemiş yer kalmamasına dikkat edilir. Aksi takdirde, PVA kalıp ayırıcı özelliği gösterir.

Elyafın yüzeyde görünmesi istenmiyorsa PVA üzerine jalcot sürülür. Jalcot, viskozitesi yüksek polyester reçinedir. Kalıp üzerine 0.4mm 'den daha fazla sürülmemelidir. İkinci kat ve polyester uygulaması jalcot tabakası kurumadan önce yapılır. Kalıba uygun olarak, cam keçe, cam kumaş veya fitil dokuma önceden kesilerek hazırlanır. Kesilmiş hazır parçalar jalcot tabakası kurumadan kalıp üzerine yayılır ve üzerine fırça yardımı ile daha önceden hazırlanmış polyester karışımı, takviye malzeme yayılır ve fırça ile hafif darbelerle keçeye veya kumaşa emdirilir.

Kumaşın (veya keçenin) polyesteri geçirmeyecek kadar kalın olması halinde, polyesterin bir kısmı daha önceden jalcot üzerine yayılır ve daha sonra üzerine takviye malzemesi konulur. Boyuna ve enine dişli rulolar yardımı ile arada kalan hava kabarcıkları çıkarılır ve istenen kalınlığa ulaşılan kadar takviye

elemanı ve polyester tatbikine devam edilir. Bu yöntemde, hava kabarcıklarını çıkarma işlemlerine ne kadar çok dikkat ve özen gösterilirse, mamul malzeme de o kadar hatasız ve mukavim olur. Ürün belli bir sertliğe ulaştığında kalıptan çıkarılabilirler. Elle yayma metodunda şu olaylar meydana gelebilir:

- **Jelleşme:** İçine katalizör ve hızlandırıcı katılan reçinenin pıhtılaşması olayıdır. Bu olay genelde 5-10 dakika sürer.
- **Sertleşme:** Reçinenin pıhtılaştıktan sonra kalıptan çıkarılabilecek sertliğe ulaşması için geçen zaman ve bu sırada meydana gelen olaydır. Genellikle 3-4 saat içinde sertleşme gerçekleşir.
- **Olgunlaşma:** Malzemenin ulaşabileceği en sert hali almasıdır. Bu hale gelene kadar geçen süreye, olgunlaşma süresi denir. Bu süre, kullanılan katkı maddelerine, katalizör ve hızlandırıcıya bağlı olarak, birkaç saatten, birkaç haftaya kadar değişir. Olgunlaşma süresini kısaltmak için özel fırınlar kullanılabilir. Herhangi bir karışım için 20°C 'de 2 hafta olan olgunlaşma süresi 80°C 'de, 2 saat civarındadır. Kalıptan çıkarma sertliği için ise 10-15 saat yeterlidir.

Çok katlı keçe kullanılacak uygulamalarda ise, her üç katta bir polyesterin polimerizasyon reaksiyonunun belli bir safhaya gelmesi beklenir.

4.2. Püskürtme Metodu

Püskürtme metodu, elle yayma metodunun makinalaşmış şeklidir. Bu metotla daha fazla ürün elde edilebilir. Bu tip imalatta, üç kattan sonra polyesterin jelleşmesi için bir müddet beklemeli ve daha sonra dördüncü ve diğer katların tatbik edilmesine geçilmelidir. Püskürtme metodunda da elle yayma olduğu gibi tek tarafı düzgün ürünler elde edilebilir.

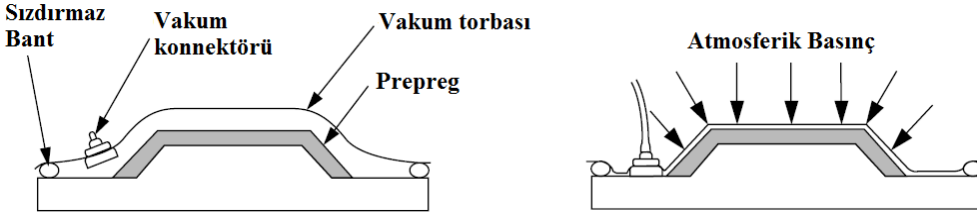
4.3. Vakum Torbalama ve Otoklav Yöntemleri

Kompozit ürün üretiminde kullanılan iki ana yöntem vakum torbalama ve otoklav işlemidir. Bu iki yöntemin karşılaştırılmasında kalite, maliyet ve ürünün şekli Çizelge 4.1'de incelenmiştir.

Çizelge 4.1 Vakum torbalama ve otoklav işlemleri karşılaştırması (Hexel, 2005).

Yöntem	Ürün		Üretim Maliyeti	
	Kalite	Kesit kalınlığı	Ekipman maliyeti	Kür süresi
Vakum torbalama	İyi	İnce	Orta	Kısa
Otoklav	Çok iyi	Kalın	Yüksek	Uzun

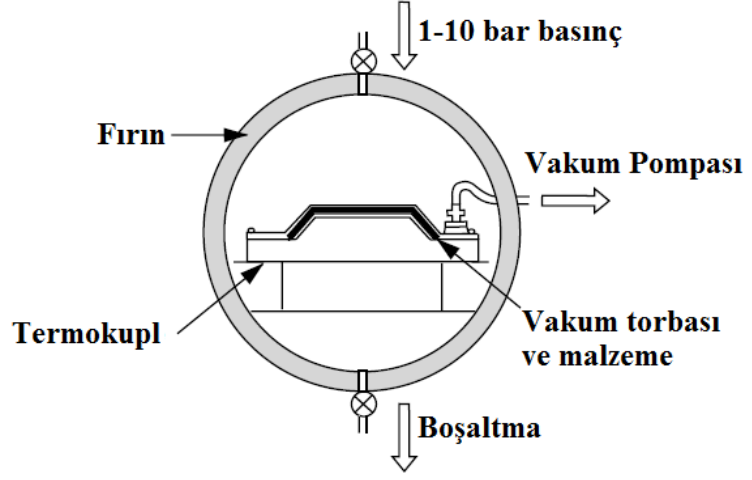
Vakum torbalama işlemi tablodan da anaşılacağı şekilde ince cidarlı ve geniş sandviç yapılı parçaların üretimi için oldukça uygun ve daha az maliyetli bir yöntemdir. Bu yöntem dizilmiş kompozit tabakalarının üzerine sızdırmazlık elemanlarıyla birlikte esnek bir vakum torbanın yerleştirilmesi ve içeride kalan havanın vakum pompası ile alınmasıyla uygulanmaktadır (Bkz. Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Vakum torbalama uygulaması (Hexcel, 2005)

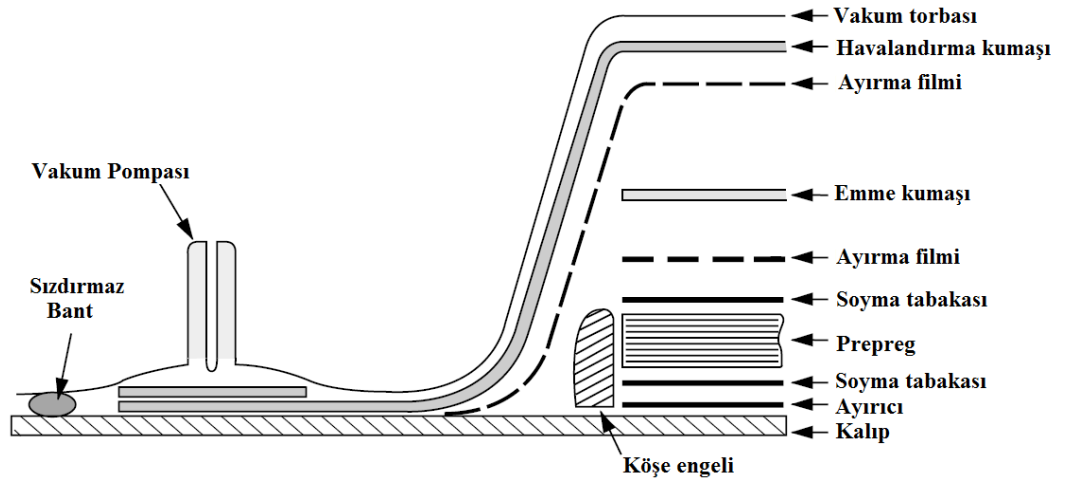
Vakum başlatıldığında torba malzemenin üzerine yapışırık ve hava etkisiyle atmosferik bir basınç uygulayarak malzemeyi sıkıştırır. Vakum sürdürülürken, ekipman bir fırına yerleştirilir ve nispeten kısa bir çevrimin sonunda kürleştirme işlemi tamamlanır.

Otoklav yöntemi ise vakum torbalama yönteminin aksine yüksek fiber oranı ve az miktarda boşluğa sahip yüksek kalitede yapısal parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Otoklav yöntemi bir vakum torbalama işlemi ile başlar, ancak otoklav ünitesi basınç, ısıtma hızı ve kür süresini kontrol ederek kür şartlarını tam olarak gerçekleştirir. Yüksek basınçların kullanılması vakum torbalamanın aksine daha kalın ve karmaşık yapıların şekillendirilebilmesini sağlar. Bu yöntemle bal peteği sandviç yapılar yüksek kalitede üretilebilir. Büyük otoklav üniteleri geniş hacimlerinden dolayı daha uzun ısıtma ve soğutma süresi gerektirmekte ve bu nedenle kür çevrimi daha uzun zaman almaktadır.



Şekil 4.2. Otoklav uygulaması (Hexcel, 2005)

Vakum torbalama yöntemi Şekil 4.3'deki yardımcı elemanların kullanımını gerektirir.



Şekil 4.3. Vakum torbalama uygulamasında kullanılan yardımcı elemanlar (Hexcel, 2005)

Yardımcı elemanların görevleri şunlardır;

- **Ayırıcı:** Kompozit ürünün kalıptan kolay ayrılmasını sağlar.
- **Soyma Tabakası:** Nemin, solventlerin ve fazla reçinenin uzaklaşmasına izin verir. Kür işleminden sonra üründen kolay ayrılır. Boyanabilir bir yüzey oluşturur. Kullanımı üreticinin tercihindedir.
- **Emme Kumaşı:** Fazla reçineyi uzaklaştırır. Reçinenin akışı ve ürünün fiber oranı kullanılan kumaşın miktarıyla ayarlanabilir.

- **Ayırma Filmi:** Bu film tabakası reçine akışını kolaylaştırır ve sadece havanın ve nemin geçmesine izin verir.
- **Havalandırma Kumaşı:** Malzeme içindeki hava ve artık gazların çekilmesinde kullanılan vakumun etkisini artırır. Yüksek otoklav basınçlarında daha kalın havalandırma kumaşları kullanılır.
- **Köşe Engeli:** Reçine akışını düzenler ve ürünün köşelerini şekillendirir.
- **Sızdırmaz Bant:** Vakum torbasının kalıba yapıştırılmasında kullanılır. Torbanın içine hava girmesini engeller.

Vakum torbalama ve otoklav işlemlerinde izlenen sıcaklık–zaman diyagramları aynıdır. Ancak basınç ve vakum grafikleri farklılık gösterir.

5. PASARELLA TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ

5.1. Pasarella Tasarımı

Pasarellanın müşterilerin taleplerine, teknelerin yapısına ve büyüklüğüne bağlı olarak çeşitli büyüklük ve fonksiyonlarda yapılması gerekir. Bu çalışmada katlanır tip taşınabilir prototip bir pasarellanın tasarım ve üretimi konu edilmiştir. Pasarella için en kritik yükleme durumu olarak pasarellanın normal çalışma durumu olan tekerleklerin karaya basması ve pasarella üzerinde tam merkezde ortalama bir kişinin bulunması durumu alınmıştır. Bu nedenle statik yükleme durumunda üretilecek pasarellanın 80-100 kg ağırlığa dayanabilmesi hedeflenmiştir.

Pasarellanın üç boyutlu olarak modellenmesinde SolidWorks paket programı kullanılmıştır.



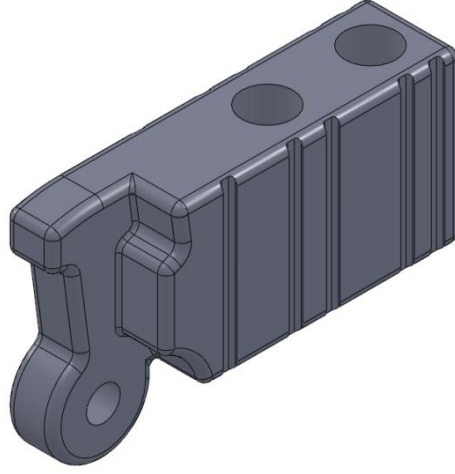
Şekil 5.1. Pasarellanın montajlı hali

Tasarımda pasarellaya planlanan şeklini vermesi için alüminyum iskelet tasarlanmış ve iskeleti çevrelemek üzere karbon katmanı çizilmiştir (Şekil 6.1). Pasarellanın hafif olması amacıyla iskelet 22 mm çapında ve 1 mm et kalınlığında alüminyum borulardan modellenmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Alüminyum iskelet modeli

Pasarella ayrıca 4 adet alüminyum menteşeye (Şekil 5.3), 2 adet tekerleğe ve tekne montaj aparatına sahiptir.



Şekil 5.3. Alüminyum menteşe modeli

5.2. Prototip Pasarella Üretimi

Bilgisayar analizlerinin doğruluğunun araştırılması amacıyla test edilmek üzere prototip üretilmesi gereklidir. Üretilecek olan prototip için $[T_6/\bar{A}]_s$ dizilimi seçilmiştir. Üretilen prototipin deplasman testi sonucu ile bilgisayarda elde edilen mekanik analiz sonuçları kıyaslanarak, analizlerin doğruluğu araştırılacaktır.

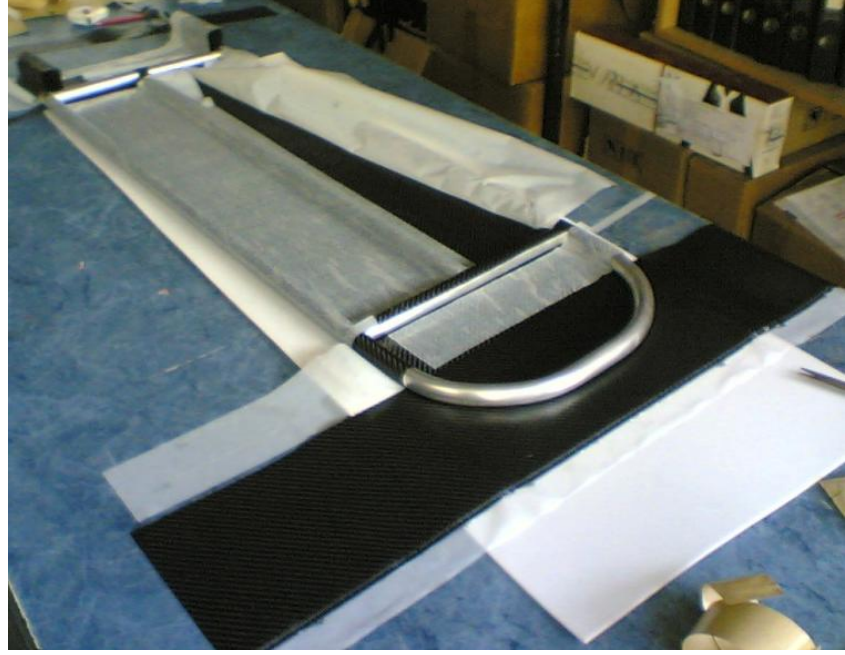
5.2.1. Prepreg malzemenin kesilmesi ve malzemenin kür işlemine hazırlanması

Pasarellada kullanılmak üzere kesilecek prepreg malzemenin karmaşık şekilli olmaması nedeniyle elle kesme yöntemi tercih edilmiştir. Alüminyum iskeletin etrafına sarılmak üzere kesilen prepreglerin ölçüleri 1200mmx1000mm'dir. Şekil 5.4'de kesilmiş prepreg tabakaları gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Alüminyum iskelete sarmak üzere kesilmiş prepreg tabakaları

Kesilen prepreg tabakaları sonlu elemanlar analizi ile belirlenen sırayla Şekil 5.5’de gösterildiği şekilde alüminyum iskelete sarıldı. Ancak prepreg ile alüminyum arasında kir veya tortu kalması yapışmayı ve doğru şekilde k rleşmeyi engelleyeceği için alüminyum iskelet sarılmadan önce temizleyici solvent ile temizlenmiştir.



Şekil 5.5. Prepreg tabakaların alüminyum iskelete sarılışı

Prepregin alüminyum iskelete sarılı hali Şekil 5.6’de gösterilmiştir. Prepreg tabakaları belirlenen sırada sarıldıktan sonra malzemeler k r işlemine hazırlanmıştır (Şekil 5.7).



