

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEME İMALATI İÇİN
VAKUM DESTEKLİ MEKANİZMALARIN GELİŞTİRİLMESİ VE
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Batuhan ÖZDEMİR

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

HAZİRAN 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEME İMALATI İÇİN
VAKUM DESTEKLİ MEKANİZMALARIN GELİŞTİRİLMESİ VE İMALAT
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Batuhan ÖZDEMİR
(503161306)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU

HAZİRAN 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503161306 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Batuhan ÖZDEMİR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEME İMALATI İÇİN VAKUM DESTEKLİ MEKANİZMALARIN GELİŞTİRİLMESİ VE İMALAT PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Şafak YILMAZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 12.03.2020
Savunma Tarihi : 14.05.2020





Eşime ve aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimimin başından sonuna kadar maddi ve manevi beni destekleyen Hülya ÖZDEMİR'e, Ergun ÖZDEMİR'e, Nursu ÖZDEMİR'e ve Sıla MERİÇ ÖZDEMİR'e sonsuz teşekkürler.

Yüksek lisans eğitimim boyunca beni destekleyen Sayın Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Mayıs 2020

Batuhan Özdemir
(Makine Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ŞEKİL LİSTESİ	xvi
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER VE VAKUM ESASLI İMALAT YÖNTEMLERİNE AİT BİLGİ BİRİKİMİ	3
2.1 Bileşenler	3
2.1.1 Kompozit malzemelerin matrislere göre sınıflandırılması	3
2.1.1.1 Metal matrisler	3
2.1.1.2 Seramik matrisler	4
2.1.1.3 Polimer matrisler	5
2.1.2 Kompozit malzemelerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması	7
2.1.2.1 Parçacık takviyeler	7
2.1.2.2 Elyaf takviyeler	7
2.1.2.3 Takviye elemanı malzemeleri	9
2.2 Elyaf Takviyeli Karma Malzemelerin İmalat Yöntemleri	12
2.2.1 El yatırması yöntemi	12
2.2.2 Püskürtme yöntemi	13
2.2.3 Elyaf sarma yöntemi	14
2.2.4 Reçine transfer yöntemi	15
2.2.5 İnfüzyon yöntemi	16
2.2.5.1 Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM)	17
2.2.5.2 Kontrollü hızlı kanallı reçine kalıplama (FASTRAC)	19
2.2.5.3 Vakum destekli sıkılık azaltma (VIPR)	20
3. VAKUM İNFÜZYON YÖNTEMLERİNİN DENEYSEL ÇALIŞMALARI	23
3.1 VARTM İmalat Yönteminin DeneySEL Çalışmaları	23
3.1.1 Malzeme kalıp özellikleri	23
3.1.2 DeneySEL gözlem sonuçları	24
3.1.3 Gözlemlenen sonuçların irdelenmesi	26
3.2 FASTRAC İmalat Yönteminin DeneySEL Çalışmaları	27
3.2.1 Malzeme kalıp özellikleri	27
3.2.2 DeneySEL gözlem sonuçları	28
3.2.3 Gözlemlenen sonuçların irdelenmesi	30
3.3 VIPR İmalat Yönteminin DeneySEL Çalışmaları	30

3.3.1 Malzeme kalıp özellikleri.....	30
3.3.2 Deneysel gözlem sonuçları.....	32
3.3.3 Gözlemlenen sonuçların irdelenmesi	35
4. VIPR VAKUM HAZNESİNİ GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI.....	37
4.1 Kalın Conta Uygulamalı Tasarım ve Denenmesi.....	37
4.2 Yay Destekli Harici Vakum Haznesi Tasarımı ve Denenmesi	38
4.3 Çift Ayak Destekli Harici Vakum Haznesi Tasarımı ve Denenmesi	40
4.3.1 Deneysel adımlar.....	41
4.3.2 MATLAB analizi	48
5. TEZ ÇALIŞMASINDA GELİŞTİRİLEN MEKANİZMALARLA İMAL EDİLEN KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	49
5.1 Çekme Deneyleri	49
5.2 Eğme Deneyleri	51
5.3 Charpy Darbe Deneyleri.....	53
6. SONUÇ	55
KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ.....	61

KISALTMALAR

RTM	: Reçine Transfer Kalıplama
VARTM	: Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
FASTRAC	: Kontrollü Hızlı Kanallı Reçine Kalıplama
VIPR	: Vakum Destekli Sıkılık Azaltma
CAD	: Computer Aided Design





SEMBOLLER

r_{tel}	: Yay telinin yarıçapı
r_{yay}	: Yay yarıçapı
$L_{serbest}$	: Serbest yay uzunluğu
$N_{aktif\ tel}$	: Yayın aktif tel sayısı
k_{yay}	: Yay sertlik katsayısı
X_{elyaf}	: Reçinenin elyaf üzerinde ki konumu
X_{VIPR}	: VIPR üretim yönteminde ilerleyen reçinenin konumu
X_{VARTM}	: VARTM üretim yönteminde ilerleyen reçinenin konumu
$t_{akış}$	: Akış zamanı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : VARTM deneyi malzeme listesi.....	24
Çizelge 3.2 : FASTRAC deneyi malzeme listesi.....	27
Çizelge 3.3 : VIPR deneyi malzeme listesi.....	31
Çizelge 3.4 : VIPR reçine akış hızı – VARTM reçine akış hızı karşılaştırılması.....	36
Çizelge 4.1 : Yay parametreleri.....	39
Çizelge 4.2 : Yüzdesel hız değişim karşılaştırılması.....	47
Çizelge 5.1 : Çekme deneyi ölçüm sonuçları.....	50
Çizelge 5.2 : Eğme deneyi ölçüm sonuçları.....	52
Çizelge 5.3 : Charpy darbe deneyi ölçüm sonuçları.....	53



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Elyaf takviyeli kompozit malzeme bileşenleri.	3
Şekil 2.2 : Metal matrisli kompozit malzemeler.....	4
Şekil 2.3 : Seramik matrisli kompozit malzemeler.....	4
Şekil 2.4 : Parçacık takviyeli kompozit malzemeler.	7
Şekil 2.5 : Farklı dizilişte ki cam elyaf dokuma örnekleri.....	11
Şekil 2.6 : El yatırması yöntemi..	13
Şekil 2.7 : Püskürtme yöntemi.....	14
Şekil 2.8 : VARTM imalat yöntemi.	17
Şekil 2.9 : FASTRAC imalat yöntemi.....	19
Şekil 2.10 : VIPR imalat yöntemi.....	20
Şekil 3.1 : VARTM deney düzeneği.....	24
Şekil 3.2 : X_{elyaf} : 50 mm, $t_{akış}$: 0,25 dk.....	25
Şekil 3.3 : X_{elyaf} : 200 mm, $t_{akış}$: 11 dk.....	25
Şekil 3.4 : Akış sonu, $t_{akış}$: 81 dk.	26
Şekil 3.5 : FASTRAC deney düzeneği.....	28
Şekil 3.6 : X_{elyaf} : 50 mm, $t_{akış}$: 0,15 dk.....	28
Şekil 3.7 : X_{elyaf} : 200 mm, $t_{akış}$: 11 dk.....	29
Şekil 3.8 : Akış sonu, $t_{akış}$: 37 dk.....	29
Şekil 3.9 : VIPR deney düzeneği.....	32
Şekil 3.10 : X_{VIPR} : 50 mm, X_{VARTM} : 50 mm, $t_{akış}$: 0,27 dk.....	32
Şekil 3.11 : Vakum haznesi uygulanış anı, X_{VIPR} : 130 mm, X_{VARTM} : 130 mm, $t_{akış}$: 2 dk	33
Şekil 3.12 : Reçinenin vakum haznesi içerisinde ki ilerleyiş, X_{VIPR} : 200 mm, X_{VARTM} : 190 mm, $t_{akış}$: 6 dk.....	33
Şekil 3.13 : Reçinenin vakum haznesinin sonuna ulaştığı an, X_{VIPR} : 300 mm, X_{VARTM} : 270 mm, $t_{akış}$: 13 dk.....	34
Şekil 3.14 : Vakum haznesinin kaldırıldığı an, X_{VIPR} : 310 mm, X_{VARTM} : 300 mm, $t_{akış}$: 17 dk	34
Şekil 3.15 : Akış sonu, X_{VIPR} : 400 mm, X_{VARTM} : 350 mm, $t_{akış}$: 20 dk.....	35
Şekil 4.1 : Kalın contalı vakum haznesi.	37
Şekil 4.2 : Kalın contalı vakum haznesi uygulaması.....	38
Şekil 4.3 : Yay destekli vakum haznesinin x, y ve z düzlemlerinde ki görüntüsü. ...	38
Şekil 4.4 : Yay destekli vakum haznesinin x ve y düzlemlerinde ki görüntüsü.....	39
Şekil 4.5 : Yayların burkulması durumu.....	40
Şekil 4.6 : Çift ayak destekli harici vakum haznesi.....	40
Şekil 4.7 : Çift ayak destekli vakum haznesinin CAD görüntüsü..	41
Şekil 4.8 : Deney düzeneği çizimi.	42
Şekil 4.9 : Deney düzeneği	43
Şekil 4.10 : X_{VIPR} : 100 mm, X_{VARTM} : 100 mm, $t_{akış}$: 1,5 dk.....	43
Şekil 4.11 : Vakum haznesinin uygulanış anı, X_{VIPR} : 130 mm, X_{VARTM} : 130 mm, $t_{akış}$: 2,37 dk.	44

Şekil 4.12 : Reçinenin vakum haznesi içerisinde ilerleyişi, X_{VIPR} : 220 mm, X_{VARTM} : 250 mm, $t_{akış}$: 8 dk.....	44
Şekil 4.13 : Reçinenin vakum haznesi içerisinde ilerleyişi, X_{VIPR} : 230 mm, X_{VARTM} : 270 mm, $t_{akış}$: 10 dk.....	45
Şekil 4.14 : Reçinenin vakum haznesi içerisinde ilerleyişi, X_{VIPR} : 320 mm, X_{VARTM} : 280 mm, $t_{akış}$: 12 dk.....	46
Şekil 4.15 : Reçinenin vakum haznesinin sonuna ulaşması, X_{VIPR} : 340 mm, X_{VARTM} : 320 mm, $t_{akış}$: 15 dk.....	46
Şekil 4.16 : Akış sonu, X_{VIPR} : 400 mm, X_{VARTM} : 370 mm, $t_{akış}$: 19 dk.....	47
Şekil 4.17 : Akışın MATLAB modeli.	48
Şekil 5.1 : Çekme deneyi için kesilen kompozit parça görseli.	49
Şekil 5.2 : ISO 527-4 tip 1B çekme deneyi standardı için parça ölçüleri.....	49
Şekil 5.3 : Çekme deneyi sonucu kırılan kompozit parça.....	50
Şekil 5.4 : Eğme deneyi için kesilen kompozit parça görseli.....	51
Şekil 5.5 : ASTM D 7264 eğme deneyi standardı için parça ölçüleri.....	51
Şekil 5.6 : Eğme deneyi sonucu kırılan kompozit parça.....	52
Şekil 5.7 : Charpy darbe deneyi için kesilen kompozit parça görseli.....	53
Şekil 5.8 : ISO 179-1 charpy darbe deneyi standardı için parça ölçüleri.	53

POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEME İMALATI İÇİN VAKUM DESTEKLİ MEKANİZMALARIN GELİŞTİRİLMESİ VE İMALAT PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Sürekli gelişen günümüz endüstri dünyasında, kullanılan sektöre ve insanoğlunun artan ihtiyaçlarına bağlı olarak malzeme dünyasında da hızlı bir gelişme yaşanmaktadır. Özellikle malzemelerden; düşük maliyet, uzun ömür, çevreye ve insana zararsızlık, dayanım, geri kazanım, korozyona direnci, yüksek rijitlik, titreşim sönümleme, ısı ve ses yalıtımı vb. gibi özelliklerin istenmesi ve saf malzemelerin bu ihtiyaçlara yeteri kadar cevap verememesinden ötürü, kompozit malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar artmıştır.

Kompozit malzemeler, endüstrideki ihtiyaçları tek başına karşılayamayan iki ya da daha fazla farklı özellik ve yapıdaki malzemelerin fiziksel olarak makro ölçekte uygun oran ve koşullarda bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Bir araya getirilen farklı özelliklerde malzemeler, kompozit bir yapı oluşturduktan sonra, tek başına sahip olduklarından daha üstün özellik sunmanın yanı sıra, yeni özellikler de kazanırlar. Kompozit malzemeleri oluşturan takviye elemanları ve matrisler ve bunlarla kullanılacak imalat yöntemleri, kompozit malzemelerden istenilen özelliklere göre çeşitlendirilebilir.

Vakum destekli polimer matrisli kompozit malzeme imalat yöntemlerinden biri olan Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (VARTM) imalat yöntemi, düşük yatırım maliyeti, istenilen parça boyutlarının kolaylıkla üretilebilmesi ve uygulanabilirliğinin yüksek olması gibi avantajlarına karşın, üretim süresinin uzun oluşu, yüksek hurda oranı, reçinenin homojen akışı sağlayamaması ve düşük mekanik özellikli parçaların üretilmesi gibi dezavantajlarından dolayı endüstriyel alanda kullanımı kısıtlanmaktadır. VARTM imalat yönteminde karşılaşılan bu problemlere çözüm amaçlı geliştirilen Kontrollü Hızlı Kanalı Reçine Kalıplama (FASTRAC) imalat yönteminde, uygulanan harici vakum haznesi ile ikinci bir vakum ortamı oluşturulmakta ve böylelikle reçine akışı rahatlatılmaktadır. Bununla birlikte, FASTRAC imalat yöntemi ile reçine elyafı daha hızlı ve homojen bir şekilde doldururken, uygulanan vakum haznesinin reçine enjeksiyonu başladıktan sonra hareket ettirilememesi uygulanabilirliğini azaltmaktadır. FASTRAC imalat yönteminin sağladığı avantajları kaybetmeden, sahip olduğu dezavantajları giderebilmek amacı ile geliştirilen Vakum Destekli Sıklık Azaltma (VIPR) imalat yönteminde ise harici olarak uygulanan vakum haznesi, üretim anında istenilen bölgelere uygulanabilmektedir. VARTM imalat yönteminin sorunlarına çözüm amaçlı geliştirilen ve FASTRAC ve VIPR imalat yöntemlerinde kullanılan harici vakum haznesinin yarattığı en büyük problem ise, reçine akışını rahatlatmak amacıyla vakum haznesi içerisine uygulanan vakum basıncından dolayı vakum haznesinin elyaf ile temas ettiği bölgelerde yarattığı sıkıştırma basıncıdır. Bu sıkıştırma basıncı sonucunda reçine, vakum haznesi içerisine rahatlıkla girememekte ve reçinenin elyaf dokuma

içindeki akışını olumsuz etkilemektedir. Sunulan tezde, VIPR imalat yönteminde kullanılmak üzere sıkıştırma basıncını azaltma amacı ile tasarlanmış harici vakum haznelerinin deneysel uygulamaları incelenmektedir.

Geleneksel VIPR imalat yöntemi uygulanan deneylerde, vakum haznesinin elyaf üzerine uyguladığı sıkıştırma basıncı, çift ayaklı vakum haznesi uygulamalı VIPR imalat yönteminde düşürülmüştür. Böylelikle reçinenin hazne giriş ve çıkışlarında karşılaştığı kuvvet azaltılmış ve reçinenin hazne içerisine girişi ve çıkışı kolaylaştırılmıştır. Tez çalışmasında geliştirilen tasarımın sağladığı bu avantaj neticesinde çift ayaklı vakum haznesi uygulamasıyla gerçekleştirilen VIPR imalat yönteminin, geleneksel VIPR yöntemine göre %5, VARTM yöntemine göre %16 daha hızlı reçine dolumu gerçekleştirebildiği belirlenmiştir.

Çift ayak destekli vakum haznesinin üretim hızını arttırmanın yanısıra sağladığı bir diğer avantaj ise, bu imalat yöntemi ile üretilen kompozit parçaların ortalama çekme, eğme ve darbe mukavemetlerinin artmış olmasıdır.

Tezdeki deneysel çalışmalar sonucunda, tez çalışması kapsamında tasarlanan 3 farklı tasarımdan biri olan “Çift Ayak Destekli Harici Vakum Haznesi” tasarımında reçinenin elyaf dokumayı, hem tezde araştırılan diğer tasarımlara ve hem de literatürdeki mevcut diğer vakum haznelerine göre, daha hızlı ve homojen bir şekilde doldurduğu belirlenmiştir.

DESIGNS AND EXPERIMENTS OF MECHANISM FOR THE MANUFACTURING OF VACUUM INDUCED POLYMER COMPOSITE MATERIALS

SUMMARY

In the constantly developing world of industry, a rapid development is also experienced in the material world depending on the sector used and the increasing needs of human beings. Especially from the materials; low cost, long life, harmless to the environment and human, strength, recovery, corrosion resistance, high rigidity, vibration damping, heat and sound insulation, etc. Studies on composite materials have increased due to the demand for such properties and the inability of pure materials to adequately respond to these needs.

Composite materials are materials created by physically combining materials of two or more different properties and structures, which cannot meet the needs of the industry, on a macro scale at appropriate rates and conditions. The materials with different properties combined, after creating a composite structure, acquire new properties besides offering superior properties than they have alone.

The reinforcing elements and matrices forming the composite materials and the manufacturing methods to be used with them can be varied according to the properties desired from the composite materials.

The main problems encountered in vacuum supported polymer matrix composite material manufacturing techniques such as Vacuum Induced Resin Transfer Molding, Fast Remotely Actuated Channelling and Vacuum Induced Preform Relaxation, the inability of the resin to fill fiber weaving fast and the non-homogeneous flow of resin, does not allow industrial use of vacuum-supported polymer matrix composite material manufacturing methods.

Although there are some advantages of Vacuum Induced Resin Transfer Molding (VARTM) as one of vacuum induced polymer based composite materials manufacturing techniques, due to some disadvantages such as low production rate, high scrap ratio, non-homogeneous flow and low mechanical properties, VARTM manufacturing technique is not used commonly in the industry.

To be a solution for these disadvantages, Fast Remotely Actuated Channelling (FASTRAC) was came up. In FASTRAC manufacturing technique, another vacuum enviroment is created inside of an external vacuum chamber to increase flowability and homogeneity. Due to not mobile vacuum chamber used in FASTRAC, FASTRAC manufacturing technique could not be popular in the industry. Therefore, Vacuum Induced Preform Relaxation (VIPR) is used by making vacuum chamber mobile.

“Vacuum Induced Preform Relaxation” (VIPR) manufacturing method has been developed to solve some problems such as low flow rate and poor matrix distribution homogeneity encountered in VARTM and FASTRAC methods. Unlike VARTM manufacturing method, an external vacuum chamber is used in VIPR manufacturing

method. The vacuum chamber applied to the regions where the matrix slows on the reinforcing element increases the permeability of the reinforcing element regionally and accelerates the flow of the matrix.

The working logic of the external vacuum chamber is to increase the permeability of the reinforcing element using the low pressure medium created inside the chamber, thereby speeding up the matrix flow. For this reason, the resin speed in the region where the external vacuum chamber is applied is considerably higher than the resin flow rate in the VARTM method.

However, this vacuum pressure applied to the external vacuum chamber increases the force exerted by the chamber vertically on the vacuum bag and therefore on the fiber. This significantly reduces the flow rate of the matrix into the vacuum chamber.

By developing of FASTRAC and VIPR manufacturing techniques, some problems of VARTM such as not homogenous flow and low production rate are solved partly. On the other hand, due to external vacuum inside of the external vacuum chambers of FASTRAC and VIPR manufacturing techniques, frame pressure is occurred in where the vacuum chamber touches with glass wool. Due to frame force, resin flow is became very low.

In this study, three vacuum chambers are designed and studied to prevent frame force. Firstly, thicker gaskets are used on the frame of the vacuum chamber to decrease frame pressure. However, due to high difference between the pressures of inside and outside of the vacuum chamber, thicker gaskets are got inside and became useless. In the second design, springs are used inside of the vacuum chamber to decrease frame pressure by acting like a damping spring.

Eventhough resin flowability is became better in where frame force is applied, resin faces much more pressure due to springs. The last but not least, the other vacuum chamber is designed with 2 legs which can be moved up-and-down during the resin injection. By adjusting the position of the legs, frame pressure can be decreased by not creating any other forces preventing resin flow inside of the vacuum chamber. According to the results of experiments, resin flow is became more homogenous and faster with the last design, the vacuum chamber with 2 legs.