Şekil 5.6. Prepreg tabakaların alüminyum iskelete sarılı hali



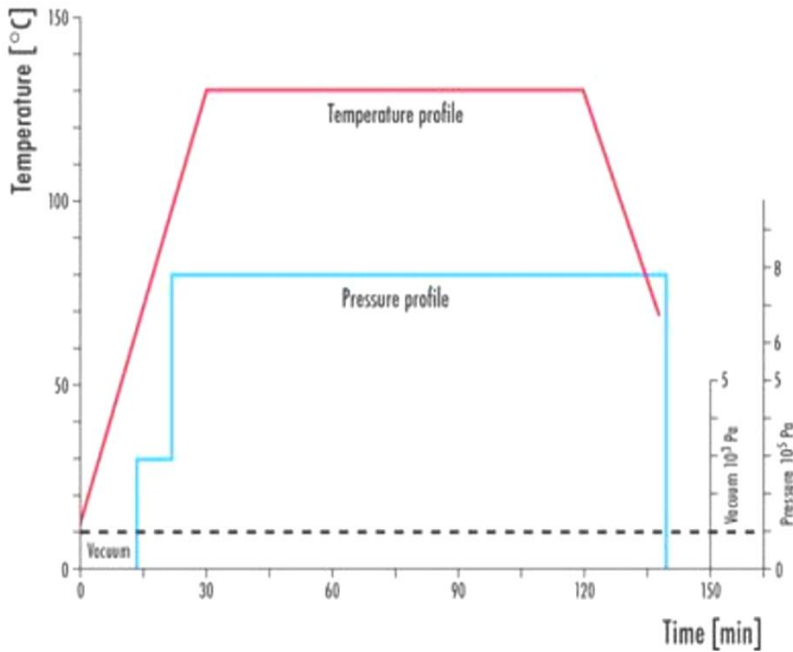
Şekil 5.7. Malzemenin kür işlemine hazırlanması

5.2.2. Seçilen üretim yöntemi

Üretilen prototip pasarellanın ince cidarlı ve geniş yapılı olmasından dolayı uygun ve daha az maliyetli olan otoklav yöntemi seçilmiştir.

5.2.2.1. Kür İşlemi

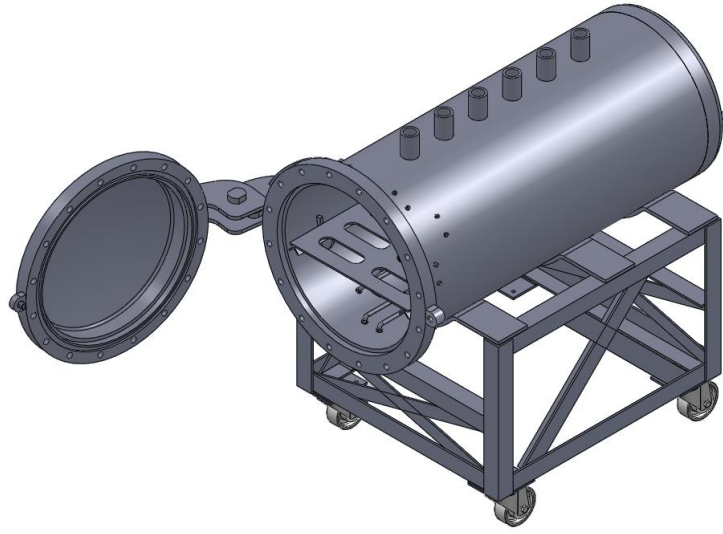
Otoklav yönteminde kür işlemi sırasında kullanılacak sıcaklık ve basınç değerleri preprege emdirilmiş olan reçinenin türüne bağlı olduğu için, kür çevrimi üretici tarafından belirtilmektedir. Üretici tarafından belirtilen kür eğrisi Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



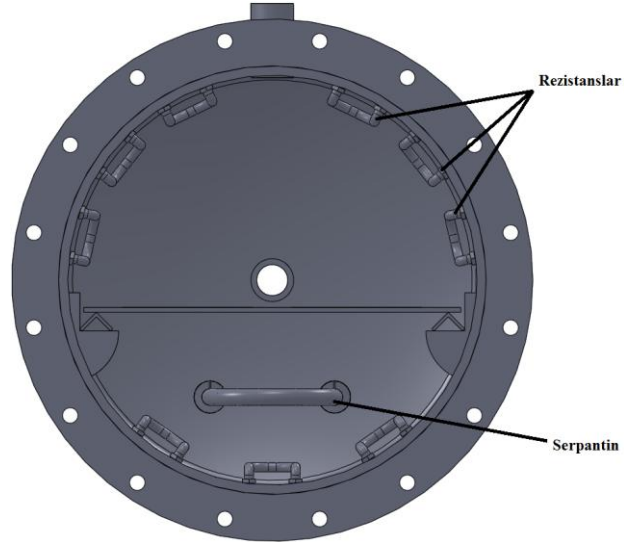
Şekil 5.8. SGL Firması tarafından E201 için verilen kür çevrimi (SGL, 2000)

5.2.2.2. Otoklav Tasarımı ve Üretimi

Kürleştirme eğrisine uygun olarak üretim yapılabilmesi için sıcaklık ve basınç değerleri bilgisayar ile kontrol edilebilen bir otoklavın üretilmesi gerekmektedir. Otoklav pasarella üretimine uygun olacak ölçülere sahip olarak Solidworks paket programında modellenmiştir (Şekil 5.9). Otoklavın üstünde bulunan yerlere sırasıyla vakum bağlantısı, sıcaklık sensörü, termometre, basınç boşaltım selenoid valfi, emniyet valfi ve manometre yerleştirilmiştir.



Şekil 5.9. Kürleştirme işlemi için tasarlanan otoklav modeli



Şekil 5.10. Rezistansların ve serpantin otoklav içersindeki yerleşimi

Otoklava sıcaklık ve basınç değerlerini kontrol etmek üzere 2 adet adım kontrol cihazı eklenmiştir. Bu cihazlar ile ayrıca ısıtma ve soğutma hızları, basınç değişim hızları da ayarlanabilmektedir. Otoklav içerisine ısıtma amacıyla her biri

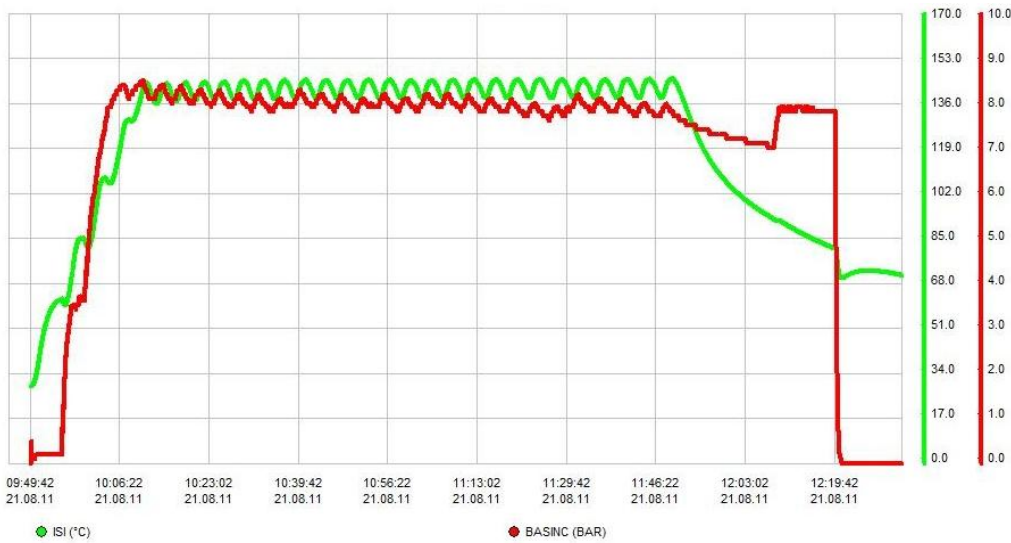
1000W gücünde 9 adet ısıtıcı rezistans, ayrıca soğutma amacıyla da 1 adet serpantin yerleştirilmiştir (Şekil 5.10). Serpantinde soğutma sıvısı olarak su kullanılmıştır.

Bilgisayarlı sıcaklık ve basınç kontrol ünitesine sahip otoklav tasarıma uygun olarak üretilmiştir (Şekil 5.11).



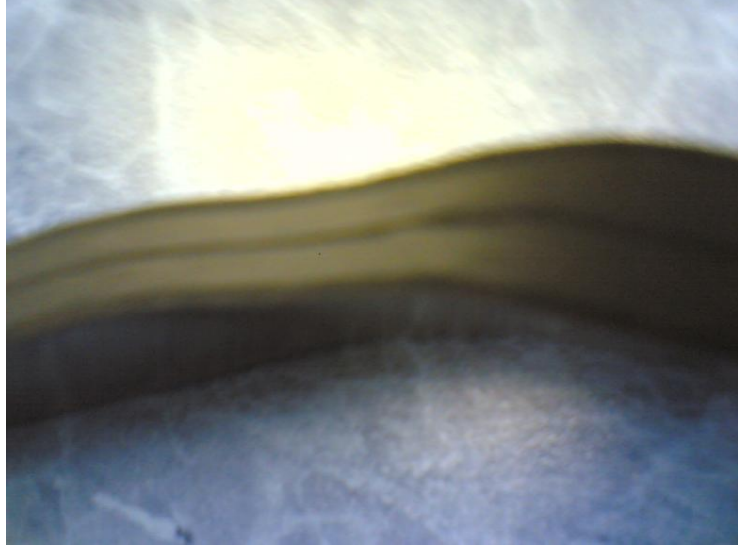
Şekil 5.11. Üretilen sıcaklık ve basınç kontrollü otoklavın son hali

Kür işlemi boyunca hedef sıcaklığa $\pm 3^{\circ}\text{C}$ toleransla ulaşılmaktadır. Otoklavın deneme üretiminde kaydedilen kür grafiği Şekil 6.12’de gösterilmiştir. Grafikte sıcaklık değişimi yeşil, basınç değişimi ise kırmızı renkle belirtilmiştir. Üretim basıncı 8 atm olarak ayarlandığında bir sorunla karşılaşılmamıştır ancak, SGL firması tarafından öngörülen 130°C sıcaklıkta kürleşme başarısız olduğundan dolayı kürleştirme işlemi 140°C ’de gerçekleştirilmiştir.

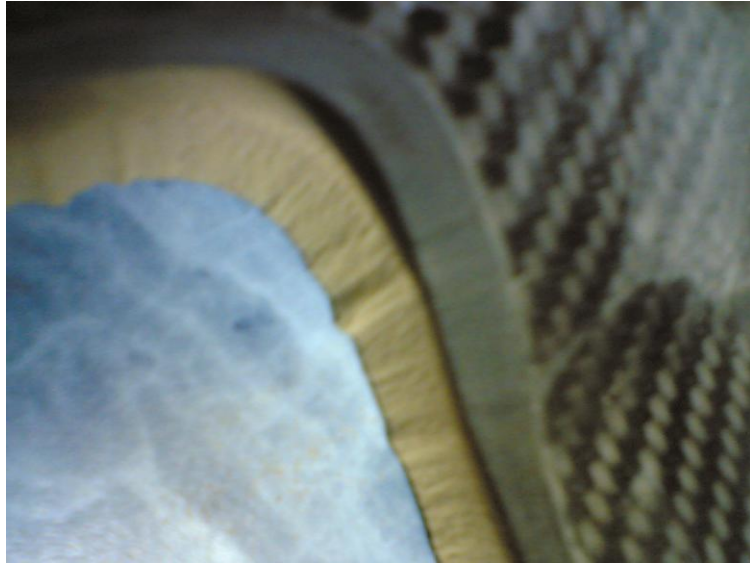


Şekil 5.12. Otoklav kür grafiği

140°C’de elde edilen numune, k rleŐme problemi olup olmadığını anlamak üzere kesilmiŐtir. Kesit görüntüsü Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’de gösterilmiştir. Őekillerden de görüldüğü üzere 140°C sıcaklıkta başarılı bir k r işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.13. Numunenin kesilmiş kenar görüntüsü-1

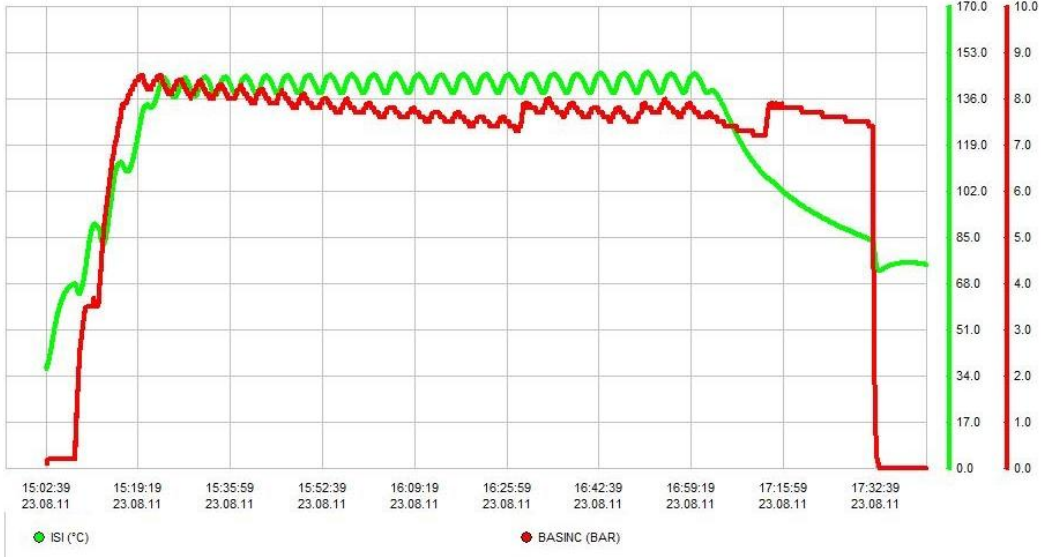


Şekil 5.14. Numunenin kesilmiş kenar görüntüsü-2

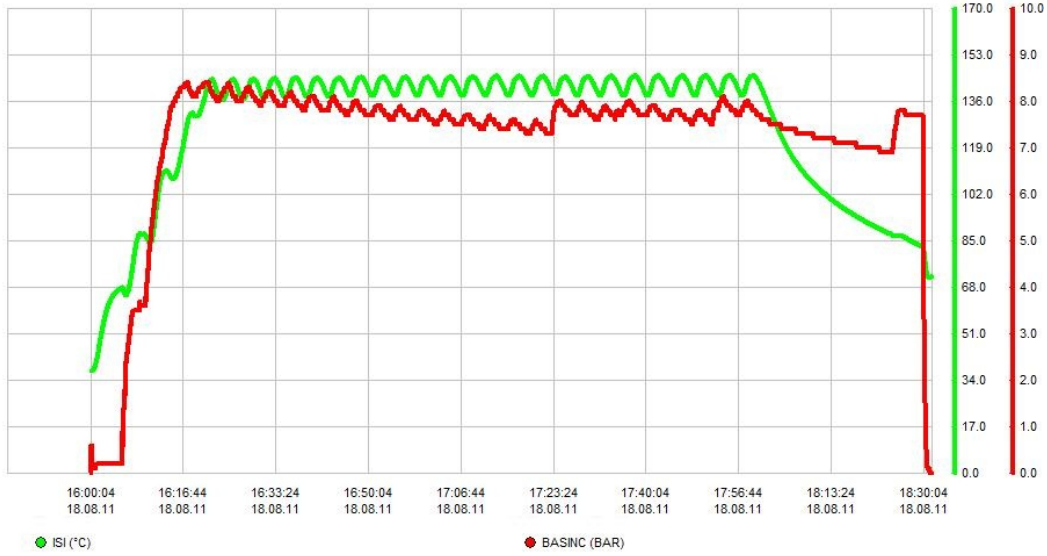
5.2.3. Pasarellanın k rleŐtirilmesi

Şekil 7.5’de gösterilen k r eğrisine uygun olarak üretim yapacak Şekilde tasarlanmış olan otoklav  nitesi kür işlemi sırasında kullanılmıştır. Otoklav bilgisayarlı sıcaklık ve basınç kontrol ünitesine sahip olduğundan dolayı k r işlemi boyunca hedef sıcaklığa $\pm 3^\circ\text{C}$ toleransla ulaŐılmıŐtır. Pasarella üretimine ait

kaydedilen kür grafikleri Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Grafikte sıcaklık değişimi yeşil, basınç değişimi ise kırmızı renkle belirtilmiştir.



Şekil 5.15. Pasarella üretimine ait otoklav kür grafiği-1



Şekil 5.16. Pasarella üretimine ait otoklav kür grafiği-2

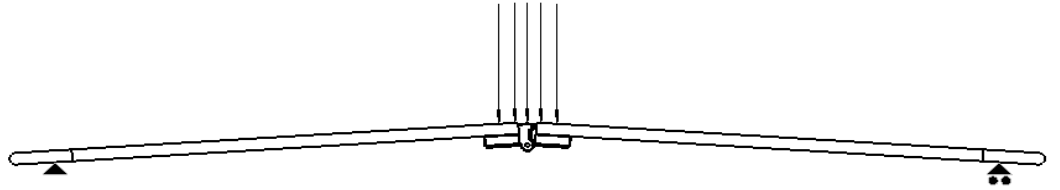
Kür işlemi sonrası özellikle cam kalıpla temas eden yüzeylerin özellikleri iyidir. Ancak elde edilen yarı mamüllerin öncelikle çapaklarının temizlenmesi ve ardından da montaj deliklerinin ve vidalarının hazırlanması gereklidir. Yarı mamüllerin montaj hazırlıkları tamamlandıktan sonra pasarellanın montajı tamamlanarak deplasman testleri yapılmıştır (Şekil 5.17).