In experiments where traditional VIPR manufacturing method has been applied, the compression pressure applied by the vacuum chamber on the fiber has been reduced in the VIPR manufacturing method with double foot vacuum chamber application. Thus, the force faced by the resin at the inlet and outlet of the chamber is reduced and the entry and exit of the resin into the chamber is facilitated.

As a result of this advantage provided by the design developed in the thesis study, it has been determined that the VIPR manufacturing method realized with the application of double-legged vacuum chamber can perform resin filling 5% faster than the traditional VIPR method and 16% faster than the VARTM method.

In addition to increasing the production speed of the double foot supported vacuum chamber, another advantage is that the composite parts produced with this manufacturing method have increased average tensile, bending and impact strengths.

As a result of the experimental studies in the thesis, it was determined that in the “Double Foot Supported External Vacuum Chamber” design, which is one of the 3 different designs designed within the scope of the thesis, the resin fills the fiber weaving faster and homogeneously than other designs researched in the thesis and other available vacuum chambers in the literature.



1. GİRİŞ

Sürekli gelişen günümüz endüstri dünyasında, kullanılan sektöre ve insanoğlunun artan ihtiyaçlarına bağlı olarak malzeme dünyasında da hızlı bir gelişme yaşanmaktadır. İlk çağlardan beri insanoğlu için önemli bir yere sahip olan metal malzeme endüstrisinin yanında, farklı ihtiyaçların doğması ile birlikte farklı malzemeler üzerinde çalışmalar da yükselen bir ivme kazanmıştır. Özellikle malzemelerden; düşük maliyet, uzun ömür, çevreye ve insana zararsızlık, dayanım, geri kazanım, korozyona direnci, yüksek rijitlik, titreşim sönümleme, ısı ve ses yalıtımı vb. gibi özelliklerin istenmesi ve saf malzemelerin bu ihtiyaçlara yeteri kadar cevap verememesinden ötürü, kompozit malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar artmıştır.

Kompozit malzemeler, endüstrideki ihtiyaçları tek başına karşılayamayan iki ya da daha fazla farklı özellik ve yapıdaki malzemelerin fiziksel olarak makro ölçekte uygun oran ve koşullarda bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Bir araya getirilen farklı özelliklerde malzemeler, kompozit bir yapı oluşturduktan sonra, tek başına sahip olduklarından daha üstün özellik sunmanın yanı sıra, yeni özellikler de kazanırlar.

Kompozit malzemeler ile ilgili yapılan çalışmaların her yıl artması ve bu malzemelerin endüstrinin birçok kolunda kullanılmasındaki en büyük etken sağlamış oldukları avantajlardır. Kompozit malzemelerin çekme mukavemetleri, bir çok metale göre daha yüksektir. Çok karmaşık biçimli ve büyük parçalar, tek işlemle bir bütün halinde üretilebilir. Isıya ve alevlenmeye dayanıklı olabilmeleri, kompozit malzemelerin yüksek sıcaklık altında kullanılmasına olanak sağlamıştır. Isı, ses ve elektrik yalıtım özellikleri ile inşaat ve uzay sektöründe de kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerin, birbirinden çok farklı yapı ve özelliklerde olmalarından ve hemen hemen her türlü ihtiyaca cevap verebilecek kapasitede özelliklerinin olmasından dolayı havacılık ve uzay sanayisinde, otomotiv sanayisinde, gemi imalat endüstrisinde, savunma sanayisinde, spor malzemeleri sanayisinde, inşaat, altyapı ve enerji sektörlerindeki önemi ve kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Örneğin otomotiv sektöründe, gerek yakıt tüketimi gerekse güvenlik gibi özelliklerin ön plana çıkması

ile birlikte, elik ve alüminyum alaşımları gibi yüksek yoğunluğa sahip malzemeler, yerini mekanik özellikler açısından bu alaşımlara alternatif ve çok daha hafif kompozit malzemelere bırakmıştır. Kompozit malzemeler, otomobillerin cam sileceğinde, filtre kutusunda, pedallarda, dikiz aynasında, far gövdesinde, kaportada, yan gövde iskeletinde, gösterge panellerinde, hava giriş manifoldunda, spoilerlarda vb. birçok otomotiv malzemesinde kullanım alanı bulmaktadır.

Hızla sanayileşmesini sürdüren günümüz dünyasında, iletişim ve ulaşım da önemli bir noktaya gelmiştir. Bunu sağlayan en temel sektörlerden birisi de havacılık ve uzay sanayisidir. Bu sektörde kullanılan malzemelerden istenilen en önemli özellikler, düşük yoğunluğun yanı sıra çok düşük ya da çok yüksek sıcaklıklara ve basıncılara dayanabilen, yüksek mukavemetli malzemelerdir ki bu da gene kompozit yapılı malzemelerle sağlanmaktadır. Uçakların kanat ve gövde panelleri, kanatçıklar, zemin döşemesi, egzozlar vb. bir çok kısımlarında kompozit malzeme kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerin özellikle korozyona karşı dirençli olması, düşük ısı genleşme katsayısına sahip oluşu, iyi sönümleme performansı ve iyi aşınma direncinden ötürü gemi inşaatı sektöründe de yıllardır önemli bir rol oynamaktadır.

Bunların yanı sıra, kompozit yapılı elik yelekler gibi yüksek dayanım ve hafifliğinden dolayı savunma sanayisinde, sağlığa zararsız oluşundan ve ucuz olarak kolay hazırlanabilmesinden ötürü sağlık sektöründe, akustik ve titreşim sönümleme özelliklerinden dolayı müzik aletleri yapımında, düşük ağırlık, yüksek dayanım ve esneklik özelliklerinden dolayı spor araçları sektöründe kullanımı hızla artmaktadır.

Kompozit malzemelerin sağladıkları avantajlara rağmen, sahip oldukları dezavantajlardan dolayı bazı sektörlerde kullanılamamaktadır. Ayrıca hammadde fiyatlarının pahalı oluşu kullanıcıyı daha kalitesiz fakat çok daha ucuz alternatif malzeme arayışına itmektedir. Kompozitin kalitesi, imalat yöntemleri ile birlikte takviye ve matris elemanlarına bağlı olduğundan standart bir kalitesi de bulunmamaktadır. Stoklama, imalat yöntemleri ve imalat sonrası işlemler maliyeti arttırmaktadır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER ve VAKUM ESASLI İMALAT YÖNTEMLERİNE AİT BİLGİ BİRİKİMİ

2.1 Bileşenler

Matris ve takviye elemanı adı verilen iki temel bileşenden oluşan kompozit malzemeler, bu iki temel bileşenin özelliklerine ve bir araya getirilme yöntemlerine bağlı olarak karma yapılu içyapısıyla bileşenlerinden daha üstün özelliklere sahip olurlar. Takviye bileşen genel olarak, yük taşımada mukavemeti artırma gibi mekanik özellikler sunar. Takviye elemanları olarak günümüzde en çok kullanılan malzemeler aramid, karbon ve cam elyaf gibi sürekli elyaf türünde malzemelerdir. Şekil 2.1’de elyaf takviyeli kompozit malzemelerin bileşenleri verilmiştir.



Şekil 2.1 : Elyaf takviyeli kompozit malzeme bileşenleri.

Kompozit malzemelerin oluşumunda kullanılan bir diğer bileşen elemanı olan matrisler ise, yapının bir bütün halinde durmasını sağlayan, kompozit malzemeye uygulanan yükün takviye elemanında aktarılmasını sağlayan, kompozit malzeme üzerinde oluşan çatlakların ilerlemesini önleyen ve kopmayı geciktiren, genel yapıyı ortam şartlarından ve kimyasal etkilerden koruyan önemli bir bileşendir [1].

2.1.1 Kompozit malzemelerin matrislere göre sınıflandırılması

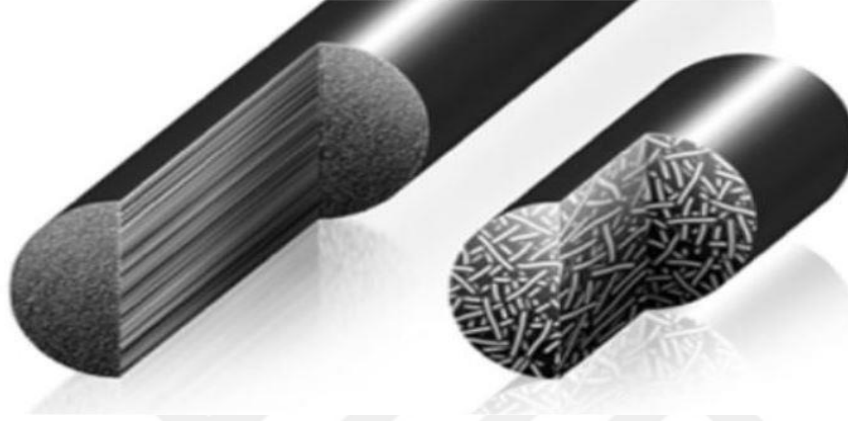
Kompozit malzemeleri, matris malzemesine bağlı olarak metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitler olarak sınıflandırabiliriz.

2.1.1.1 Metal matrisler

Matris elemanı olarak metalin, takviye elemanı olarak da genelde seramik malzemelerin kullanıldığı metal matrisli kompozit malzemeler aşınmaya dayanıklı,

kırılma tokluğu ve basma mukavemeti yüksek malzemelerdir. Bu özelliklerinden ötürü otomotiv, savunma ve havacılık sektörlerinde yoğun şekilde kullanılmaktadır.

Alüminyum, magnezyum, nikel, titanyum, bakır ve çinko gibi hafif metaller matris yapısını oluşturmaktadır. Metal matrisler her takviye bileşeniyle iyi bir arayüzey bağı oluşturamazlar. Bu durum metal matrisli kompozit malzemelerin imalatını zorlaştırmakta ve maliyetini arttırmaktadır. Şekil 2.2’de metal matrisli kompozit malzemeler gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Metal matrisli kompozit malzemeler.

2.1.1.2 Seramik matrisler

Seramik matrisli kompozit malzemeler, çok yüksek sıcaklıklara dayanıklı, hafif, çok yüksek hızdaki ani yüklere dayanıklı, erezyona ve aşınmaya karşı dirençli oluşlarından ötürü geleneksel malzemelere alternatif olarak kullanılmaktadır. Türbin motor parçaları, sıcak gaz filtreleri, zırhlar, fren diskleri ve egzoz valfleri vb. birçok alanda kullanılmaktadır. Alumina, silisyum karbür ve silisyum nitrür başlıca kullanılan seramik matrisleridir. Şekil 2.3’te seramik matrisli kompozit malzemelere örnek gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Seramik matrisli kompozit malzemeler.