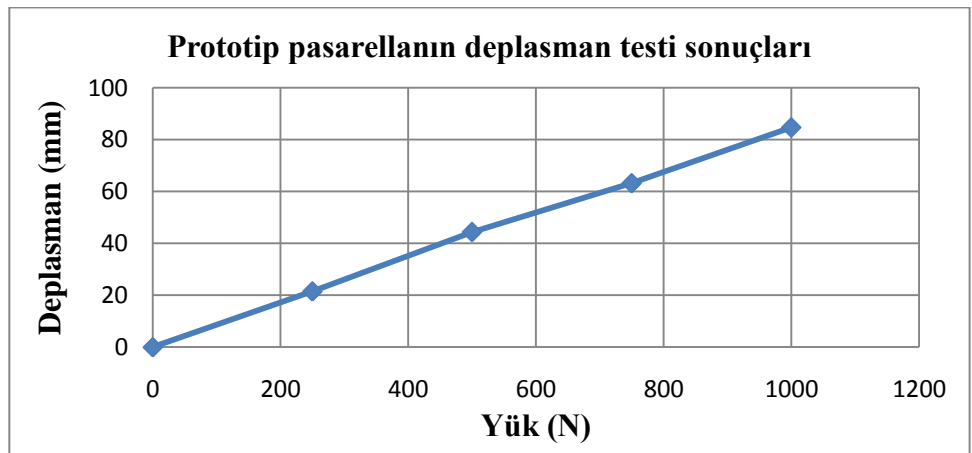
Şekil 5.17. Prototip kompozit pasarella

5.2.4. Pasarellanın test edilmesi

Pasarelları test etmek üzere hazırlanmış bir standart yoktur. Test sırasında tabakalar arası gerilmeleri ölçmek de mümkün değildir. Bu nedenle analiz sonuçlarını doğrulayabilmek amacıyla deplasman testi uygulamak uygun görüldü. Uygulanan testin şematik görüntüsü Şekil 5.18’de, test sonuçları Şekil 5.19’da gösterilmiştir.



Şekil 5.18. Uygulanan deplasman testinin şematik görüntüsü



Şekil 5.19. Prototip pasarellanın deplasman testi sonuçları

6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MEKANİK ANALİZ VE TASARIM İYİLEŞTİRMELERİ

6.1. Sonlu Elemanlar Metodu

Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan problemlerin büyük bir çoğunluğu direk çözülemez. Bu problemler, çözülmek üzere daha kolay alt problemlere ayrılarak daha anlaşılır biçimlere getirilmeye çalışılır. Oluşturulan alt problemlerin çözülüp birleştirilmesi ile esas problemin çözümü yapılmaya çalışılır. Bu yöntem ile problemin çözümünün tam değeri yerine kabul edilebilir yaklaşık bir değer tespit edilir. Örneğin, gerilme analizi üzerine çalışan mühendisler problemini basit kiriş, plak, silindir gibi geometrisi bilinen benzer şekillerle sınırlayarak; probleminin çözümünü yaklaşık olarak hesaplarlar.

Bir nümerik teknik olan “Sonlu Elemanlar Yöntemi” özellikle katı mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve titreşim gibi problemlerin bilgisayarlar yardımıyla çözümünde en sık kullanılan çok gelişmiş bir tekniktir. Sonlu Elemanlar Yönteminde (Finite Elements Method, FEM) model daha küçük elemanlara bölünür ve bu elemanlar belli noktalardan birbirlerine bağlanır, buna düğüm denir. Katı modellerde her bir elemandaki yer değiştirmeler doğrudan düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerle ilişkilendirilir. Düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler ise elemanların gerilmeleriyle ilişkilidir. Sonlu Elemanlar Yöntemi bu düğümlerdeki yer değiştirmeleri çözer ve böylece gerilme yaklaşık olarak uygulanan yüke eşit bulunur.

Hesaplama yapılmak istenen ortamda gerilme, yer değiştirme, basınç, sıcaklık v.b. değerler sonsuz sayıda farklı değere sahiptir. Diğer taraftan bu ortamın belirli bir bölgesinin de aynı şekilde ortam özelliği gösterdiği bilinmektedir. Bu alt bölgedeki değişkenler sonlu sayıda bilinmeyen olan bir fonksiyon ile tanımlanabilir. Bilinmeyen sayısının az ya da çok olmasına göre de fonksiyon lineer veya yüksek mertebeden olur. Ortamın alt bölgeleri de aynı karakteristik özelliği gösteren bölgeler olduğundan, bu bölgelere ait alan denklem takımları birleştirilerek tüm sistemi ifade eden denklem takımı oluşturulur. Oluşturulan bu denklem takımının çözümü ile tüm ortamın alan değişkenleri sayısal olarak elde edilir.

6.1.1. Sonlu elemanlar metodunun uygulanışı ve cismin sonlu elemanlara bölünmesi

Sonlu elemanlar metodunun temel prensibi öncelikle bir elemana ait sistemin özelliklerini içeren denklemlerin çıkartılıp daha sonra tüm sistemi temsil edecek şekilde eleman denklemlerini birleştirilerek sisteme ait lineer denklem takımının elde edilmesidir.

Sonlu eleman probleminin çözümünde ilk yapılması gereken eleman tipinin belirlenmesi ve modelin elemanlara ayrılmasıdır. Modelin geometrik yapısına en uygun eleman tipi seçilmelidir. Seçilen elemanların modele benzerliği oranında elde edilecek sonuç, gerçek çözüme yakın olacaktır.

Sonlu elemanlar metodunda kullanılan elemanları boyutlarına göre dört kısımda incelenebilir.

- **Tek boyutlu elemanlar:** Tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipidir.
- **İki boyutlu elemanlar:** İki boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipidir. Bu grubun temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanın altı, dokuz ve daha fazla düğüm içeren çeşitleri vardır. Düğüm sayısı seçilecek interpolasyon fonksiyonunun derecesiyle ilgilidir. Dörtgen eleman problemin geometrisine uyum sağladığı ölçüde kullanışlılığı olan bir elemandır. Dört veya daha fazla düğümlü olabilir.
- **Dönel elemanlar:** Eksenel olarak simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipidir. Bu elemanlar bir veya iki boyutlu elemanların simetri eksenini etrafında bir tam dönme yapmasıyla oluşurlar. Gerçekte üç boyutlu olan bu elemanlar, eksenel simetrik özellik gösteren problemleri iki boyutlu problem gibi çözmeyi sağladığı için çok kullanışlıdır.
- **Üç boyutlu elemanlar:** Bu grubun en temel elemanı üçgen piramittir. Bunun dışında dikdörtgenler prizması ve genel olarak altı yüze sahip elemanlar bu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleridir.

- **İzoparametrik sonlu elemanlar:** Model sınırları eğri denklemleri ile tanımlanmışsa doğrulardan oluşmuş olan elemanların bu modeli doğru olarak tanımlaması mümkün değildir. Böyle durumlarda modeli yeterli hassasiyetle tanımlayabilmek için elemanların boyutlarını küçültüp, adetlerini arttırmak gerekmektedir. Bu durumda çözülmesi gereken denklem sayısı artar ve dolayısıyla gerekli bilgisayar kapasitesi ve zamanın büyümesine sebep olur. Bu durumdan sakınmak için modelin eğri denklemleri ile tanımlanan sınırlarına uyum sağlayacak eğri kenarlı elemanlar kullanmak uygun olur. Böylece hem modelin daha iyi tanımlanması hem de daha az sayıda eleman ile çözüm yapılması sağlanır. Bu elemanların üzerindeki düğüm noktaları bir fonksiyon ile tanımlanır. İzoparametrik sonlu elemanın özelliği, her noktasının konumunun ve yer değiştirmesinin aynı mertebeden aynı şekil fonksiyonu ile tanımlanabilmesidir. İzoparametrik elemanların bir diğer adı eşparametrelili elemanlardır.

6.1.2. Eleman direngenlik matrisinin elde edilmesi

Elemanın direngenliğinin bulunurken elemana etki eden dış etkenler ile alan değişkenleri arasında bir ilişki kurulur. Örneğin, bir elastisite probleminde elemana etki eden dış kuvvet ile yer değiştirmeler arasındaki ilişki bir lineer denklem takımı ile ifade edilir.

$$[K] \{U\} = \{P\}$$

Burada $\{U\}$ düğüm yer değiştirmelerini, $\{P\}$ düğüm dış kuvvetlerini ifade eden sütun matrisleridir. $[K]$ ise elemanın geometrik ve elastik özelliklerini ifade eden direngenlik matrisidir. Elemanın direngenlik matrisi elde ederken çözülecek problemin konusu alan değişkeni, seçilen eleman tipi, seçilen interpolasyon fonksiyonu, eleman özelliklerini elde ederken kullanılan metot gibi pek çok faktör göz önüne alınır. Bu faktörlere göre eleman direngenliğinin elde edilmesinde değişik yollar izlenir. Çözüm için, sistemin sınır şartları da göz önüne alınarak matris sisteminin çözümünü yapmak gerekir.

6.2. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Mekanik Analiz

Geometrik tasarımı yapılan pasarellanın geometrisinin ve imalatında kullanılacak kompozit malzemenin, mekanik davranışlar üzerindeki etkisini incelemek üzere ABAQUS paket programı kullanılmıştır. Kompozit malzemelerin

doğrultuya bağlı olarak değişen özellikleri ve alüminyum iskeletin varlığından dolayı oluşan kesit değişimleri geleneksel yöntemlerle mekanik analiz yapılmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle bilgisayar destekli mühendislik yazılımları yardımıyla, sonlu elemanlar yöntemi uygulanarak karmaşık geometrik yapıda ve değişken malzeme özelliklerine sahip olan pasarellanın davranışı incelenebilmiştir.

Pasarellanın mekanik analizinde izlenen yol şöyle sıralanabilir;

- 1)Malzeme özelliklerinin girilmesi,
- 2)Analizde kullanılacak prepreg dizilimlerinin belirlenmesi,
- 3)Sonlu elemanlar yönteminde kullanılacak modelin oluşturulması,
- 4)Sınır koşullarının ve yük koşullarının belirlenmesi,
- 5)Çözüm,

6.2.1. Malzeme Özelliklerinin ve Prepreg Diziliminin Girilmesi

Pasarella üretiminde, sahip olduğu üstün özellikler ve kullanım kolaylığı nedeniyle prepreg malzeme kullanılmasına karar verilmiştir. Prepreg malzeme üreticisi olan SGL Technologies GmbH şirketiyle yapılan görüşmelerde pasarella üretiminde kullanılacak SIGRAFİL® CE 1201-230-39 unidirectional prepreg ve SIGRATEx® CE 8204-410-42S 2x2 twill prepreg seçilmiştir.

Çizelge 6.1’de SGL SIGRAFİL® CE 1201-230-39 unidirectional karbon fiber prepreg malzemenin, Çizelge 6.2’de ise SIGRATEx® CE 8204-410-42S 2x2 twill prepreg malzemenin mekanik özellikleri verilmiştir.

Sonlu elemanlar analizinde, kompozit malzeme programa tanıtılmıştır. Bu amaçla yönlere bağlı elastisite modülleri, kayma modülleri ve poisson oranları gibi üretici tarafından verilen mekanik özellikler kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar analizinin doğrulunun araştırılması amacıyla üretilen prototip dizilimi olan $[T_6/\bar{A}]_S$ sisteme tanıtıldı.

Çizelge 6.1. SIGRAFİL® CE 1201-230-39 UD prepreg özellikleri (SGL, 2009)

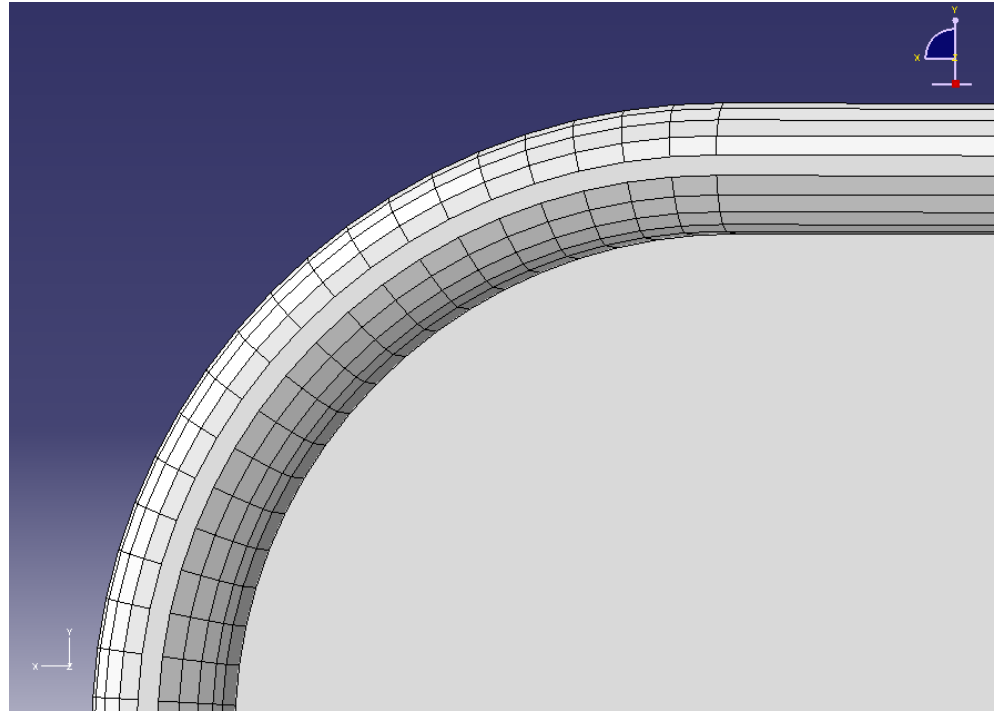
SIGRAFİL® CE 1201-230-39 UD prepreg	
0° Çekme Modülü (GPa)	130
0° Çekme Dayanımı (MPa)	2600
0° Basma Dayanımı (MPa)	1580
90° Çekme Modülü (GPa)	8,5
90° Çekme Dayanımı (MPa)	78
90° Basma Dayanımı (MPa)	255
Tabakalar arası kayma modülü (GPa)	4,2
Tabakalar arası kayma dayanımı (MPa)	4800
Tabaka kalınlığı (mm)	0,22
Yoğunluk (g/cm ³)	1,55

Çizelge 6.2. SIGRATEX® CE 8204-410-42S 2x2 twill prepreg özellikleri (SGL, 2010)

SIGRATEX® CE 8204-410-42S 2x2 twill prepreg	
0° Çekme Modülü (GPa)	59,65
0° Çekme Dayanımı (MPa)	903,2
0° Basma Dayanımı (MPa)	937,7
90° Çekme Modülü (GPa)	59,65
90° Çekme Dayanımı (MPa)	903,2
90° Basma Dayanımı (MPa)	937,7
Tabakalar arası kayma modülü (GPa)	3,3
Tabakalar arası kayma dayanımı (MPa)	90
Tabaka kalınlığı (mm)	0,38
Yoğunluk (g/cm ³)	1,52

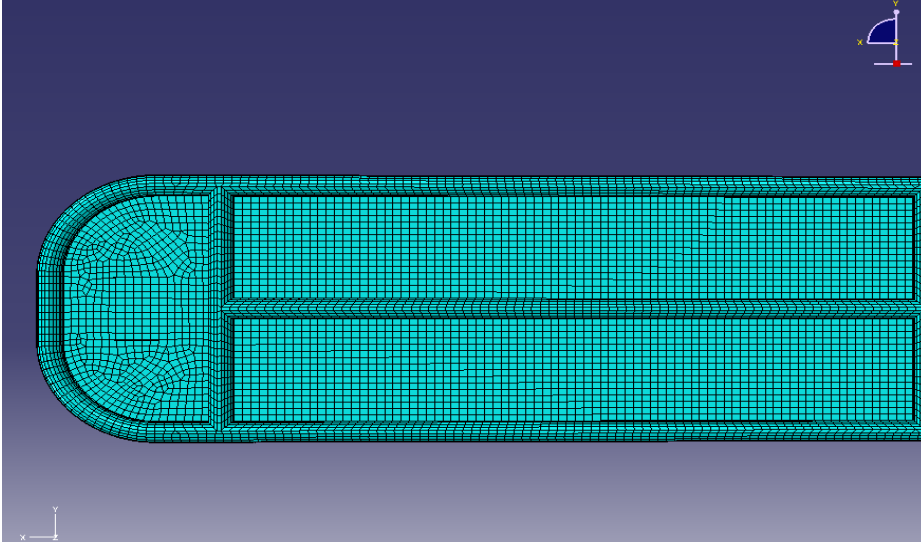
6.2.2. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılacak Modelin Oluşturulması