2.1.1.3 Polimer matrisler

Monomer adı verilen küçük moleküller belirli ortam şartlarında, bir takım kimyasal etkileşimler sonucu birbirlerine eklenerek polimer adı verilen uzun zincirler oluşturur. Polimer matrisli kompozit malzemelerde matris görevini termoplastik veya termoset malzemeler yapmaktadır. Isıya karşı gösterdikleri tepki davranışına göre termoset ya da termoplastik olarak ikiye ayrılan polimer matrislerinden termosetler ucuz ve kolay üretilabilir olmalarından ötürü termoplastiklere göre daha çok tercih edilmektedir.

Polimer matrisli kompozit malzemeler, seramik ve metal matrisli kompozit malzemelere kıyasla üretimlerinin daha kolay ve az maliyetli olmalarından ötürü, üretilen kompozit malzemelerin %90'ını oluşturmaktadır.

Polimer matrisli kompozit malzemelerin en önemli özelliği yüksek özgül mukavemet değerine sahip oluşudur. Yüksek mukavemetli çeliklerde bu değer 110 Nm/gr iken cam lifli poliesterlerde 620 Nm/gr'dir. Alüminyuma kıyasla özgül elastisite değerinin 5 kat fazla olduğu polimer matrisli kompozit malzemeler, hem dayanımın hem de hafifliğin istenildiği otomotiv, havacılık ve savunma sanayii gibi alanlarda alüminyum alaşımlarına karşılık tercih edilmektedir. Birçok farklı takviye malzemeleri ile çok iyi uyum sağlayabilmeleri de kompleks parçaların imalatını kolaylaştırmıştır.

Kompozit malzemelerde kullanılan polimerlerden biri olan ve ısıtılınca yumuşamayan plastikler olarakta adlandırılan termoset polimerler, kompozit malzeme matrisleri olarak en yaygın kullanılan malzemedir. Termoset malzemeler, ısıtılma ve birtakım kimyasal etkileşimler sonucu monomer moleküllerinin çapraz bağlarının birbirine bağlanması ile meydana gelir [1]. Kovalent bağlarla üç boyutlu bağlanıldığı için oldukça rijit bir yapısı vardır ve ısıtıldıklarında çözünmezler.

Termoset malzemelerin sertleşmemesi için dondurucularda depolanmaları gerekmektedir. Bu koşullarda yaklaşık raf ömrü 2 yıla kadar çıkarken, oda koşullarında 1 ay içerisinde sertleşebilmektedirler [1]. Herhangi bir kimyasal işlem ya da ısıtma yöntemiyle çözünemezler. Bundan dolayı geri dönüşümleri de mümkün değildir.

Poliester, epoksi, vinilester, fenolik reçineler en yaygın kullanılan termoset matrislerdir. Ester molekülleri zincirlerinden oluşan poliesterler, hem Türkiye'de hem de dünyada cam elyaf takviyeli polimer kompozit malzeme uygulamalarında en sık kullanılan termoset polimerlerdir. Poliesterlerin sertleşmeden önceki viskoziteleri

düşük olduğundan cam elyafa iyi nüfuz eder ve birlikte iyi bir kompozit yapı oluştururlar. Kullanımı kolay ve maliyeti düşüktür. El yatırması gibi basit yöntemlerden, en ileri imalat tekniklerine kadar hepsine uygundur.

Polimerizasyon sonucu oluşan epoksilerin suya, aside, yağa ve kimyasallara karşı direnci çok iyidir ve bu direnci zaman içerisinde yitirmezler. Sıvı formda 140 °C'ye, katı formda 220 °C'ye kadar çıkan ısı dayanımlara ve mekanik dayanıklılığa sahip oluşu nedeni ile otomotiv ve uzay sanayisinde kullanılmaktadır [1].

Yapılan çalışmalarda epoksi reçinelerin karbon elyaf takviye elemanı ile, poliestereçinelerin ise cam elyaf takviye elemanı ile daha uyumlu oldukları gözlenmiştir. Poliesterlerin epoksilere göre daha az maliyetli oluşu ve düşük viskozite-yüksek ıslatma özellikleri nedeni ile poliester kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır.

Kompozit malzemelerde kullanılan polimerlerden bir diğeri olan ve ısıtılınca yumuşayan polimer olarakta bilinen termoplastik malzemeler ısıtıldıklarında yumuşama, soğutulduklarında sertleşme özelliğine sahiptirler. Metallerle kıyasla 5 kat genişleme katsayısına sahiptirler [2]. Termoplastik malzemeler ısıtılarak tekrar tekrar şekil verilebildiklerinden geri dönüşüm (hurda) değeri vardır ve saklama koşulları ve raf ömürleri termosetlere kıyasla çok daha uzundur.

Kompozit yapısında, termoset malzemelere kıyasla kullanımları oldukça az olmasına rağmen termoplastik malzemelerin üstün kırılma toklukları, raf ömürlerinin uzun oluşu ve geri dönüşüm kapasiteleri nedeniyle otomotiv ve havacılık sektörlerinde kullanımları oldukça yaygındır. Ayrıca elektrik yalıtım değerlerinin çok iyi olması, bu malzemelerin kullanım alanını genişletmektedir.

Tüm bu avantajlı özelliklerinin yanı sıra, termosetlere kıyasla düşük çekme mukavemeti ve rijitliğe sahiptirler. Düşük ergime sıcaklığına sahip olup, oda sıcaklığında bile zamana bağlı şekil değişimi (viskoelastik davranış) gösterebilmektedirler [2]. İmalat prosesinin zor ve maliyetli oluşu ve termoplastik malzeme maliyetinin termosetlere kıyasla çok daha fazla olması, termoplastik matrisli polimer kompozit malzeme imalatını kısıtlayan faktörlerdir.

Termoplastik çeşitlerinin çok olmasına rağmen kompozit malzemelerde matris olarak kullanılan termoplastik malzemeler sınırlıdır. Polietilen, polipropilen, poliamids en yaygın termoplastik malzemelerdir.

2.1.2 Kompozit malzemelerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin iskeletini oluşturan takviye elemanları, matrisle bir araya gelip kompozit malzeme oluşturup yapıya yüksek mukavemet ve rijitlik özellikleri kazandırır. Kompozit malzemeler, kullanılan takviye elemanı malzemesine bağlı olarak çok iyi iletken ya da yalıtkan olabilirler.

Takviye elemanları şekillerine göre parçacık takviyeli ve elyaf takviyeli olmak üzere 2 kategoride incelenebilir.

2.1.2.1 Parçacık takviyeler

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler, takviye malzemesinin parçacıklar halinde matris yapıda dağılmasıyla meydana gelirler. Takviyeler elemanları mikroskobik ya da makroskobik boyutta olabilirler. Parçacık takviye elemanlarının boyutları, yüzey enerjileri, hacimsel oranları ve matris içinde homojen dağılıp dağılmadıkları, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemektedir [3]. Parçacıkların farklı boyutlara sahip olması durumunda büyük parçacıklı kompozitlerde yük, bileşenler tarafından birlikte taşınırken, küçük parçacıklı kompozitlerde kompozitin genel dayanımı arttırılmaktadır. Şekil 2.4'te parçacık takviyeli kompozit malzemeler örneklendirilmiştir.



Şekil 2.4 : Parçacık takviyeli kompozit malzemeler.

Parçacık takviye elemanlarının ve bu elemanlardan üretilen parçacık takviyeli kompozit malzemelerin imalatı oldukça kolay ve maliyeti düşüktür. Düşük maliyetinden ötürü kullanımı yaygın olsa da, matris içerisinde tamamiyle homojen dağılamaması ve mekanik özelliklerinin elyaf takviyeli kompozit malzemelere göre daha düşük olması nedeni ile kullanım alanları kısıtlanmaktadır.

2.1.2.2 Elyaf takviyeler

Kompozit malzemeler içerisinde imalatı ve kullanımı en yaygın olan elyaf takviyeli kompozit malzemeler, ince elyafın matris içerisinde yer almasıyla elde edilmektedir.

Elyafın matris içerisinde ki dağılımı, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini belirlemektedir. [4] Kullanım alanına ve istenen mekanik özelliklere göre, paralel yerleştirilen elyafın eksenleri doğrultusunda mekanik özellikler artırılabilirken, eksenlere dik doğrultuda azalmaktadır. Her doğrultuda elyaf dizilimi yaparak ya da kısa elyafraştırgele dağıtılarak her yönde eşit ve yüksek mukavemetler elde edilebilir. [4] Elyafın mukavemeti kompozit malzemenin mukavemetini belirleyen ana unsurdur. Cam, karbon, kevlar, boron ve aramid en yaygın kullanılan elyaf malzemeleridir.

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde yükü taşıyan ana komponent, belirli oran ve düzende yerleştirilmiş elyafdır ve elyafın belirli bir düzende bulunmalarını sağlayan da matristir. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkileyen bir diğer unsur da elyaf ile matris arasındaki bağıdır. Matris yapısının içerisinde bulunan boşluklar ve matrisin emdiği nem, elyaf ile matris arasında ki bağı bozar. Matris elemanı olarak termoset ve termoplastikler elyaf takviyelerle son derece uyumlu olmalarına rağmen, daha düşük maliyetli oluşlarından ötürü termoset reçineler daha yaygın kullanılmaktadır. Termoset bir malzeme olan epoksi reçinesi karbon elyaf ile, başka bir termoset malzemesi olan poliestere ise cam elyaf ile çok iyi bir uyum göstermektedir.

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mukavemeti elyaf oranı ile de ilişkilidir. Elyaf oranı arttıkça, kompozit malzemenin mukavemeti de belirli bir değere kadar artacaktır. Elyaf oranının çok fazla artırılması, kompozit yapıdaki matris oranını düşüreceğinden matris artık işlevini gerçekleştiremez ve elyafı bir arada tutan yapıyı oluşturamaz [5].

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mukavemetini etkileyen bir diğer unsur da elyaf kalınlığıdır. İnce elyaf ile hazırlanan kompozit malzemelerde matrisin takviye elemanı ile temas ettiği yüzey, kalın elyaf ile hazırlanmış kompozit malzemelere göre çok daha fazla olacağından ve elyaf ile matris arasında oluşan bağlar yükün dağılımını kolaylaştıracağından, ince elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mukavemeti daha iyidir.

Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemeler günümüzde farklı amaçlar için yaygın olarak kullanılan mühendislik malzemesi haline gelmiştir [3]. Otomobil, havacılık, inşaat ve gemi sektörleri başlıca kullanım alanlarıdır.

Elyaf türlerinden sürekli elyaf, günümüz kompozit malzemelerinde en çok kullanılan ve kompozit malzemelerin gelişmesinde çok büyük rol oynayan takviye

malzemelerdir. Kompozit malzemenin mukavemetini oluşturan elyaf, kompozit malzemeye sağladığı düşük yoğunlukta yüksek mukavemet, yüksek elastisite modülü ve sertlik gibi avantajlarından ötürü son derece cazip hale gelmişlerdir. Oldukça küçük çaplarda üretilebilen elyafın içyapısındaki malzeme kusurları çap küçüldükçe azaldığından, çok yüksek mukavemetli elyaf elde edilebilmektedir. Bu da kompozit malzemeye yüksek mukavemet özellikleri kazandırmaktadır. Elyafın çapına oranla boyunu arttırarak, matrisin ne kadarlık yükü takviye elemanına ileteceği dengelenebilir.

Kullanılacak sektöre göre özellikleri belirlenen sürekli elyafli kompozit malzemelerde, yüksek iletkenlik ya da yalıtkanlık, titreşim sönümleme, darbe dayanımı gibi kompozit malzeme özelliklerini kullanılan elyafla ayarlamak mümkündür.

Kompozit malzemelerde kullanılan bir diğer elyaf türü ise, sürekli elyafın küçük parçalara ayrılması sonucu oluşan süreksiz elyafdır. Mukavemeti sürekli elyafla göre daha düşüktür. Elyaf parçaları rastgele dağıldığı için bu tip elyafla üretilen kompozit malzemelerde mekanik özellikler izotrop olamamaktadır.

Süreksiz elyafın imalatı, sürekli elyafa göre nispeten daha az maliyetli ve kolaydır.

Hem sürekli hemde süreksiz elyaf, şekil alabilen özelliklerde olduklarından dolayı en kompleks parçaların imalatında bile düşük maliyetle kullanılabilirler.

2.1.2.3 Takviye elemanı malzemeleri

Doğal elyaf bitki, hayvan ve minarel gibi doğal kaynaklardan elde edilip bir takım işlemlerden geçirilerek iplik, keçe kağıt gibi maddelere dönüştürülen lif ya da kıl yapısındaki maddelerdir. Keten, kenevir, pamuk ve kauçuk en yaygın doğal elyadır.

Günümüz endüstri dünyasında kullanılan malzemelerde aranan dayanıklılık, esneklik, hafiflik gibi özellikler de aslında doğal elyafın kullanım alanlarını belirlemektedir [6]. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra sentetik elyaf kullanımına yönelik ilgi artmış olsa da petrol fiyatlarındaki artış ve çevresel faktörler doğal elyafa olan ilgiyi her geçen gün arttırmaktadır.

Kompozit malzeme imalatında kullanılan bir diğer elyaf türü ise sentetik organik elyafdır. En yaygın sentetik organik elyafdan biri olan ve aromatik poliamid malzemesinden üretilen aramid elyaf, farklı ihtiyaçları karşılamak amacıyla farklı özelliklerde üretilebilir. Bir takım kimyasal işlemlerden geçirilerek darbe dayanımı,

çekme mukavemeti, yorulma dayanımı, kimyasal direnci ve aşınma dayanımı yüksek aramid elyaf elde edilebilmektedir. Teknelerin gövdesinde, koruyucu kıyafetlerde vb. birçok farklı sektörde kullanılmaktadır.

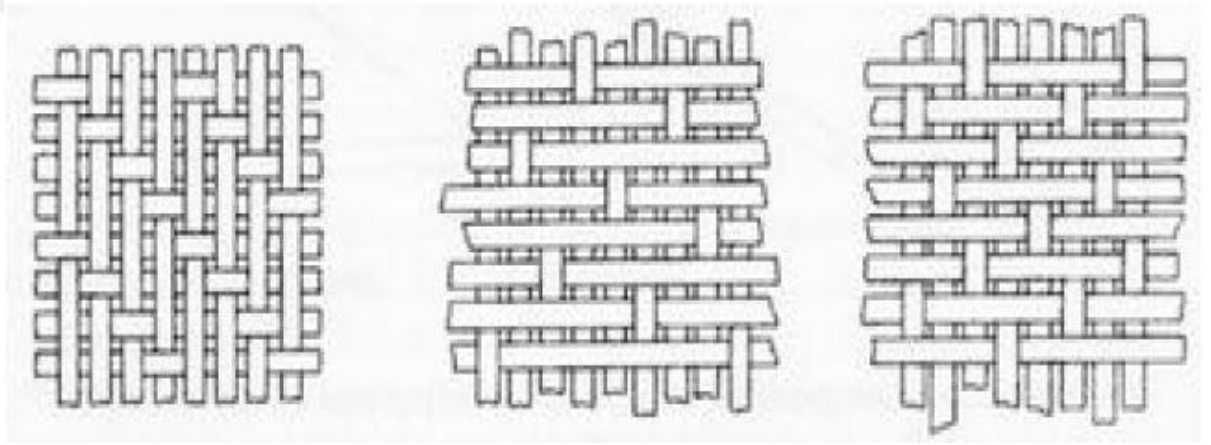
Sentetik inorganik elyafdan olan cam elyaf silika, kolemanit, alüminyum oksit, soda gibi maddelerden oluşan camın çok küçük çaplarda lif şeklinde üretilmiş haline denilmektedir. [7] Sektöre uygun istenilen çap ve boylarda üretilebilen cam elyaf, kompozit malzemelerde en çok kullanılan elyaf malzemesi haline gelmiştir. Cam elyaf, erimiş camın tabanında istenilen çap ölçüsüne göre delikleri bulunan ve özel tasarlanmış bir kalıbın içinden geçirilerek lif formuna getirilmesidir. Bu işlem ile biçimlendirilen cam liflerin yüzeyi, genellikle suda kolay çözülebilen polimerler kullanılarak kaplanır ve bu şekilde fiziksel ve kimyasal etkilere karşı dayanımı ve mukavemeti arttırılmış olur. Bu kaplama işlemi, elyaf ile reçine arasında ki uyumu da arttırdığından kaplama işlemi sonrasında cam elyafın sertlik ve mukavemetleri artar.

Cam elyaf oldukça elastik malzemelerdir ve yük altında homojen olarak kopma noktasına kadar uzayabilir ve yükün kalkması sonucu herhangi bir akma özelliği göstermeden ilk boyutuna geri dönebilirler [8]. Doğal elyafda ve sentetik organik elyafda bulunmayan bu elastiklik ve yüksek dayanım özellikleri, cam elyafın büyük miktarlardaki enerjileri depolama özelliğine sahip olmalarına neden olur [9]. Bu özellikleri ile yüksek çekme mukavemetine sahip olan cam elyafın birim ağırlık başına mukavemetleri çeliklerden daha fazladır.

Cam elyaf ile üretilen kompozit malzemelerin yüksek ısı, elektrik ve ses yalıtımına sahip olmaları, yüksek kimyasal dayanımlara sahip olmaları, imalatının ve kullanımının düşük maliyetli olması ve nem absorbe etmemesi gibi özelliklerinden dolayı inşaat, havacılık, otomotiv, spor araçları ve denizcilik sektörlerinde en yaygın kullanılan kompozit malzeme takviye elemanları olmuşlardır.

Cam elyaf 4 farklı tipte üretilebilmektedir. En yaygın cam tipi olan “Alkali ya da A Camı” yüksek oranda alkali içermektedir. Elektriksel yalıtkan özelliği az olan alkali camların kimyasal direnci ise oldukça fazladır. Daha çok pencerelerde ve şişe imalatında kullanılan alkali camların kompozit malzeme takviye elemanı olarak kullanımı bulunmamaktadır. “Korozyon ya da C Camı” olarak adlandırılan camların mekanik özellikleri düşüktür fakat kimyasal dirençleri çok fazladır. Depolama tankı gibi yerlerde iç yüzey kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Düşük alkali oranı

nedeni ile elektriksel yalıtkanlığı oldukça yüksek olan “Elektrik ya da E Camı” tipi cam elyafın mukavemeti ve suya direnci oldukça fazladır. Özellikle nemli ortamlarda çalışacak olan kompozit malzemelerde E camı elyafı tercih edilmekle birlikte en yaygın kullanılan cam elyaf tipidir. “Mukavemet ya da S Camı” tipi camlarda camı oluşturan tellerin çapı E tipi camlardaki tel çaplarının yarısı kadardır. [8] Bu da matris içerisindeki lif sayısının artmasına ve daha fazla birleşme yüzeyleri elde edilmesine neden olur. Yüksek mukavemetli cam tipi olan S tipi cam elyafın çekme mukavemeti E tipi cam elyafa göre % 30 daha fazladır [8]. Yüksek sıcaklıklarda bile yüksek yorulma direncine sahip olan S tipi cam elyaf, bu üstün özelliklerinden dolayı daha çok havacılık ve uzay sanayisinde kullanılmaktadır. Şekil 2.5’te farklı dizilişte ki cam elyaf dokumalar gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Farklı dizilişte ki cam elyaf dokuma örnekleri.

Cam lif imalatında, belirli oranlarla seçilen cam bileşenleri çok küçük parçalara kadar öğütülüp harmanlanarak homojen bir karışım elde edilmektedir. Bu karışım daha sonra 1600 °C’lik fırınlarda sıvılaştırılıp, uygun çaplardaki deliklerden geçirilerek cam elyaf lifleri elde edilmektedir. Kalıp deliklerinden çıkan lifler, mekanik lif çekme yöntemi ve pnömatik lif çekme yöntemleri ile çekilerek cam elyaf imalatı yapılmaktadır.