Her bir dizilim, o dizilim analiz edileceği sırada ABAQUS programının compositelayup komutu kullanılarak programa tanıtılır. Bu komutu kullanabilmek için kompozit pasarellanın sonlu elemanlar modelinde bazı değişiklikler yapılmıştır. Bu komut kullanıldığında komutun atandağı yüzeyin eğri olmaması gerekir. Eğri bir forma sahip bir yüzeyin normali yüzeye dik olacak şekilde her noktada farklı bir doğrultuya sahip olacağı için program prepreg dizilimi için bir normal tanımlayamaz. Bundan dolayı modelin dairesel kesitli bölgelerinin çokgen forma getirilmesi gerekir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Modeldeki dairesel kesitlerin çokgen şekline getirilmesi

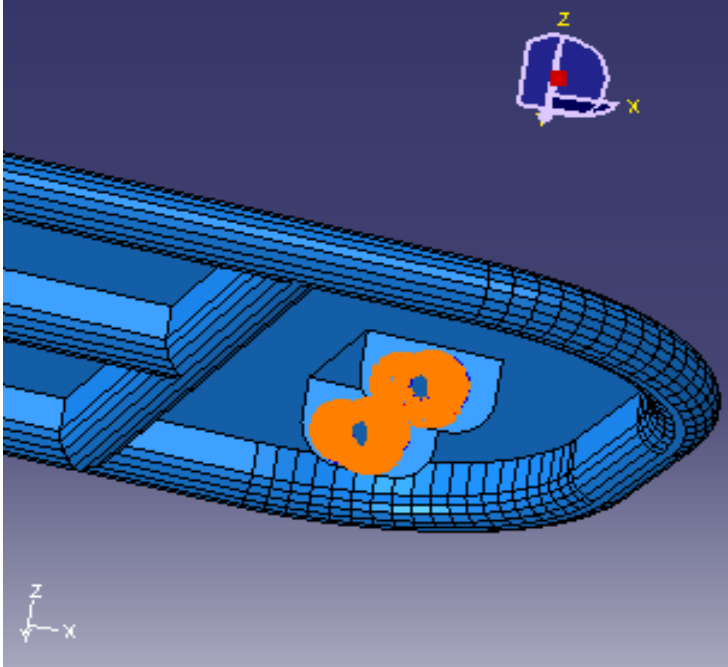
Modelleme tamamlandıktan sonra, elemanlarına ayırma (mesh) işlemi gerçekleştirilir. Elemanların büyüklüğü ve şekli kullanıcı tarafından ayarlanabilmektedir. Şekil 6.2’de elemanlarına ayrılmış pasarella modeli gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Elemanlarına ayrılmış pasarella modeli

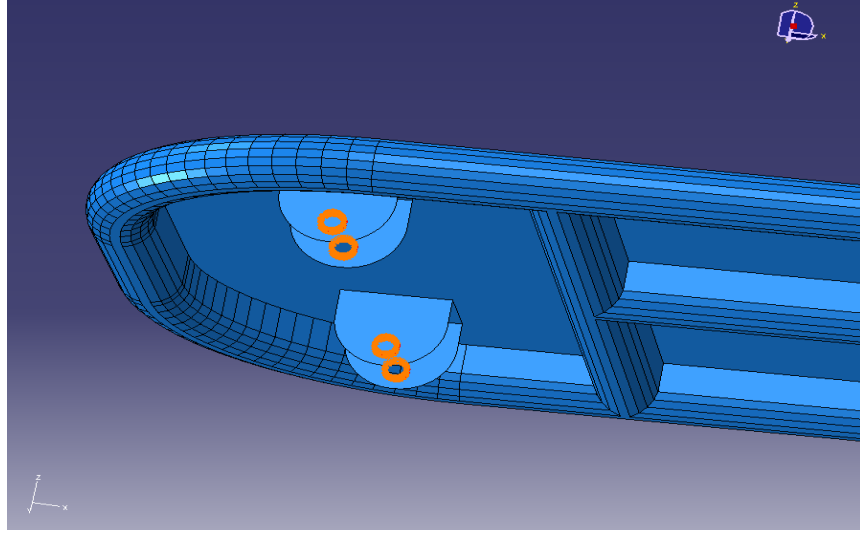
6.2.3. Sınır Koşullarının ve Yük Koşullarının Belirlenmesi

Sonlu elemanlar analizinin bir sonraki adımında modelin sınır koşullarının belirlenmesi ve kuvvet, basınç, moment gibi fiziksel etkilerin uygulanması gerekir. Pasarellanın tekneye bağlanacağı kısım sabit mesnetli olarak bağlanmaktadır (Şekil 6.3).



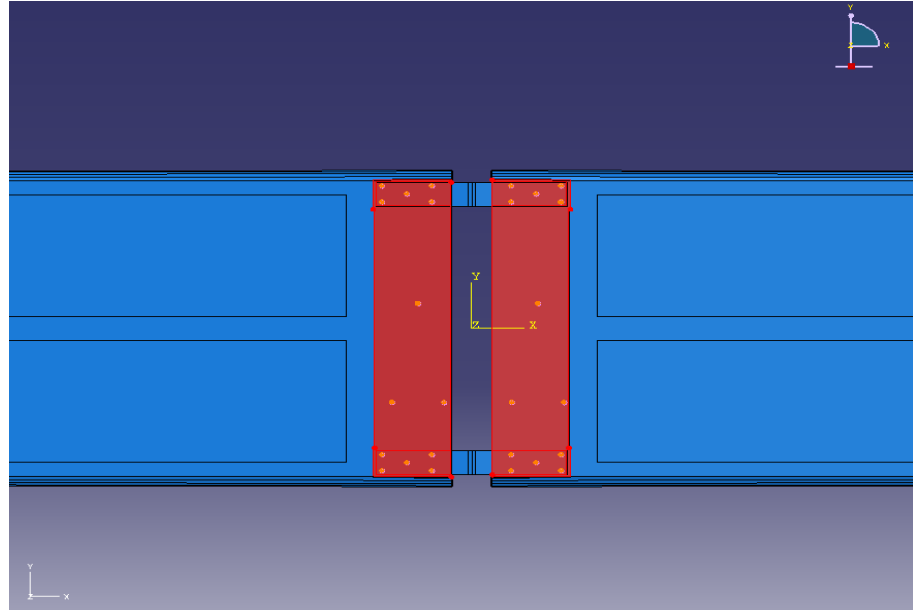
Şekil 6.3. Pasarellanın tekneye sabit mesnetli olarak bağlanan tarafı

Pasarellanın iskeleye sarkıtılan tarafı ise bir tekerlek üzerinde iskelede serbest olarak durmaktadır. Bu nedenle diğer tarafın hareketli mesnet ile tanımlanması gerekir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4. Pasarellanın iskelede hareketli olarak mesnetli tarafı

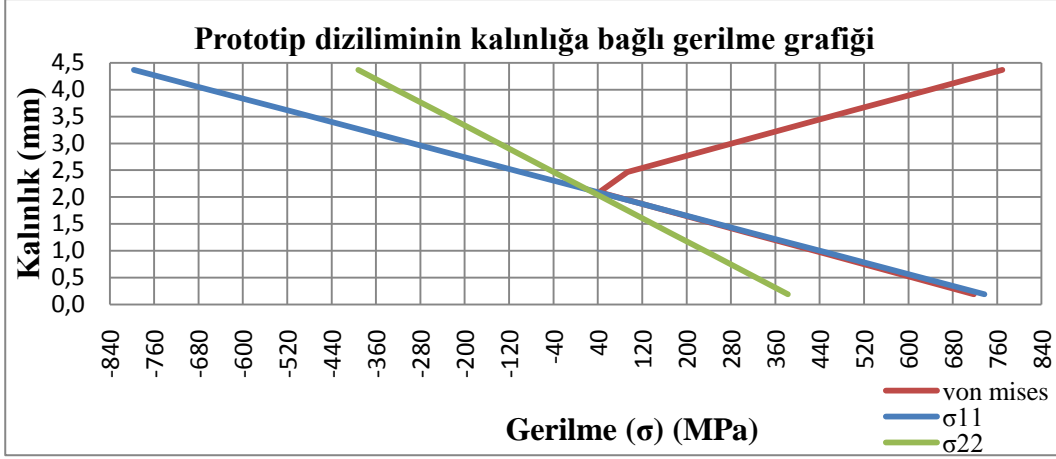
Daha önce de belirtilen nedenlerden pasarellanın 80-100 kg ağırlığa dayanması gereklidir. Bu nedenle statik test yükü yayılı olarak toplam 1000N olacak şekilde uygulanmıştır (Şekil 6.5).



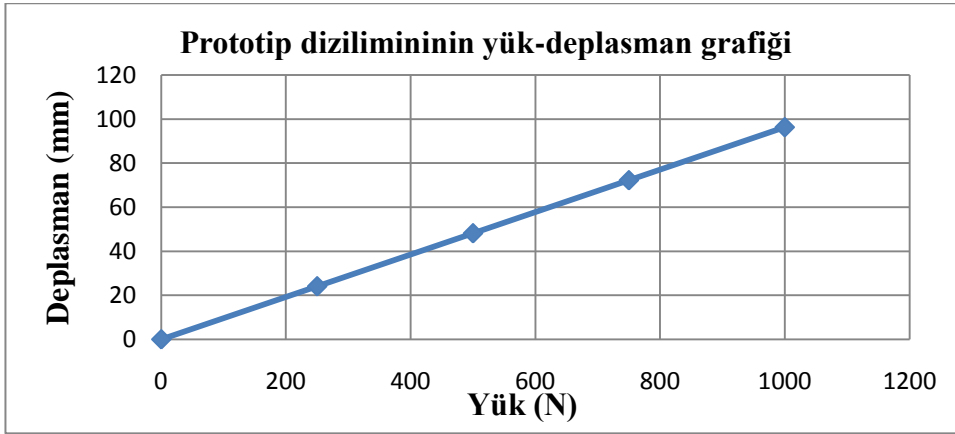
Şekil 6.5. Pasarellaya uygulanan 1000N yayılı yükün konumu

6.2.4. Çözüm

Test kuvvetleri ve sınır koşullarının tanımlanmasının ardından çözüm yapılarak modelde meydana gelen deformasyonlar, gerilmeler vb. sonuçlar elde edilmektedir. Şekil 6.6'da ve Şekil 6.7'da pasarella protip dizilimi ile modellenmişken kritik bölgelerde oluşan Von mises gerilmelerinin, fiber doğrultusundaki ve fibere dik doğrultudaki gerilmelerin kesit kalınlığına bağlı olarak değişimi verilmiştir.



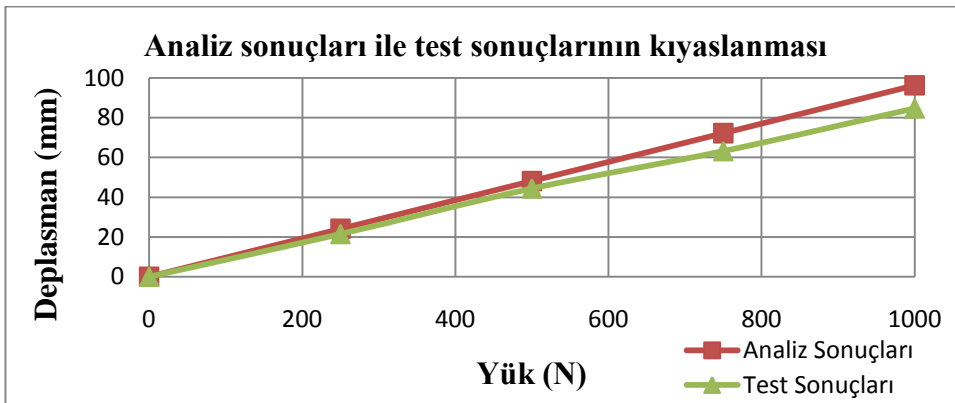
Şekil 6.6. Pasarella prototip dizilimi ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi



Şekil 6.7. Pasarella prototip dizilimi ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği

6.2.5. Deplasman Testiyle Bilgisayar Analizinin Kıyaslanması

Şekil 6.8' de test sonuçlarıyla analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Yeşil eğri ile gösterilen test sonuçlarının kırmızı eğri ile gösterilen analiz sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.



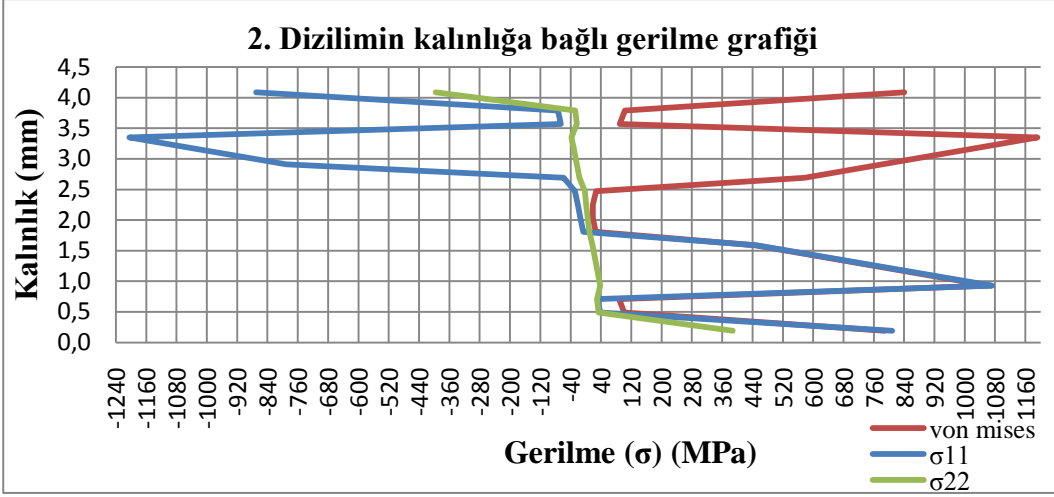
Şekil 6.8. Analiz ve test sonuçlarının karşılaştırılması

6.2.6. Değişik Dizilimlerinin Araştırılması

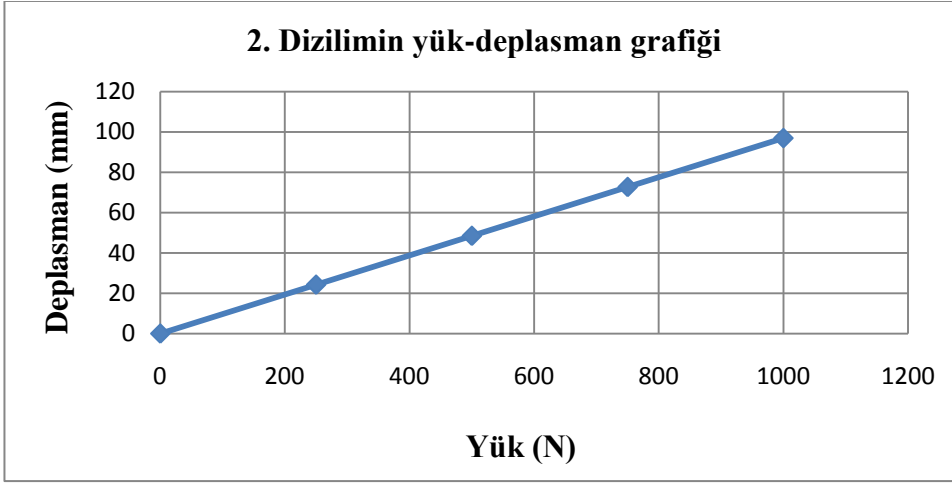
Sonlu elemanlar analizinde kullanılmak üzere 14 dizilim belirlenmiş ve alüminyum iskeletin etrafına sarıldığında oluşacak mekanik özellikler analiz edilmiştir. Prototip üretiminde kullanılan ilk dizilim olmak üzere belirlenen 14 dizilim aşağıdaki şekildedir;

- 1-) $[T_6/\bar{A}]_s$
- 2-) $[T/90_2/0_4/90_2/\bar{A}]_s$
- 3-) $[T/90_2/0_3/90_2/\bar{A}]_s$
- 4-) $[T/90_2/0_5/\bar{A}]_s$
- 5-) $[T/90_2/0_6/\bar{A}]_s$
- 6-) $[T/0_8/\bar{A}]_s$
- 7-) $[T/90_2/0_3/90_2/T/\bar{A}]_s$
- 8-) $[T/90/0/90/0/90/0/90/\bar{A}]_s$
- 9-) $[T/90/0/90/0_2/90/0/90/\bar{A}]_s$
- 10-) $[T/90/0/45/-45_2/45/0/90/T/\bar{A}]$
- 11-) $[T/90/45/-45/0/-45/45/90/T/\bar{A}]$
- 12-) $[T/90/0_4/90/T/\bar{A}]_s$
- 13-) $[T_5/\bar{A}]_s$
- 14-) $[T/90_2/0_6/90_2/\bar{A}]_s$

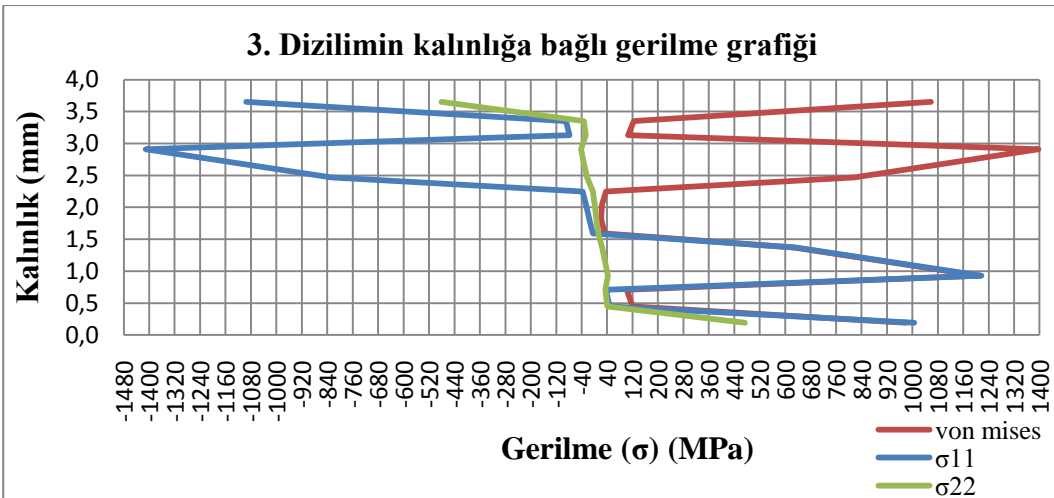
Yukarıdaki dizilimlerde T, SIGRATEX[®] CE 8204-410-42S 2x2 twill prepreg malzemeyi; A, alüminyum iskeleti; diğer açı değerleri ise SIGRAFIL[®] CE 1201-230-39 UD prepreg malzemeyi fiber doğrultusuyla birlikte ifade etmektedir.



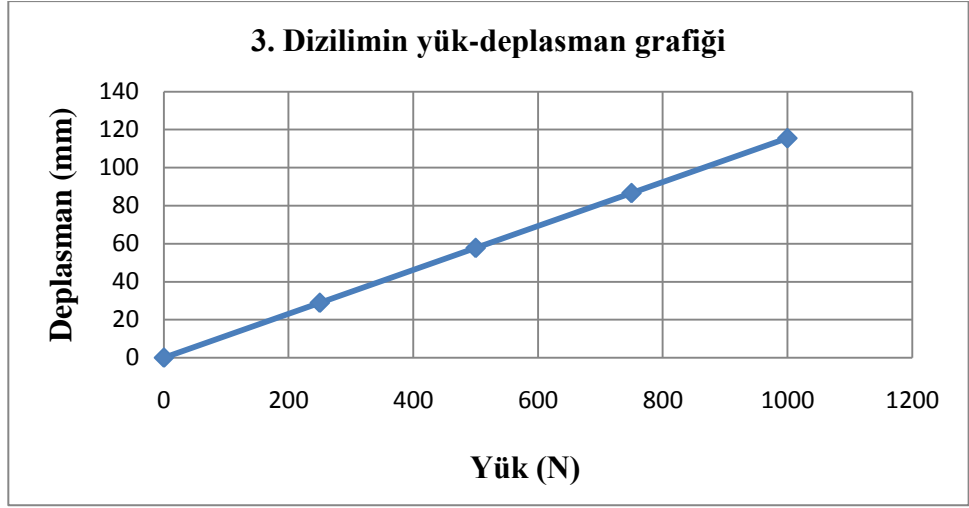
Şekil 6.9. Pasarella 2. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi



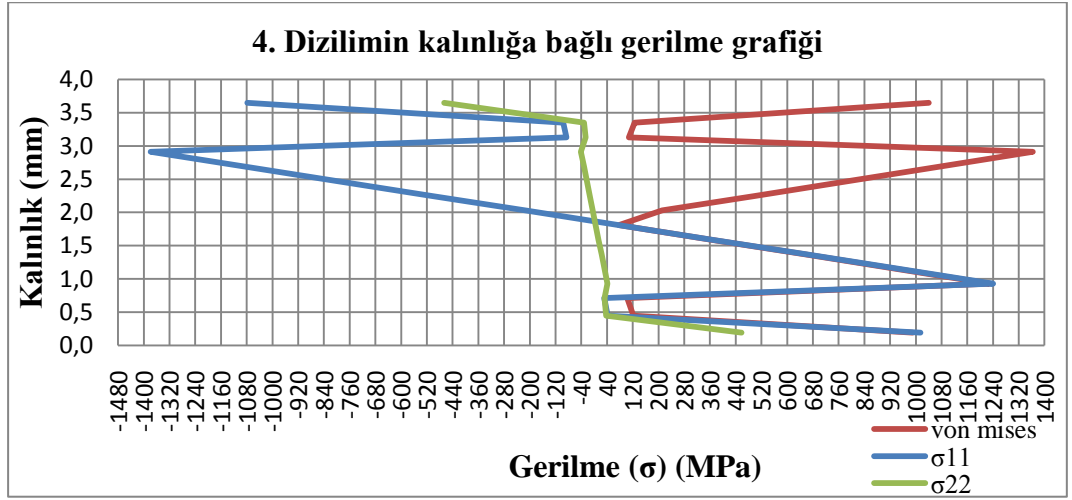
Şekil 6.10. Pasarella 2. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği



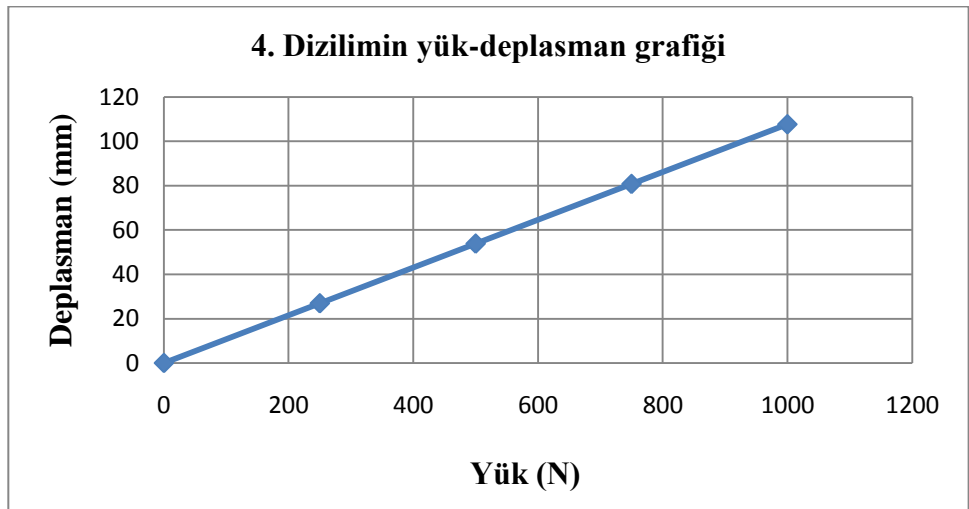
Şekil 6.11. Pasarella 3. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi



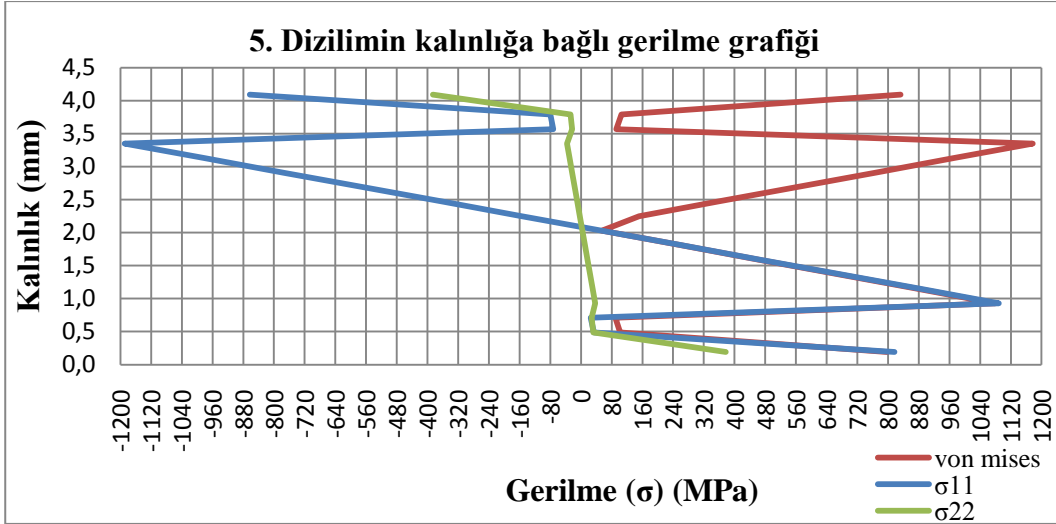
Şekil 6.12. Pasarella 3. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği



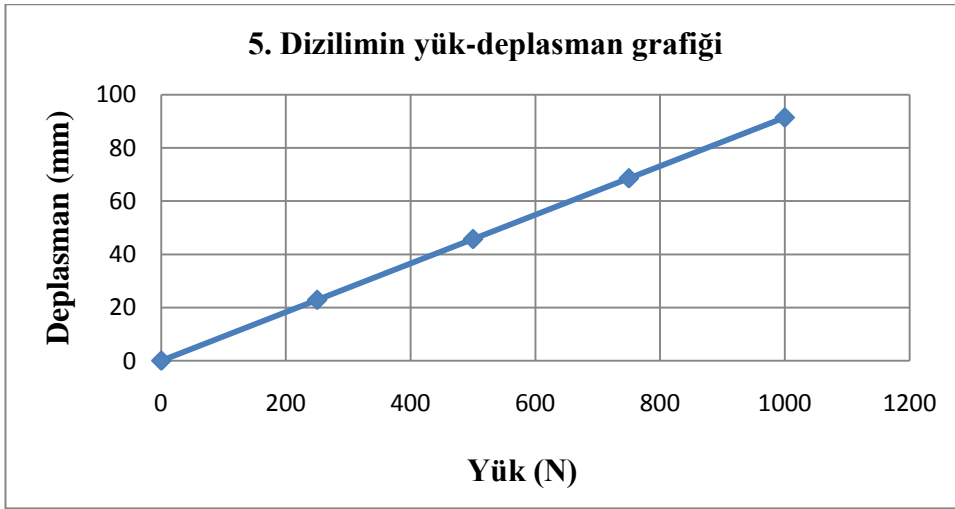
Şekil 6.13. Pasarella 4. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi



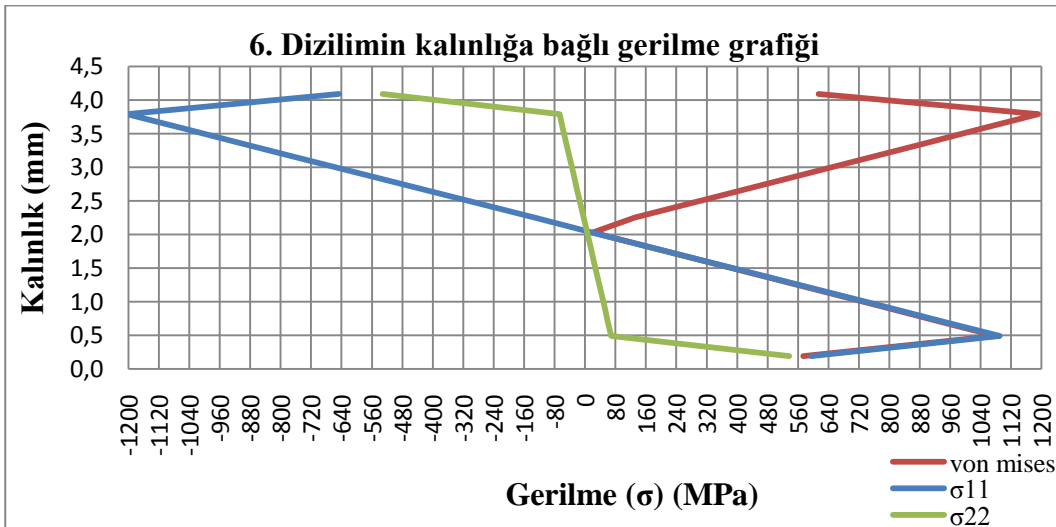
Şekil 6.14. Pasarella 4. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği



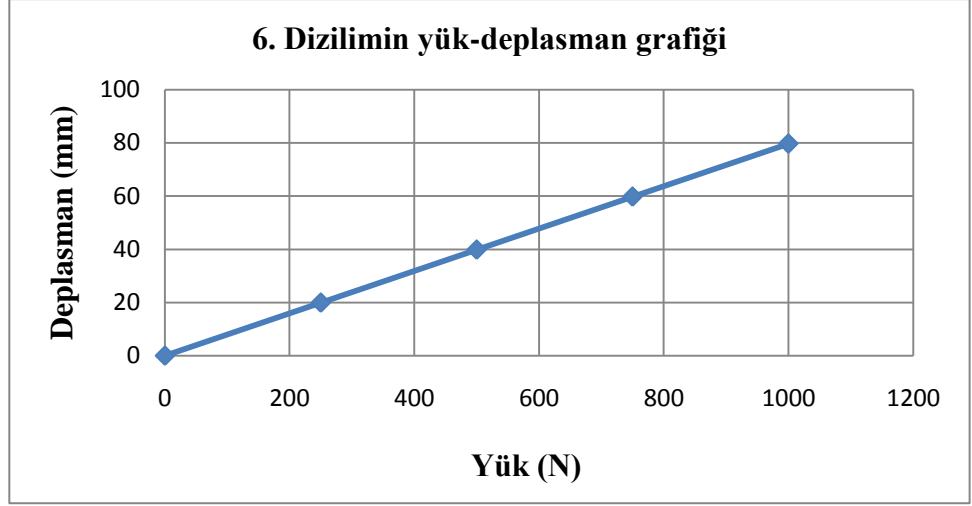
Şekil 6.15. Pasarella 5. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi



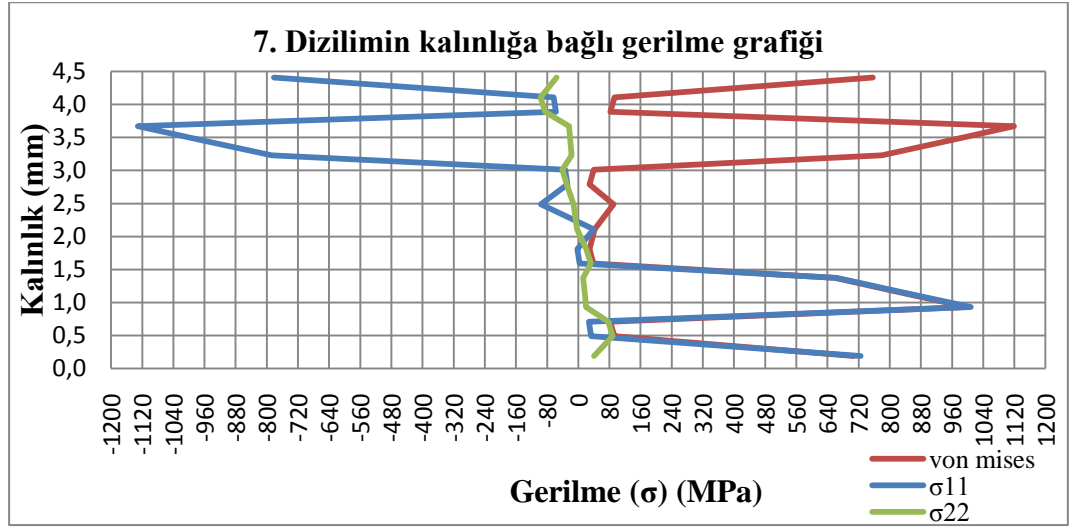
Şekil 6.16. Pasarella 5. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği



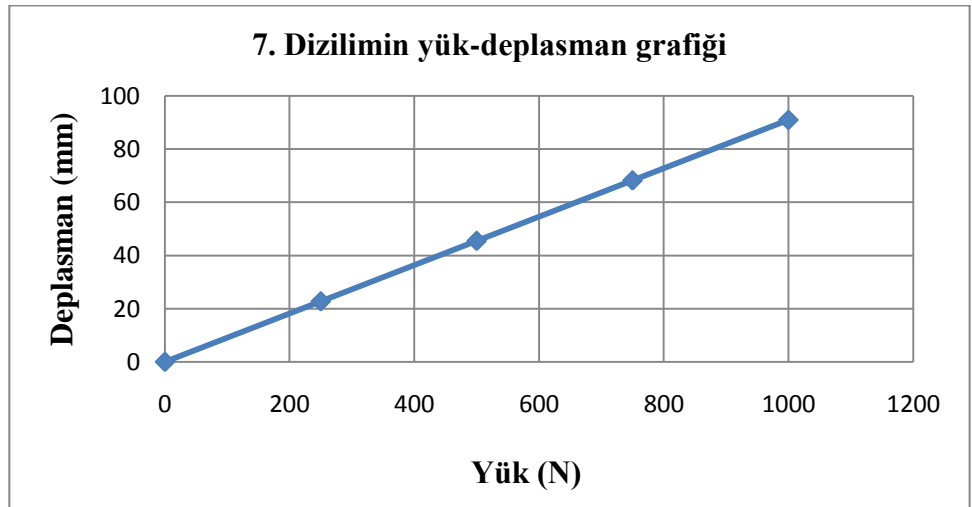
Şekil 6.17. Pasarella 6. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi



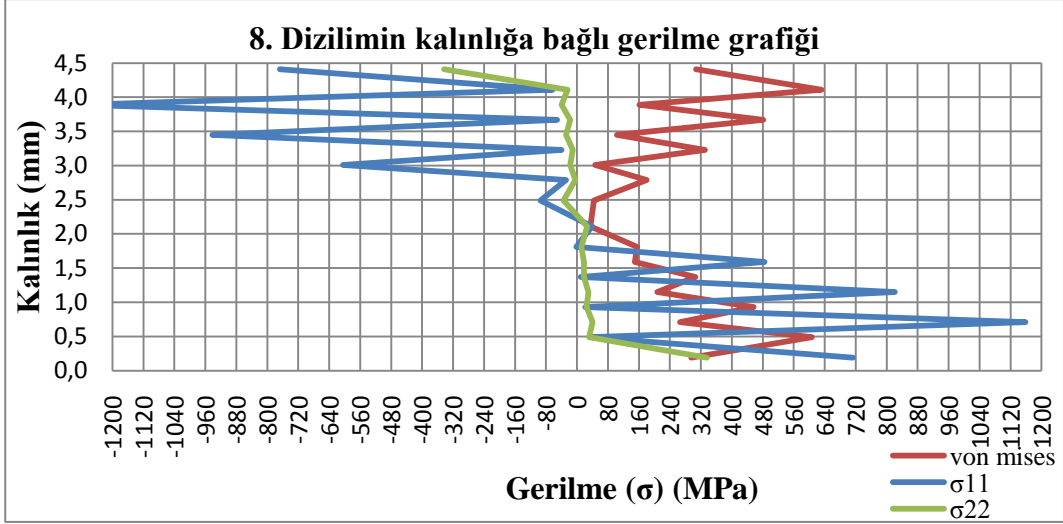
Şekil 6.18. Pasarella 6. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği



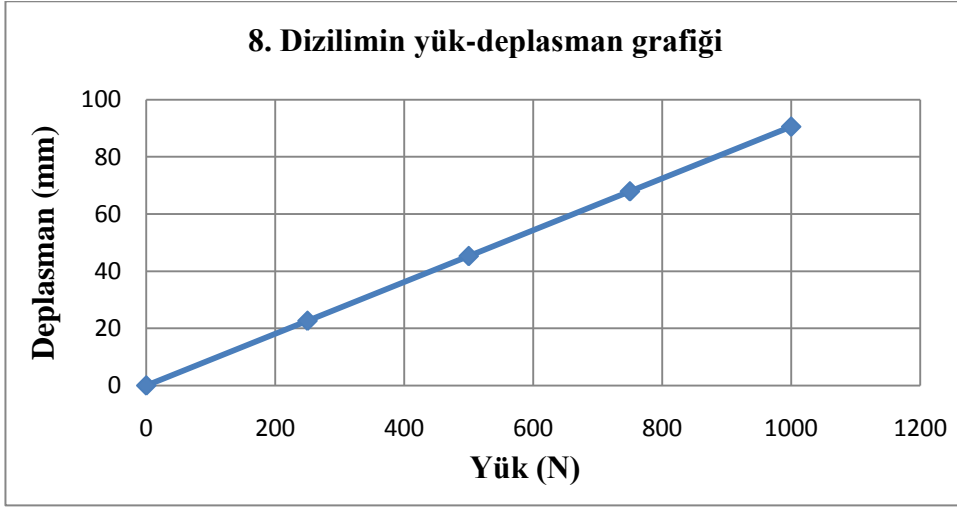
Şekil 6.19. Pasarella 7. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi



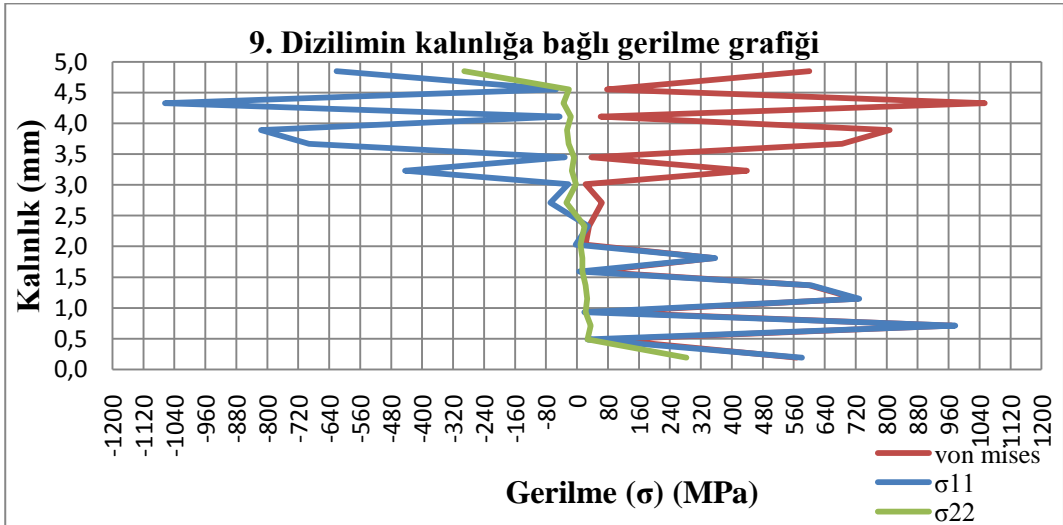
Şekil 6.20. Pasarella 7. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği



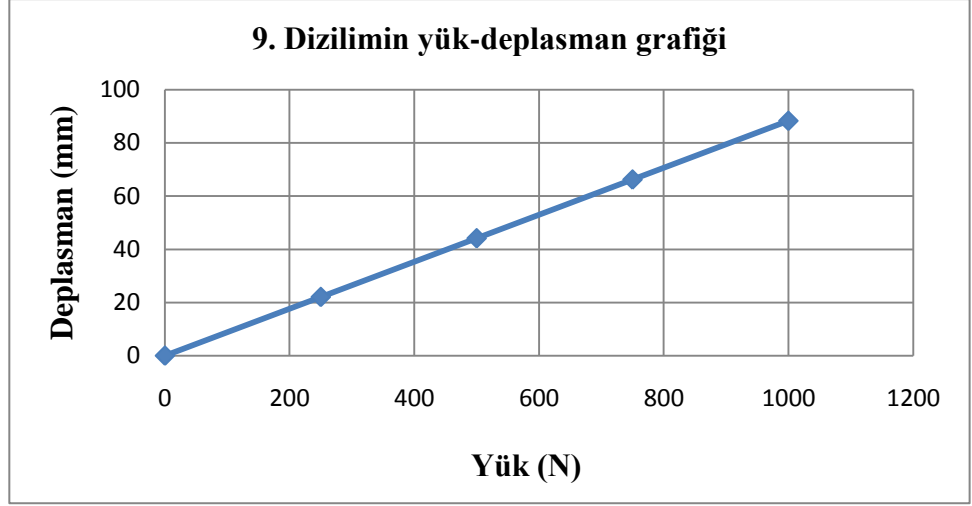
Şekil 6.21. Pasarella 8. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi



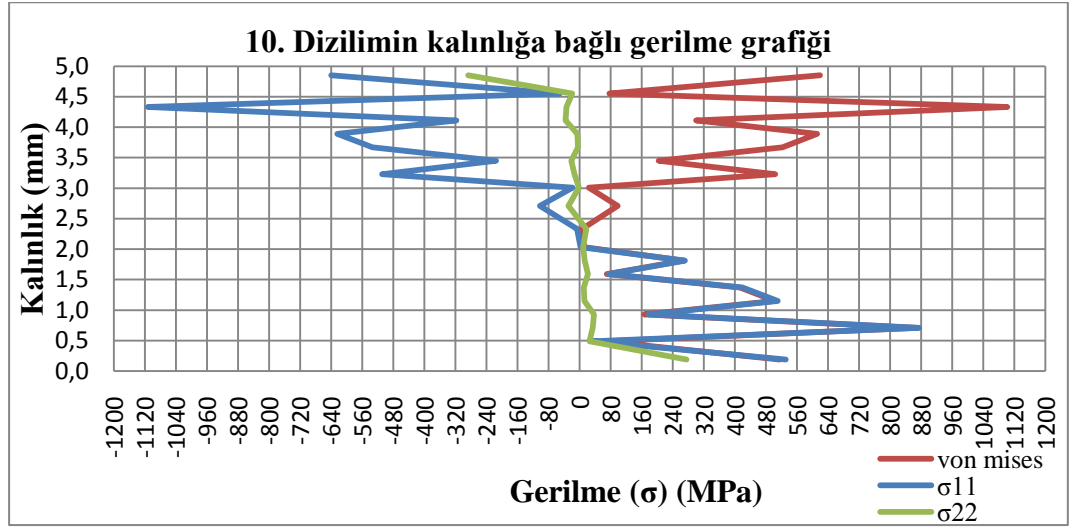
Şekil 6.22. Pasarella 8. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği



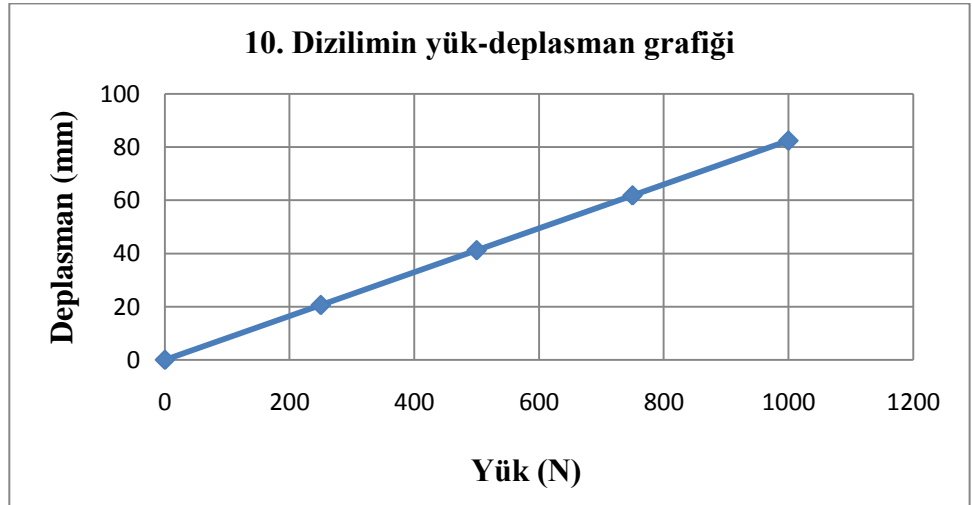
Şekil 6.23. Pasarella 9. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi



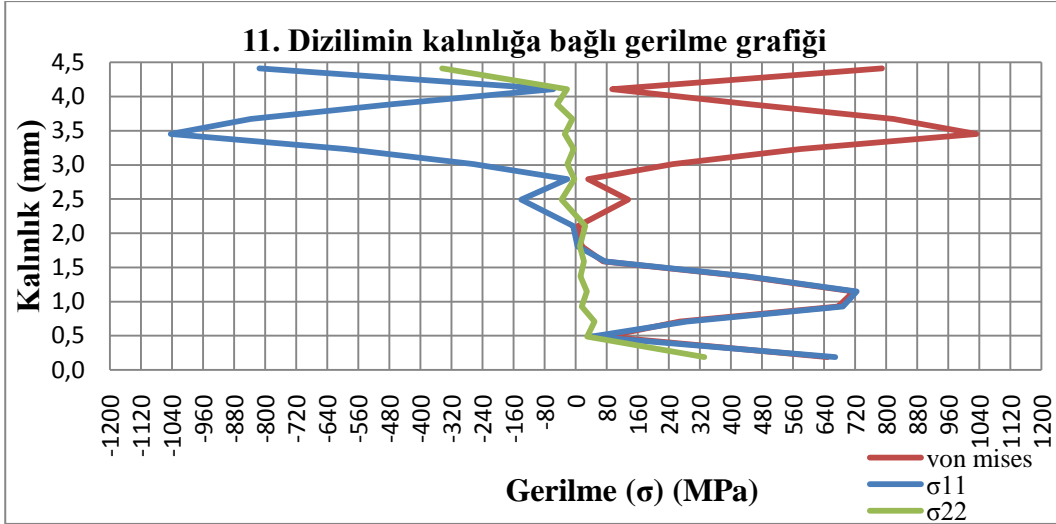
Şekil 6.24. Pasarella 9. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği



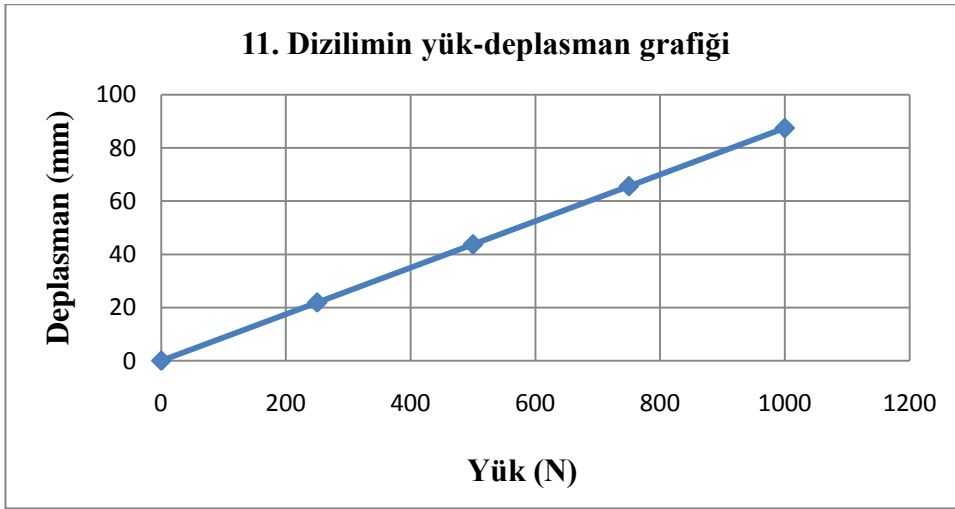
Şekil 6.25. Pasarella 10. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi



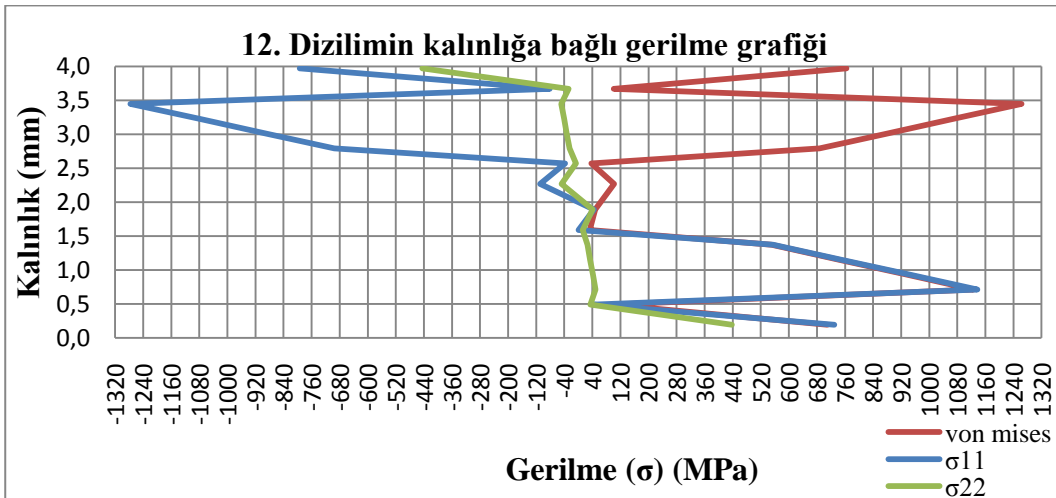
Şekil 6.26. Pasarella 10. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği



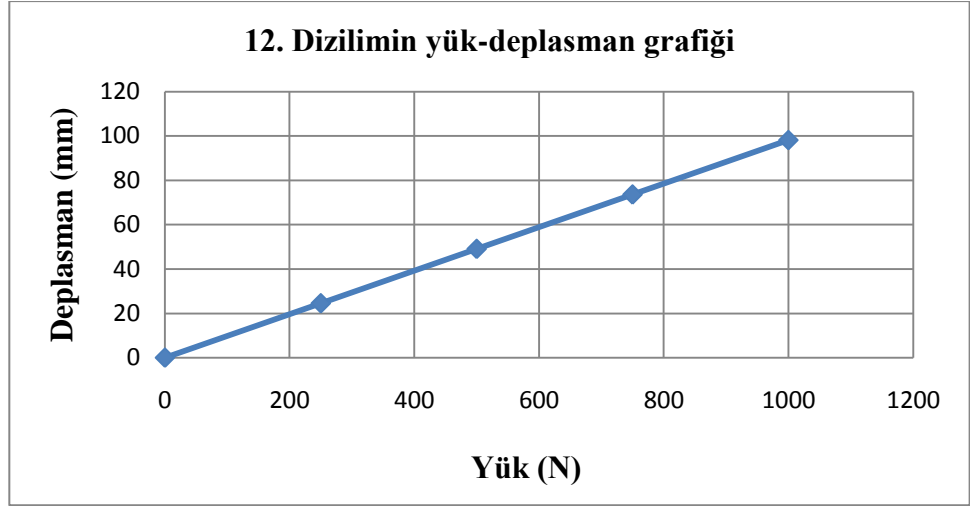
Şekil 6.27. Pasarella 11. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi



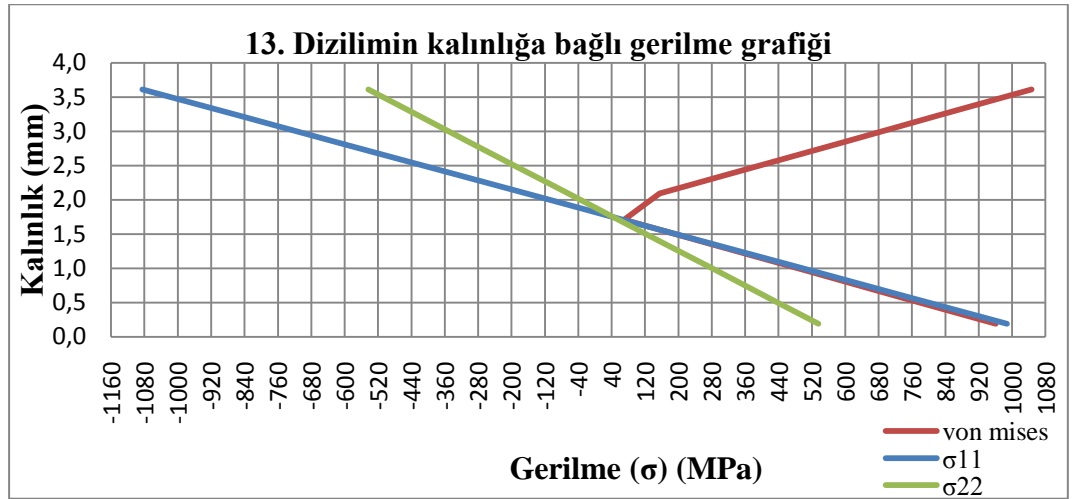
Şekil 6.28. Pasarella 11. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği



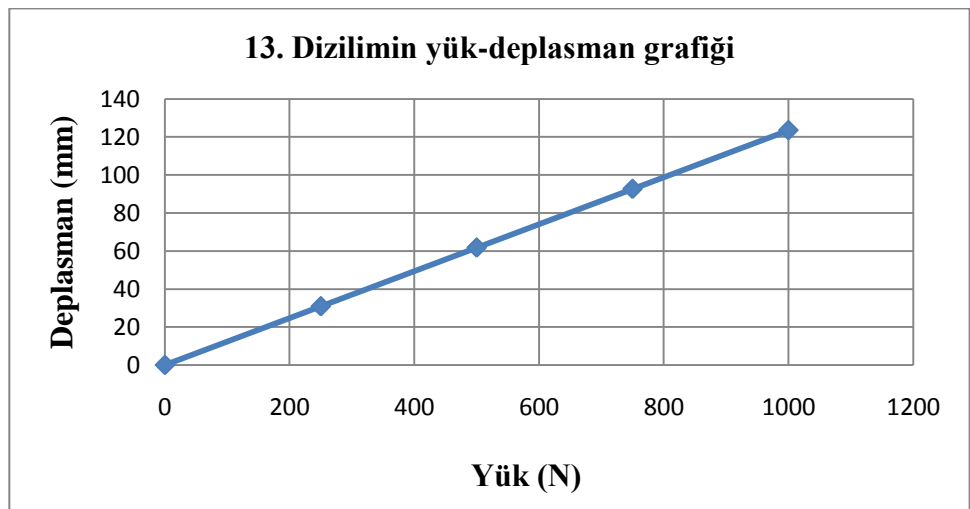
Şekil 6.29. Pasarella 12. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi



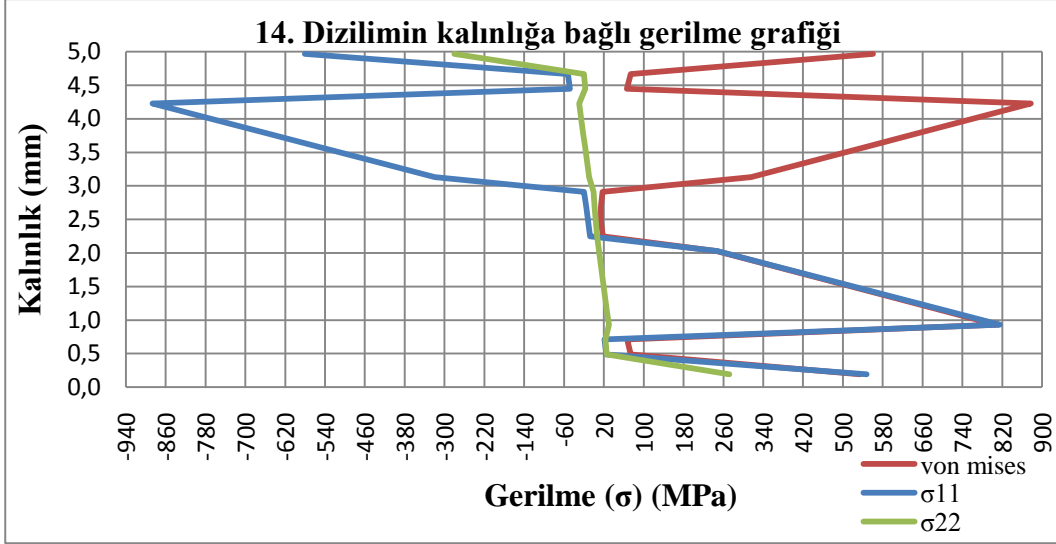
Şekil 6.30. Pasarella 12. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği



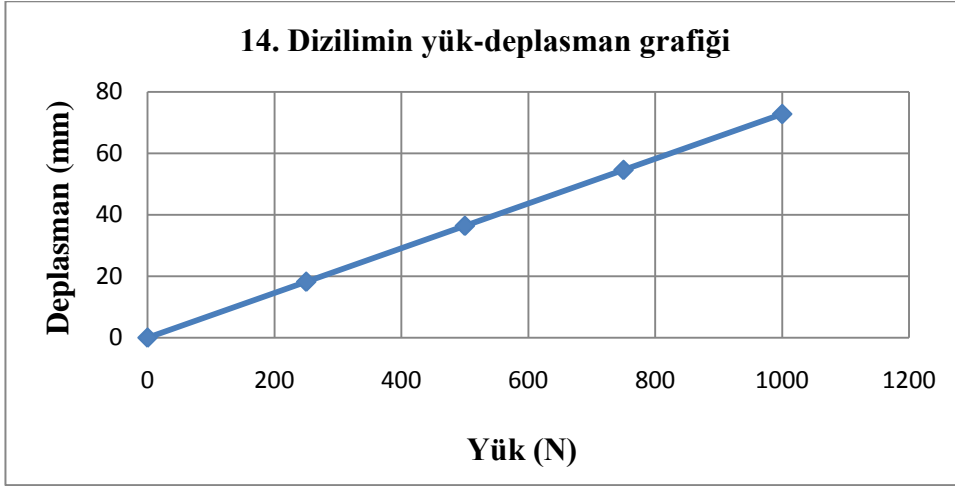
Şekil 6.31. Pasarella 13. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi



Şekil 6.32. Pasarella 13. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği



Şekil 6.33. Pasarella 14. Dizilim ile modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi



Şekil 6.34. Pasarella 14. Dizilim ile modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği

Pasarellanın kullanımındaki en kritik durum için yapılan sonlu elemanlar analizi sonuçları Çizelge 6.3, Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5’de toplanmıştır. Aşağıdaki grafiklerle ilgili yapılan değerlendirme sonucunda gerekli mekanik özelliklerin karşılanmasını sağlayan en hafif dizilimin prototip üretiminde kullanılan $[T_6/\bar{A}]_S$ dizilimi olduğu görüldü.

Çizelge 6.3. UD prepreglerde analiz sonuçlarının değerlendirilme tablosu

DİZİLİM		Prepreg çeşidi	Sigrafil CE 1201-230-39 (UD)		
			$\sigma_{mises} < 1580$	$\sigma_{11} > -1580$ $\sigma_{11} < 2600$	$\sigma_{22} > -255$ $\sigma_{22} < 78$
1	$[T_6/\bar{A}]_s$	çeki	-	-	-
		bası		-	-
2	$[T/90_2/0_4/90_2/\bar{A}]_s$	çeki	1192,29	1071,57	37,7847
		bası		-1204,69	-73,043
3	$[T/90_2/0_3/90_2/\bar{A}]_s$	çeki	1396,35	1217,03	47,1989
		bası		-1410,98	-88,9993
4	$[T/90_2/0_5/\bar{A}]_s$	çeki	1363,78	1240,22	41,8074
		bası		-1378,27	-96,3991
5	$[T/90_2/0_6/\bar{A}]_s$	çeki	1176,89	1088,86	33,2116
		bası		-1189,29	-79,9398
6	$[T/0_8/\bar{A}]_s$	çeki	1190,94	1089,86	68,9748
		bası		-1203,94	-66,9694
7	$[T/90_2/0_3/90_2/T/\bar{A}]_s$	çeki	1119,33	1008,23	32,8413
		bası		-1130,85	-62,8602
8	$[T/90/0/90/0/90/0/90/\bar{A}]_s$	çeki	631,732	1158,57	40,4467
		bası		-1278,97	-63,3551
9	$[T/90/0/90/0_2/90/0/90/\bar{A}]_s$	çeki	1053,29	977,143	35,2
		bası		-1064,03	-53,5762
10	$[T/90/0/45/-45_2/45/0/90/T/\bar{A}]_s$	çeki	1101,38	875,059	60,3353
		bası		-1112,6	-345,639
11	$[T/90/45/-45/0/-45/45/90/T/\bar{A}]_s$	çeki	1032,4	723,752	45,7597
		bası		-1042,89	-373,77
12	$[T/90/0_4/90/T/\bar{A}]_s$	çeki	1262,95	1136,7	49,3909
		bası		-1276,21	-81,0997
13	$[T_5/\bar{A}]_s$	çeki	-	-	-
		bası		-	-
14	$[T/90_2/0_6/90_2/\bar{A}]_s$	çeki	877,493	815,302	29,9364
		bası		-886,51	-52,3862

Kırmızı ile belirtilen değerler dayanım sınırını aşan değerlerdir.

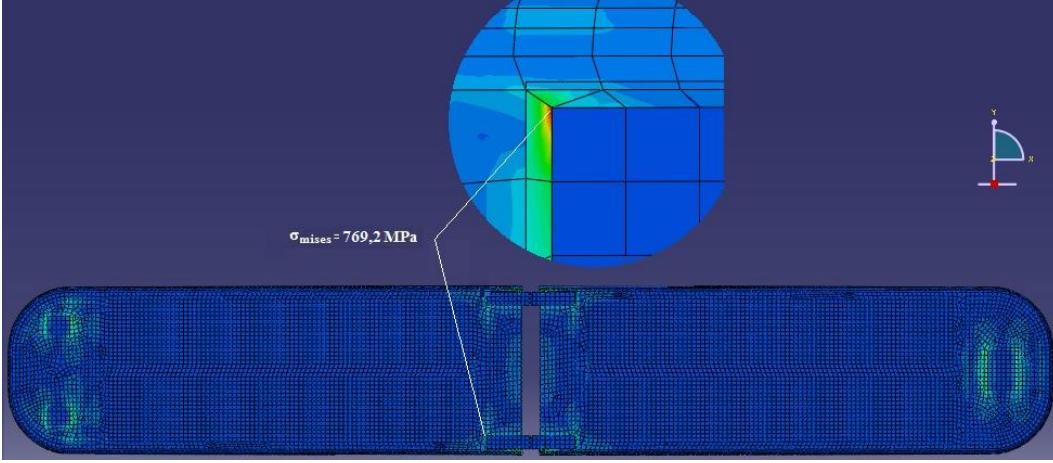
Çizelge 6.4. Twill prepreglerde analiz sonuçlarının değerlendirilme tablosu

DİZİLİM		Prepreg çeşidi	Sigratex CE 8204-650-42 (2x2 twill)		
			σmises < 903	σ11 > -903	σ22 > -903
				σ11 < 937	σ22 < 937
1	$[T_6/\bar{A}]_s$	çeki	769,237	736,885	382,837
		bası		-796,397	-391,609
2	$[T/90_2/0_4/90_2/\bar{A}]_s$	çeki	840,376	808,496	387,55
		bası		-869,826	-395,825
3	$[T/90_2/0_3/90_2/\bar{A}]_s$	çeki	1058,11	1005,93	473,343
		bası		-1095,15	-481,291
4	$[T/90_2/0_5/\bar{A}]_s$	çeki	1040,5	1014,83	458,042
		bası		-1078,68	-466,578
5	$[T/90_2/0_6/\bar{A}]_s$	çeki	832,51	816,597	377,173
		bası		-863,145	-386,055
6	$[T/0_8/\bar{A}]_s$	çeki	613,818	594,324	536,572
		bası		-647,362	-531,919
7	$[T/90_2/0_3/90_2/T/\bar{A}]_s$	çeki	756,162	725,367	40,6781
		bası		-781,821	-56,1015
8	$[T/90/0/90/0/90/0/90/\bar{A}]_s$	çeki	307,826	712,219	335,755
		bası		-767,666	-343,658
9	$[T/90/0/90/0_2/90/0/90/\bar{A}]_s$	çeki	600,238	581,034	283,031
		bası		-621,107	-290,799
10	$[T/90/0/45/-45_2/45/0/90/T/\bar{A}]_s$	çeki	618,767	530,977	275,566
		bası		-639,758	-286,691
11	$[T/90/45/-45/0/-45/45/90/T/\bar{A}]_s$	çeki	789,126	668,442	331,747
		bası		-814,527	-343,585
12	$[T/90/0_4/90/T/\bar{A}]_s$	çeki	763,948	729,536	437,301
		bası		-793,818	-444,283
13	$[T_5/\bar{A}]_s$	çeki	1046,52	987,698	535,753
		bası		-1085,07	-543,531
14	$[T/90_2/0_6/90_2/\bar{A}]_s$	çeki	560,5	547,44	272,173
		bası		-580,361	-280,329

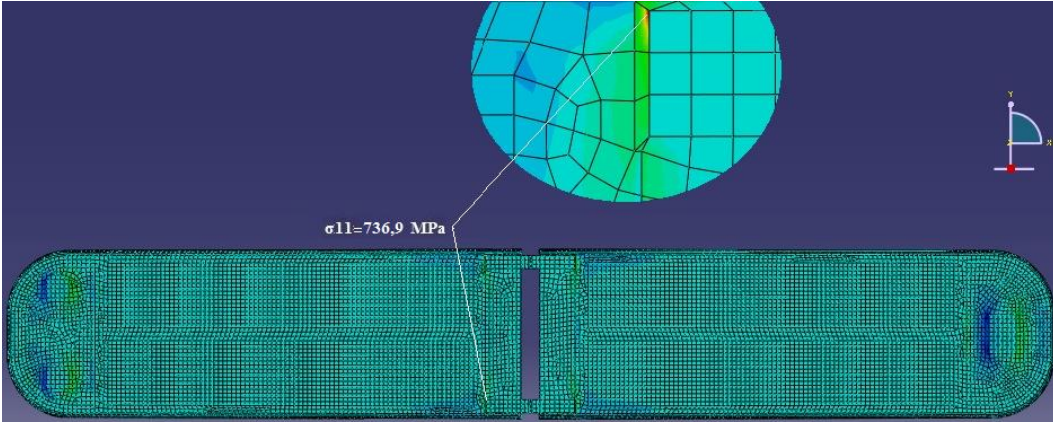
Kırmızı ile belirtilen değerler dayanım sınırını aşan değerlerdir.