Cam elyafdan sonra en çok kullanılan takviye elemanı olan karbon elyaf, cam elyafa göre daha düşük yoğunlukta ve daha yüksek mukavemet değerlerine sahiptir. İmalatı ve kullanımı cam elyafa göre daha maliyetli olsa da özellikle havacılık sektöründe ve spor araçlarında kullanılan en yaygın takviye elemanlarıdır. Yüksek ısı dayanımı sayesinde sıcaklığın çok yüksek olduğu yerlerde tercih edilir. Karbon elyafın korozyon dayanımı, sertliği ve yorulma dayanımı oldukça yüksektir [10]. Hemen hemen bütün reçine matrislerle sağlam yapıda kompozit malzeme oluşturabilmelerine rağmen en yaygın olarak epoksi reçine ile kullanılır. Kullanım alanına göre alüminyum ve

magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılır [11]. Nemden etkilenmemeleri ve sürtünme, aınma ve yorulma mukavemetlerinin yüksek oluu, karbon elyafı havacılık ve gemi sektöründe önemli bir malzeme haline getirmiştir.

Liflerin konum ve dağılımlarına göre sürekli elyaf ve krplmı elyaf olmak üzere 2 çeşit karbon elyaf bulunmaktadır. Malzeme türüne göre de karbon elyaf ikiye ayrılmaktadır. Zift tabanlı karbon elyafın mukavemetleri nispeten düşük olduğundan daha çok yapısal uygulamalarda kullanılırken, poliakrilonitril karbon elyaf yüksek mukavemetli ve hafif olularından dolayı havacılık ve uzay sektöründe kullanılmaktadır.

2.2 Elyaf Takviyeli Karma Malzemelerin İmalat Yöntemleri

Elyaf takviyelei kompozit malzeme imalatı, matris malzemesinin takviye elemanları ile mikro ölçekte oluşturdukları tabakaların, kompozit malzemedен istenilen özelliklere ve boyutlara göre makro ölçekte bir araya gelmeleriyle oluşur. Kompozit malzeme üretiminde kullanılacak olan imalat yöntemi kompozit malzemedен istenen özelliklere, matris ve takviye elemanlarına, parça şekline ve maliyete göre değişiklik göstermektedir.

Kompozit malzeme özellikleri, matris ve takviye elemanlarının özelliklerinin yanı sıra bu malzemelerin hangi yöntemler ile ve hangi koşullarda retildiğiyle de bağlantılıdır. Farklı ekil, boyut ve tekniklerde üretilen kompozitlerin sertlik, korozyon direnci, yüksek mukavemet, elektrik ve ısı yalıtımı gibi özellikler belirlenebilir. Farklı matrisli kompozit malzemelerin birbirinden farklı imalat teknikleri bulunmaktadır.

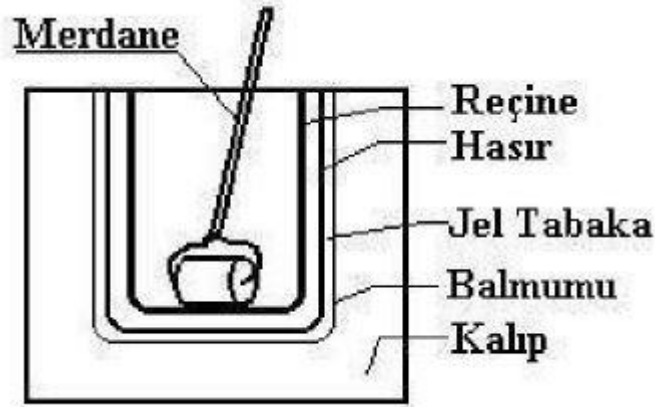
2.2.1 El yatırması yöntemi

Kompozit malzeme imalat yöntemlerinden en kolay ve az maliyetli olan imalat yöntemlerinden biri olan el yatırması yönteminde, takviye elemanları imalatı yapılacak parçanın kalıbına düzgünce yerleştirilmesinden sonra, matrisi oluşturacak malzeme fırça gibi el aletleri ile uygun kalınlık elde edilene kadar takviye elemanına sürülür. Sürme işleminin ardından yapı kalıp içerisinde belli bir süre bekletilerek sertleşmesi sağlanır. [12] Sertleşme tamamlandıktan sonra kalıptan çıkarılan kompozit malzeme, kullanılacağı yere ya da yapılacak olan testlere göre çeşitli işlemlerden geçirilir. Üretim anında dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan bir tanesi de matrisin takviye elemanı ile birletikten sonra yüzeyde hava boşlukları kalmamasıdır.

Yapı içerisinde bulunan hava boşlukları mukavemet, yalıtım gibi birçok özellikleri etkilemektedir.

Bu yönteme uygun matris elemanları genellikle poliester ve epoksi reçinelerdir. Takviye elemanı olarak ise daha çok camdan ya da karbondan üretilmiş keçe ve dokumalar kullanılmaktadır.

Kalıplar sadece şekil vermek amaçlı kullanıldığı için kalıp maliyeti, dolayısıyla üretim maliyeti oldukça düşüktür. Bu durum el yatırması yöntemini, kompozit malzeme imalat yöntemlerinde en çok kullanılan imalat tekniği yapmıştır. [13] Çok farklı boyut ve şekillere sahip kompleks parçalar tek bir işlem ile üretilebilir. Bu da tasarım esnekliği sağlamaktadır. Montaj kolaylığı da sağlayan el yatırması yöntemiyle prototip imalatı hızla yaygınlaşmaktadır.



Şekil 2.6 : El yatırması yöntemi. [16]

İşgücü oldukça fazla olan el yatırması imalat yönteminde, kompozit ürününün kalitesi çalışana da bağlıdır. Bu yöntemde işçilik otomasyona değil de insana bağlı olduğu için, üretimi yapan kişinin takviye elemanına sürülen matrisin kalınlığını düzgün ayarlamalı, homojen bir şekilde takviye elemanına dağıtmalı ve hava kabarcıkları bulundurmamalıdır. Bu yöntem ile üretilen kompozit malzemelerde kalıba değen yüzey daha düzgün çıkmaktadır. Reçine matrisinin içine katılan ve tutunmayı, yapışmayı ve kürlenmeyi sağlayan kimyasallar üretim anında sistemden buharlaşabilmekte ve bu da çevresel kirliliği artırmaktadır.

2.2.2 Püskürtme yöntemi

Sprey kalıplama yönteminde, kompozit malzemeyi oluşturacak uygun takviye ve matris elemanları kalıp yüzeyine püskürtme tabancası ile püskürtülerek kompozit malzeme üretilir. Tabancaya bağlı olan elyaf, tabanca üzerinde bulunan kesici bir

aparât ile kırıldıktan sonra, içine yapışkanlığı ve kûrlenmeyi arttırıcı kimyasallar katılmış olan reçine ile, hazırlanmış kalıba uygun oranlarda pûskûrtûlûr. Daha sonra bir rulo yardımı ile yüzey düzgûnleştirilir ve hava boşlukları yapıdan alınır.



Şekil 2.7 : Pûskûrtme yöntemi.

Elle yatırması yöntemine çok benzeyen ve onun makinalaşmış hali gibi de düşünebileceğimiz pûskûrtme yönteminde, kompozit malzemeler içindeki reçine - elyaf dağılımı, elle yatırması yöntemine göre daha iyidir. Ayrıca, elle yatırması imalat yöntemine göre daha az işçilik ihtiyacı, daha hızlı ve kontrollü bir imalat yöntemi olması gene makineleşmenin getirdiği avantajlardır. [9] Hemen hemen bütün boyut ve şekillerin üretiminde verimli olarak kullanılmaktadır. Oldukça düşük maliyetli bir imalat tekniği olan pûskûrtme yöntemi ile günümüzde oto kaportaları, gemi yüzeyleri, kûvetler ve yüzme havuzları iç yüzeyleri üretilebilmektedir.

Bu yöntemin en büyük sınırlayıcılığı, pûskûrtme tabancasına giden matris malzemesiyle takviye elemanı arasındaki orandır ve elyaf miktarı maksimum %35 olabilmektedir. Bu miktarın üzerinde elyaf kullanımı olması durumunda, reçine takviye elemanına yer yer temas edemez ve homojen olmayan, bazı bölgelerine matris ulaşmamış bir içyapı elde edilir. Belli kullanım ömürleri olan ve uygun şartlarda çalışması gereken pûskûrtme aletleri bazen malzemeleri doğru oranlarda karıştırıp pûskûrtmemekte ve bu durum da kompozitin mekanik özelliklerini etkilemektedir. [12]. Bu yöntem ile sadece kalıba değen yüzey pûrûzsûz ve parlak çıkarken, diğer yüzey pûrûzlû olabilmektedir. Reçine içine katılan kimyasalların uçuculuğu da çevreye ve insana zarar verebilir.

2.2.3 Elyaf sarma yöntemi

Elyaf sarma yönteminde, kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılan sürekli lifler, reçine banyosundan geçirilerek makara yardımıyla dönen bir kalıba

sardırılıp kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilir. Oluşturulan kompozit malzemenin nerede kullanılacağına ve istenilen özelliklerine göre, kaç kat sarılacağı ve liflerin kalıba sarım açıları belirlenmektedir. Bu yöntem ile üretilen kompozit malzemelerin mukavemetleri oldukça yüksek ve iç yüzeyleri pürüzsüzdür [14]. Matris malzemesi genellikle poliester ve epoksi gibi reçinelerdir ve elyaf liflerinin bu reçinelerle olan temasına göre elyaf sarma yöntemi, kuru sarma ve yaş sarma olarak ikiye ayrılmaktadır.

İmalat tekniğinden dolayı sadece dairesel parçalar üretilebilmekte olup bu teknikle üretilen başlıca kompozit ürünler silindirik kaplar, silolar, basınçlı kaplar, güç iletim şaftları, su tankları, yat direkleri ve roket motorlarıdır. Otomasyon kolaylığı beraberinde az işçiliği getirmektedir. Kontrol edilebilir bir imalat metodu olan elyaf sarma yönteminde termoset ve termoplastik gibi farklı polimerler kullanılabilir [14]. Elyaf sarma yönteminin başlıca dezavantajları ise sadece belirli tip şekillerin üretiminde kullanılabilmesi ve ekipman maliyetinin yüksek oluşudur.

2.2.4 Reçine transfer yöntemi

Reçine transfer yönteminde, erkek ve dişi olarak tasarlanan kalıplara takviye elemanı yerleştirilip, uygun vakum değeri altında ki kalıba reçine akıtılarak kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilir. Kompozit malzeme kalınlığı 10 mm'ye kadar çıkabilmekte ve yaklaşık % 25 elyaf oranına sahip olabilmektedir [15]. Bu yöntemin en büyük avantajı iki yüzeyinin de pürüzsüz kompozit malzeme üretimi gerçekleştirmesidir. Böylelikle kompozit, homojen yapıda yüksek mukavemet göstermektedir. İçerideki havanın dışarı çıkması ve böylelikle akışı kolaylaştırmak için uygulanan vakum, aynı zamanda imalat anında matrizen çıkan zararlı kimyasalları da uzaklaştırdığından dolayı hem kompozitin mekanik özellikleri için hem de güvenlik ve sağlık için oldukça önemlidir. Diğer imalat yöntemlerine kıyasla daha az işçilik gerektirmektedir. Çok kompleks parçaların hızlı bir şekilde ve aynı kalitede imalatı gerçekleştirilebilmektedir.

Reçine transfer yönteminde kullanılacak takviye ve matris elemanları ile bu iki bileşenin birbiri ile uyumu iyi belirlenmelidir. Matris elemanının viskozitesi, takviye elemanını belli süre içerisinde yeterince ıslatabilecek kadar düşük olmalıdır. [15] Yüksek sıcaklıkta hızlı sertleşen matris elemanlarında soğuma anındaki büzülmeyle ilgili olarak minimum çatlama olması gerekir. [16] Bu yöntemde genellikle epoksi ve

fenolik reçineler matris elemanı olarak, cam ve karbon elyaf da takviye elemanı olarak tercih edilmektedir.

Kullanılan kalıpların çift taraflı olması ve uygulanan vakum basıncına dayanacak mukavemette olması gerektiğinden, reçine transfer yönteminin maliyeti yüksek olmaktadır. Oldukça kompleks parçalar üretilse bile kalıpların maliyetli oluşu nedeni ile bu yöntemin kullanımı küçük parçalar ile sınırlı kalmıştır. Ayrıca kullanılan takviye ve matris elemanlarının maliyetli oluşu fire maliyetini arttırmaktadır.

2.2.5 İnfüzyon yöntemi

Reçine transfer yönteminden farklı olarak burada tek kalıp kullanılır ve elyafın üzerine serilen vakum torbası ikinci kalıp görevi görür. Kompozit malzemelerin el değmeden üretilmesi hedeflenen infüzyon yönteminde vakum pompası, vakum tankı, kalıp ve reçine kovası kullanılan araçlardır. Bu yöntemde kullanılan vakum, poliester ve vinilester gibi matrislerin bünyesindeki kürlenmeyi hızlandıran kimyasalları kolayca çıkartabilmektedir. Bundan dolayı infüzyon yönteminde epoksi kullanımı daha yaygındır.

İnfüzyon yönteminde kullanılacak olan cam ya da karbon elyaf, istenilen kalınlığı sağlayacak şekilde tek taraflı kalıbın yüzeyine yerleştirilir. Bu elyafın üzerine genellikle keçeden bir tabaka matrisi dağıtması için kullanılır [17]. Özel olarak tasarlanmış vakum filmi ve sızdırmaz macunlar ile sızdırmaz bir yapı elde edilmiş olur. Sonrasında yapının belirli bölgelerinden vakum işlemi uygulanarak matrisin takviye elemanı üzerinde yayılması sağlanır.

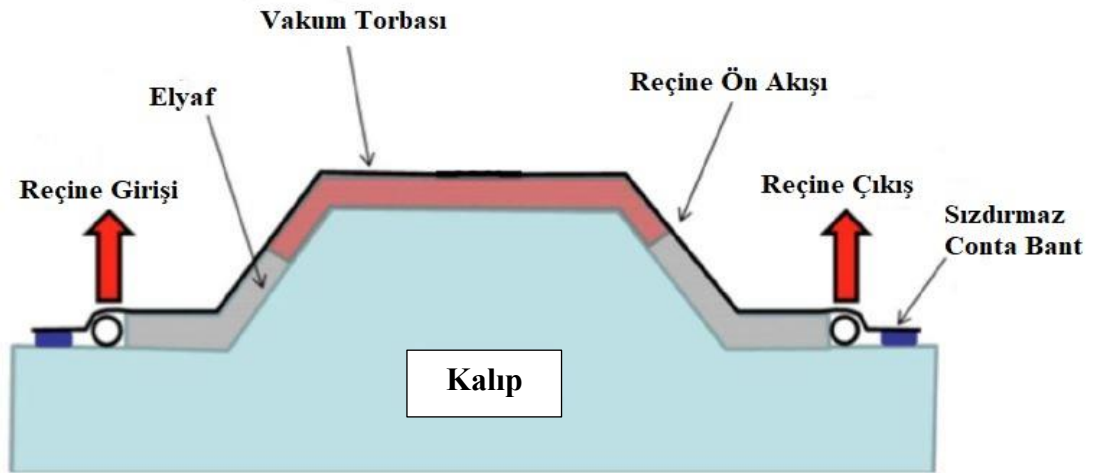
Bu yöntem ile üretilen kompozit malzemeler yüksek fiber oranına sahiptir ve hava boşlukları da diğer yöntemlere göre oldukça azdır. Vakum sayesinde matrisin takviye elemanına nüfuz etmesi kolaylaşır. Vakum ile yapıdaki fazla reçine de atılmış olur. Kompozit malzeme imalatı, vakum torbasının içinde kapalı bir ortamda olduğu için birtakım uçucu kimyasalların solunması da engellenmiş olur. Reçine transfer yönteminin aksine infüzyonla imalat yönteminde tek kalıp kullanılmaktadır ve kalıbın yüksek dayanım özelliklerinde olmasına gerek yoktur. Bu da kalıp maliyetlerini oldukça düşürmektedir. Bundan dolayı imalat maliyeti de reçine transfer yöntemine göre oldukça düşüktür.

50 metrelere kadar büyük boyutlu ve çok kompleks parçaların imalatına imkan veren infüzyon yönteminde reçine tamamıyla vakum etkisiyle ilerlediği için imalat süreci

oldukça uzundur. Vakum basıncının matrisin viskozitesine göre düşük kalması durumunda bazen matris, takviye elemanının her yerine nüfuz edemez ya da homojen bir akışta bulunamaz [17]. Bu durumun sonucu olarak infüzyon imalatında fire oranı yüksek olmaktadır. Bununla birlikte elyaf dokumaların hazırlanışı ve kalıp içerisine yerleştirilmesi de fazlaca el işçiliği gerektirmektedir ve değişen işçilik kalitesi nihai ürünün kalitesini etkilemektedir.

2.2.5.1 Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM)

Sürekli elyaf dokuma takviyeli kompozit malzemelerin imalatında oldukça yaygın olarak kullanılan “vakum destekli reçine transfer kalıplama” yönteminde, vakum torbası ile tamamıyla izole edilen kalıba uygun ölçülerdeki elyaf dizilip, ardından vakumun desteği ile matris malzemesi takviye elemanına nüfuz ettirilir. Kalıbın uygun bölge ya da bölgelerinden açılan reçine girişlerinden sisteme giren reçine, yine kalıbın uygun bölge veya bölgelerinden açılmış olan vakum çıkışı aracılığı ile takviye elemanını ıslatır. Vakum basıncının etkisiyle tamamen ıslatılan yapı, daha sonra uygun sertliğe gelene kadar kalıp içerisinde ön kürlenmesi için bekletilir. Belirli süre sonunda uygun mukavemete ulaşan parçalar, sonrasında yüksek sıcaklıktaki ortamlarda bekletilerek yapının kürlenmesi tamamlanmış olur.



Şekil 2.8 : VARTM imalat yöntemi. [16]

Şekil 2.8’de gösterilen VARTM yönteminde kullanılan vakumun başlıca iki görevi bulunmaktadır. Birincisi ve ana görevi, kalıbın giriş ve çıkışlarında basınç farkı yaratarak matrisin takviye elemanı içerisinde hareketini sağlamaktır. İkinci görevi ise, iç ortamın vakumlanması ile elyafı birbirine iyice kenetlemek ve daha yoğun elyaf yapısına sahip kompozit malzeme imalatı gerçekleştirmektir. Bu özelliği sayesinde

kompozit malzemelerin mukavemet/yoğunluk ve rijitlik/yoğunluk değerleri ve darbe dayanımı metal kompozitlere göre daha yüksektir [18]. Bunun yanında, elyafa uygulanan sıkıştırma basıncı maksimum 1 bar olacağı için, RTM imalat yöntemine kıyasla elyaf oranı çok daha düşük olacaktır.

Vakum destekli reçine kalıplama yönteminde ikinci bir kalıp olmadığı için kalıp maliyeti reçine transfer yöntemine göre daha düşüktür ve imalat anında erkek-dış kalıp uyumsuzluğu gibi bir problem ile karşılaşılmaz. İkinci kalıp yerine saydam vakum torbası kullanılarak takviye elemanındaki matris akışı gözlemlenebilmektedir.

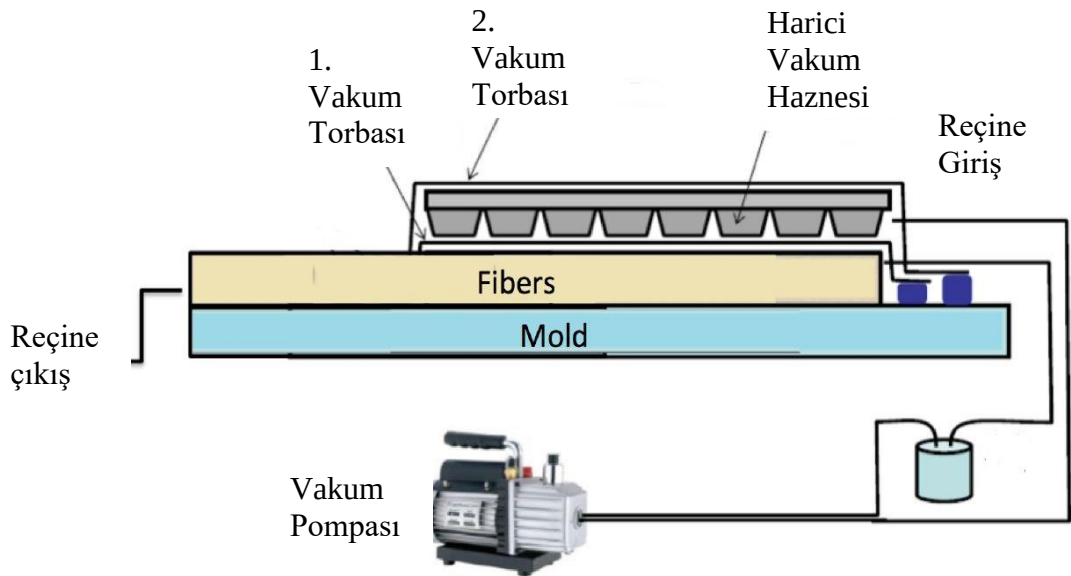
VARTM yönteminde reçine akışı sadece vakum ile sağlandığı için kalıp dolum süresi, pozitif basınç ile çalışan enjeksiyon makinalı imalat yöntemlerindeki kalıp dolum sürelerine göre oldukça fazladır. Bu durum VARTM yönteminin üretim verimliliğini oldukça düşürmektedir. [16] İmalat sürecinde sabit kalmayan reçine hız ve yoğunluğu, vakum basıncının ve matrisin viskozitesine göre değişiklik göstermektedir. Akış hızında ve reçine yoğunluğundaki bu değişim, yüzey pürüzlülüklerine ve yapı boyunca homojen olmayan kalınlıkta kompozit malzeme imalatına neden olmaktadır.