Çizelge 6.5. Analiz sonuçlarına göre dizilimlere bağlı deplasman değerleri ve pasarella ağırlıkları

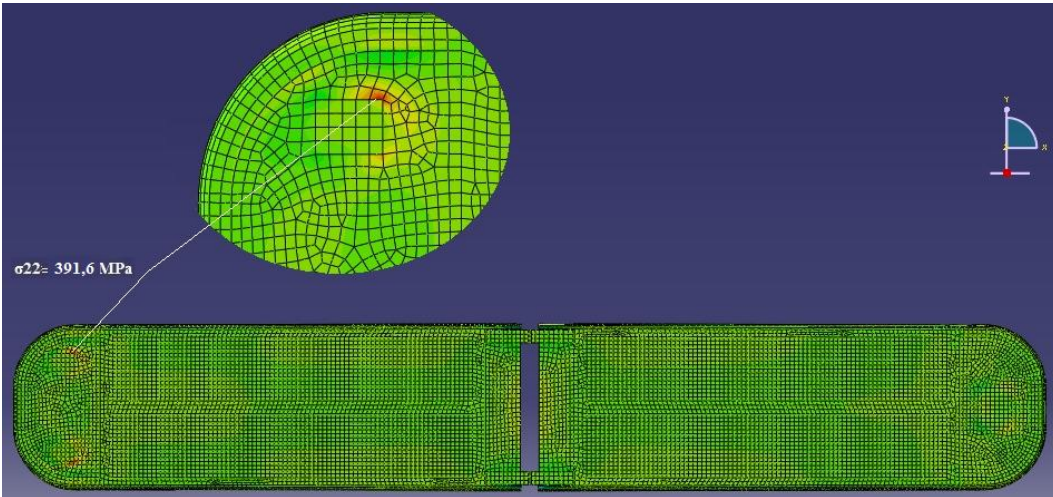
DİZİLİM		Deplasman (mm)	Ağırlık (kg)
1	$[T_6/\bar{A}]_s$	96,6366	7
2	$[T/90_2/0_4/90_2/\bar{A}]_s$	96,92	7,1
3	$[T/90_2/0_3/90_2/\bar{A}]_s$	115,44	6,5
4	$[T/90_2/0_5/\bar{A}]_s$	107,7	6,5
5	$[T/90_2/0_6/\bar{A}]_s$	91,428	7,1
6	$[T/0_8/\bar{A}]_s$	79,6766	7,1
7	$[T/90_2/0_3/90_2/T/\bar{A}]_s$	90,9096	7,5
8	$[T/90/0/90/0/90/0/90/\bar{A}]_s$	90,546	6,5
9	$[T/90/0/90/0_2/90/0/90/\bar{A}]_s$	88,2394	7,1
10	$[T/90/0/45/-45_2/45/0/90/T/\bar{A}]_s$	82,396	8,1
11	$[T/90/45/-45/0/-45/45/90/T/\bar{A}]_s$	87,386	7,5
12	$[T/90/0_4/90/T/\bar{A}]_s$	98,134	6,9
13	$[T_5/\bar{A}]_s$	123,4964	6,4
14	$[T/90_2/0_6/90_2/\bar{A}]_s$	72,759	8,2



Şekil 6.35. Pasarella 1. Dizilim ile modellenmişken Von-Mises gerilmelerinin dağılımı ve kritik olan bölge



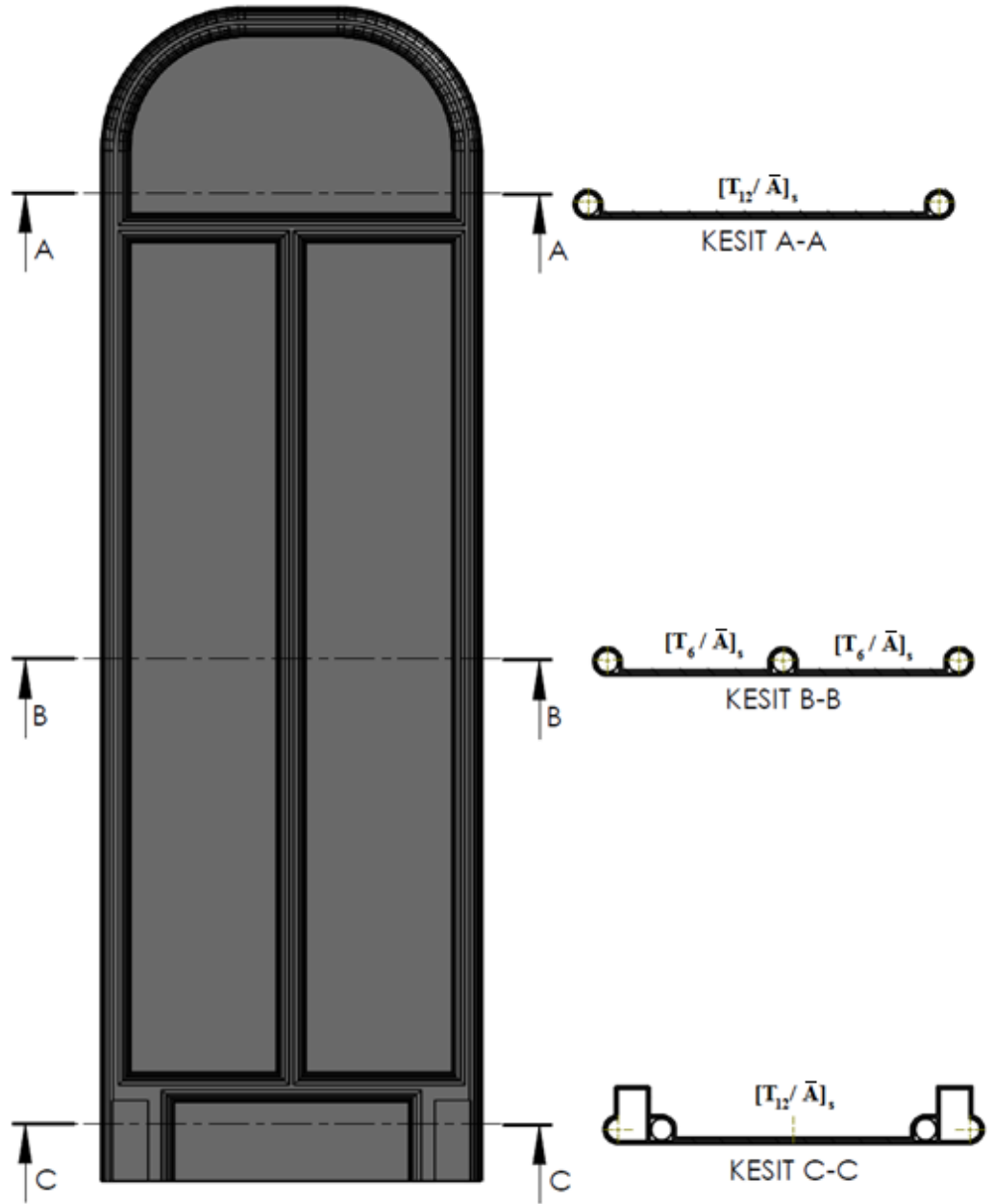
Şekil 6.36. Pasarella 1. Dizilim ile modellenmişken σ_{11} gerilmelerinin dağılımı ve kritik olan bölge



Şekil 6.37. Pasarella 1. Dizilim ile modellenmişken σ_{22} gerilmelerinin dağılımı ve kritik olan bölge

6.3. Tasarım İyileştirmeleri

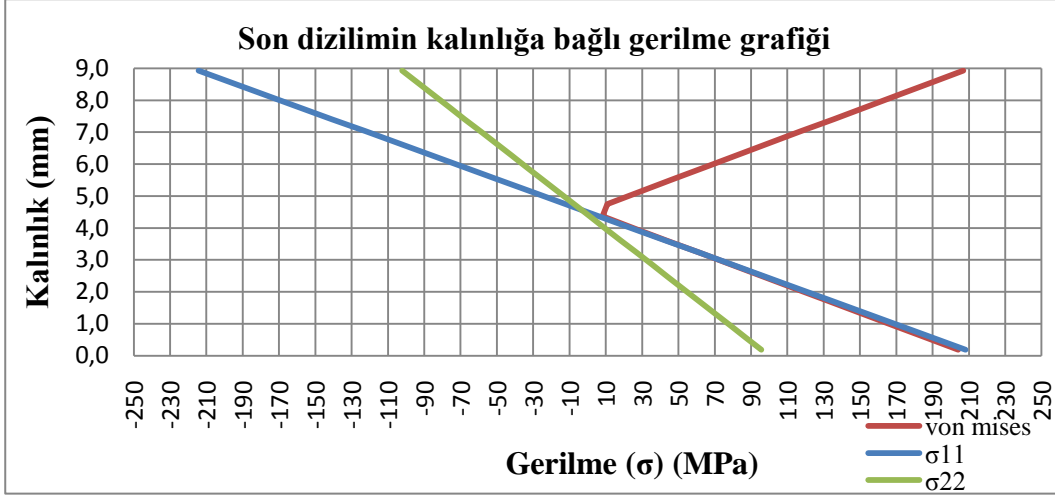
Pasarellanın kullanımındaki en kritik durum için yapılan sonlu elemanlar analizi sonuçları ve gerilim dağılımları incelendiğinde pasarellanın tüm kesitlerinde dizilimlerin aynı olması gerekmediği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle gerilimlerin daha yoğun olduğu uç ve orta kısımlarda daha kalın dizilimler, gerilimlerin daha az olduğu ara bölgelerde ise daha ince dizilimlerin kullanılması kararlaştırılmıştır (Şekil 6.38).



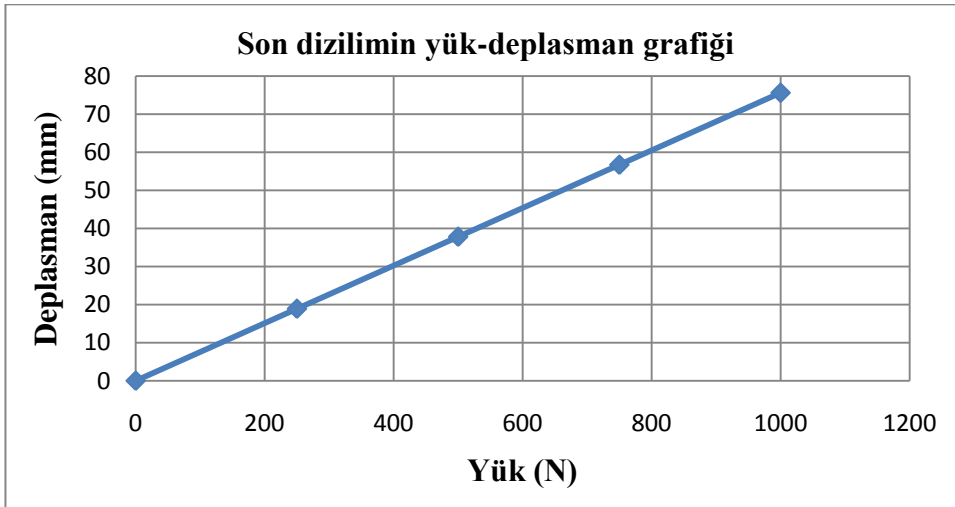
Şekil 6.38. Pasarellanın tasarımı iyileştirildikten sonraki dizilim ve kesitleri

6.4. Analizlerin Tekrarlanması

Pasarellada yapılan yenilemeler ve iyileştirmeler sonlu elemanlar analizinin tekrarlanmasını gerektirmektedir. Analiz sonucunda elde edilen gerilme değerleri Şekil 6.39 ve Şekil 6.40'de verilmiştir.



Şekil 6.39. Pasarella tasarım iyileştirmesine göre modellenmişken, 1000N ile kritik bölgede oluşan gerilmelerin kalınlığa bağlı değişimi



Şekil 6.40. Pasarella tasarım iyileştirmesine göre modellenmişken yüke bağlı maksimum deplasman grafiği

7. SONUÇ

Bu çalışmada bilgisayar destekli tasarım ve mühendislik yazılımları kullanılarak karbon fiber destekli polimer kompozit pasarella tasarımı gerçekleştirildi.

Bu süreçte kullanılan pasarella çeşitleri incelenerek, genel anlamda açıklanmıştır. Daha sonra kompozit malzemeler ve kompozit ürün üretim yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Pasarella gibi büyük ve ince cidarlı kompozitlerin üretimi için uygun ve ekonomik bir üretim yöntemi olan otoklav yöntemi seçilmiştir.

Yüksek mekanik performansa sahip kompozit ürünlerin otoklavda üretilmesi için uygun olan prepreg malzeme seçimi yapıp seçilen malzemenin kürleşmesi için gerekli sıcaklık ve basınç değerlerini karşılayacak otoklav tasarlanıp üretildi. Tasarlanan bu otoklav bilgisayar kontrollü ısıtma ve bilgisayar kontrollü basınç ünitesine sahip olarak tasarlanmıştır.

Pasarella tasarımı için gerekli boyutsal ve mekanik özellikler belirlenip bu özelliklere uygun modelleme yapıldı. Elde edilen modeller uygulanabileceği düşünülen 14 dizilim belirlenerek, ABAQUS paket programı kullanılarak bu dizilimler ile pasarellanın kullanımındaki en kritik durum için sonlu elemanlar analizi yapıldı. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.3, Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5’de toplandı ve değerlendirildi. Yapılan değerlendirme sonucunda gerekli mekanik özelliklerin karşılanmasını sağlayan en uygun dizilimin 1. Dizilim olan $[T_6/\bar{A}]_S$ olduğu görüldü.

Analiz sonuçları kullanılarak dizilimin belirlenmesi ile de istenilen özelliklere sahip üretime hazır karbon fiber destekli polimer kompozit malzemeden üretilen pasarellanın tasarımı ve üretimi tamamlanmıştır.

Bilindiği üzere karbon kompozitler korozyon ortamına, su absorbe edip fiziksel bütünlüğünü ve mekanik özelliklerini kaybeden ahşaba ve paslanıp aşınan metal malzemelere kıyasla çok daha avantajlıdır. Ayrıca, prototip üretimi yapılan karbon fiber destekli polimer kompozit pasarellanın aynı taşıma kapasitesi ve dayanıma sahip geleneksel pasarellara kıyasla daha hafif olduğu da görüldü. Aynı taşıma kapasitesi ve dayanıma sahip ahşap bir pasarellanın ağırlığı 14-16 kg, alüminyum bir pasarellanın ağırlığı 12-15 kg iken üretilen karbon fiber destekli

polimer kompozit pasarellanın ağırlığı 6-9 kg'dır. Bu açıdan ağırlıklar kıyaslandığında ortalama %40-45'lik bir hafiflik avantajı göze çarpmaktadır. Gözden kaçmaması gereken bir diğer konu da analizde kullanmak üzere sonsuz kombinasyonun seçilebileceğidir. Seçilecek farklı bir dizilim ile sonuçlar daha da iyileştirilebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Advanced Composites Group**, 2009, “An Introduction to Advanced Composites and Prepreg Technology”, http://www.advanced-composites.co.uk/data_catalogue/catalogue%20files/sm/SM1010_Introduction_to_Advanced_Composites_Revision4.pdf (Erişim tarihi: 16.10.2010)
- Denizdukkani**, “Sealux Alüminyum Basamaklı Sabit Pasarella / 40X250cm”. <http://www.denizdukkani.com/sealux-aluminyum-basamakli-sabit-pasarella---40x250cm/u21925> (Erişim tarihi: 02.11.2011)
- Ezbercimarine**, “Teleskopik Tip Pasarella”. <http://www.ezbercimarine.com/index.php/tr/pasarellalar/teleskopik-pasarella.html> (Erişim tarihi: 01.12.2011)
- Fassmer**, “Standard Products”. <http://www.fassmer.de/index.php?id=251> (Erişim tarihi: 01.11.2011)
- Genç, İ./ Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Temmuz 2007, “4 Kademeli Pasarellanın Tasarım ve Analizi”, Erzurum (Erişim tarihi: 03 .08.2011)
- Hexcel**, 2005, “Prepreg Technology”, <http://www.hexcel.com/NR/rdonlyres/230A6C2A-FDFA-4EC7-B048-E4EB28E3BC8C/0/PrepregTechnology2.pdf> (Erişim tarihi: 14.02.2011)
- Kazanç, V./ Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü**, 2002, “Kompozit Malzemeler ve Mekanik Özellikleri”, Isparta (Erişim tarihi: 09.09.2011)
- Marintekstore**, <http://www.marintekstore.com/?catId=30&pId=2932> (Erişim tarihi: 05.11.2011)
- Onuk, K.N./ İ.T.Ü. Uçak Fakültesi**, “Kompozit malzemeler”, www.gidb.itu.edu.tr/staff/odabasi/KAANKOMP.PDF (Erişim tarihi: 03.11.2010)
- SGL**, 2000, “SIGRAFIL prepreg, SGRATEX prepreg, Tailor-made pre-impregnated products for fiber composite structures”. http://sglcarbon.com.cn/sgl_t/industrial/prepregs/pdf/prepregs_e_.pdf (Erişim tarihi: 25.01.2011)
- SGL**, 2009, “SIGRAFIL Unidirectional prepregs”. http://sglgroup.com/export/sites/sglcarbon/_common/downloads/products/product-group/cm/prepregs/SIGRAFIL_Unidirectional_prepregs_e.pdf (Erişim tarihi: 25.01.2011)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- SGL,** 2010, “SIGRATEX Fabric Prepregs”.
http://www.sglgroup.com/export/sites/sglcarbon/_common/downloads/products/product-groups/cm/prepregs/SIGRATEX_Fabric_Prepregs_e.pdf
(Erişim tarihi: 25.01.2011)
- Tortoç, A./ D.E.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü,** Kasım 2009, “Balsa / PVC Sandviç Yapılarda Kırılma Tokluğu Etkisinin Nümerik Çalışması”, İzmir (Erişim tarihi: 25.07.2011)
- Vatandaş, O.G./ D.E.Ü Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü,** Ocak 2007, “Tekne Yapımında Kullanılan Sandviç Kompozit T Bağlantısında Gerilme Analizi”, İzmir (Erişim tarihi: 04.11.2010)
- Vatangül, E./ D.E.Ü Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü,** Haziran 2008, “Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Ansys 10 Programı İle Isıl Gerilme Analizi”, İzmir (Erişim tarihi: 04.07.2011)

ÖZGEÇMİŞ

Türkiye Cumhuriyeti vatandaşı olan Doruk Erdem YUNUS, 23 Kasım 1986'da Fatih'de doğmuştur.

İlk ve orta okul eğitimini İzmir'de tamamlayan YUNUS, Liseyi Karşıyaka Anadolu Lisesi'nde okudu. 2004 yılında girdiği Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü 2008 yılında bitirmiştir. İki senedir özel sektörde mühendis olarak çalışmaktadır.