RTM yönteminin yüksek yatırım maliyetleri ve büyük boyutlu parçaların imalatına elverişli olmaması nedeni ile geliştirilen VARTM yönteminin sahip olduğu birçok avantajı nedeniyle otomotiv, gemi ve havacılık sektörlerinde ki kullanımı hızla artmaktadır. Öte yandan matrisin takviye elemanı üzerindeki dağılma hızının oldukça düşük olması, sahip olduğu avantajlara rağmen kullanımını kısıtlayan en önemli dezavantajıdır [18]. Matris hızı takviye elemanının malzeme özelliklerine ve dokuma biçimine, matris malzemesinin özelliklerine, uygulanan vakum basıncına ve açık hava basıncına bağlıdır. VARTM yönteminde takviye elemanı malzemesi, matris malzemesi ve elyafın dokuma biçimi üretici tarafından belirlenmektedir ve matris akış hızı bu parametreler ile değiştirilebilmektedir. Öte yandan açık hava basıncı tamamıyla dış etkidir ve üreticinin kontrolü dışında kalan bir parametredir. Vakum torbasına, elyafa ve reçine matrisine yukarıdan dik bir şekilde etki eden açık hava basıncı, matrisin elyafa daha iyi nüfuz etmesini sağlamaktadır. Öte yandan bu basınç reçinenin akışını oldukça yavaşlatmakta ve bu durum VARTM imalat yönteminin kullanımını kısıtlamaktadır.

2.2.5.2 Kontrollü hızlı kanallı reçine kalıplama (FASTRAC)

VARTM imalat tekniği temel alınarak geliştirilen “kontrollü hızlı kanallı reçine kalıplama” (FASTRAC) yöntemi, VARTM yönteminde matris akış hızına etki eden açık hava basıncının etkisini ortadan kaldırmak amacıyla tasarlanmış bir imalat tekniğidir. VARTM’den farklı olarak FASTRAC imalat tekniğinde iki adet vakum torbası ve harici bir vakum haznesi kullanılmaktadır.

FASTRAC imalat yönteminde elyaf üretilecek parçanın şekillerine göre kesilip ardından kalıba yatırılır ve birinci vakum torbası ile hava geçirilmeyecek şekilde kapatılır. Ardından matris akış hızının düşük olacağı bölgelere harici vakum haznesi konur ve bütün yapı ikinci bir vakum haznesi ile kapatılır. Birinci torbanın içine uygulanan hava basıncı, reçinenin elyaf üzerindeki akışına doğrudan etki ettiği için, ikinci torbaya ve dolayısıyla kanallı yapıya harici vakum haznesine uygulanan vakum basıncına göre daha yüksektir. Farklı değerlerde uygulanan vakum basınçları ile akış hızı artan reçine matrisi, takviye elemanını tamamen ıslattıktan sonra yapı kurlenmesi için belli bir süre bekletilir. Sıcak ortamda bekletilmesi kurlenmeyi hızlandıracağından, kompozit malzeme genellikle kalıptan çıkartılıp fırına konulmaktadır [19].



Şekil 2.9 : FASTRAC imalat yöntemi. [16]

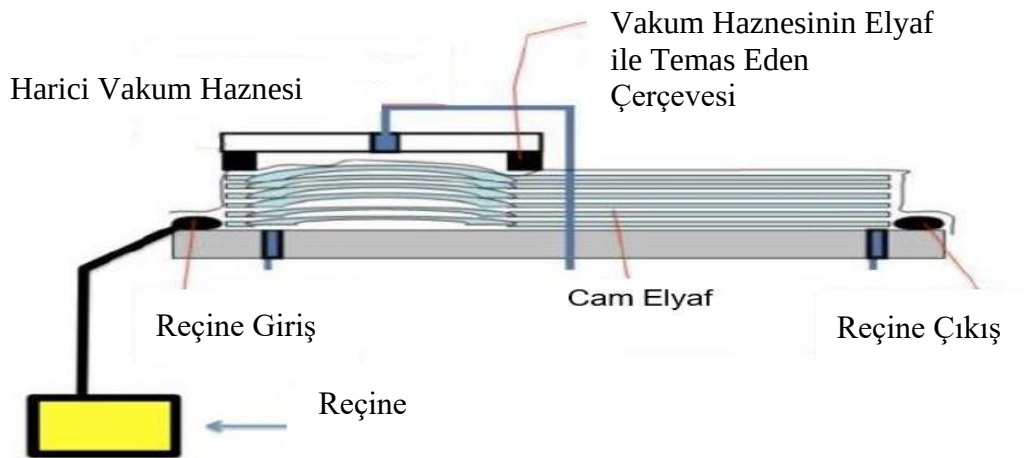
Şekil 2.9’da ayrıntılı gösterilen FASTRAC imalat tekniğinin en önemli avantajı, harici vakum haznesinin kanallı yapısı ve ikinci bir vakum torbası sayesinde matrise etki eden dış basıncın düşürülmesi ile matris akış hızının yüksek olmasıdır. Bu sayede

parça imalat süresi de oldukça kısalmaktadır. Matris akış hızının yüksek olması, FASTRAC imalat tekniğinde kullanılacak reçine matrisin daha yüksek vizkositeli veya daha kısa kürlenme süresine sahip olmasına imkan vermektedir [19]. FASTRAC yönteminde kullanılabilecek matris çeşitliliğinin fazla olması, bu yöntem ile üretilen kompozit malzemelerin de çeşitliliğini arttırmaktadır. Matris akışının yavaş kalacağı öngörülen bölgelere uygulanan harici vakum haznesi sayesinde daha homojen kalınlıkta kompozit ürünler elde etmek mümkündür.

Üretimde kullanılan kalıbın tasarımı, üretilmesi ve imalat hazırlık aşamaları oldukça uzundur. Ayrıca kalıbın elyaf üzerinde nereye ve ne şekilde konumlandırılacağı da belirsiz olabilmekte ve bu durum da yüksek firelere neden olmaktadır. FASTRAC imalat tekniğinin bir diğer dezavantajı ise üretim başladıktan sonra kalıba müdahale edilememesi ve bundan dolayı imalat kontrolünün zor olmasıdır.

2.2.5.3 Vakum destekli sıkılık azaltma (VIPR)

“Vakum destekli sıkılık azaltma” (VIPR) imalat yöntemi, VARTM yönteminde karşılaşılan düşük akış hızı ve matris dağılım homojenliğinin kötü olması gibi birtakım problemlere çözüm olmak amacıyla geliştirilmiştir. VARTM imalat yönteminden farklı olarak VIPR imalat yönteminde harici bir vakum haznesi kullanılmaktadır. Matrisin takviye elemanı üzerinde yavaşladığı bölgelere uygulanan vakum haznesi, takviye elemanın geçirgenliğini bölgesel olarak artırır ve matrisin akışını hızlandırır. Vakum torbasını takviye elemandan ayırmamak için uygulanması gereken maksimum basınç 20 kPa’dır. Vakum haznesine uygulanan bu vakum basıncı ile elyaf dokuma üzerinde matris akışını yavaşlatan atmosfer basıncı azaltılmış olmaktadır.



Şekil 2.10 : VIPR imalat yöntemi. [16]

Şekil 2.10'da gösterilen VIPR imalat yönteminin VARTM imalat yöntemine göre en büyük avantajı, parça dolum süresinin kısalması ile birlikte artan üretim oranıdır. Bunun sonucu olarak imalat maliyetleri de düşmektedir. Üretim hızındaki artış ve takviye elemanının geçirgenliğinin artmış olması, yüksek viskoziteli matrislerin kullanımına imkan vermektedir. FASTRAC imalat yönteminin aksine üretim anında uygulanan harici vakum haznesi, matrisin akışının yavaşladığı bölgelere uygulanarak VARTM ve FASTRAC yöntemlerine göre daha homojen parçalar üretilmesine olanak sağlar.

VARTM'e kıyasla sağladığı tüm avantajlara rağmen, sahip olduğu dezavantajlar yüzünden VIPR yönteminin kullanımı yaygınlaşmamıştır. Harici vakum haznesine uygulanan vakum basıncının 20 kPa'ın üzerine çıkarılamaması neticesinde vakum haznesi, reçine girişine uzak yerlerde fazla etkili olamamaktadır. Bu durum vakum haznesinin üretim anındaki kullanımını oldukça kısıtlamaktadır. VIPR imalat yönteminin üretim aşamaları kompleks kalıplar için uygun olmadığından, karmaşık biçimli parça imalatı için de elverişli değildir [20]. Vakum haznesinin üretim anında ne zaman ve hangi bölgelere uygulanacağı, uygulayanın tecrübesine bağlıdır.

Harici vakum haznesinin çalışma mantığı, hazne içerisinde yaratılan düşük basınçlı ortamı kullanarak takviye elemanı geçirgenliğini arttırmak, böylelikle matris akışını hızlandırmaktır. Bu sebepten ötürü harici vakum haznesinin uygulandığı bölgedeki reçine hızı, VARTM yöntemindeki reçine akış hızına göre oldukça fazladır. Fakat harici vakum haznesine uygulanan bu vakum basıncı, haznenin vakum torbası ve dolayısıyla elyaf üzerine dik bir şekilde uyguladığı kuvveti arttırmaktadır. Bu da matrisin vakum haznesi içerisine olan akış hızını oldukça azaltmaktadır.



3. VAKUM İNFÜZYON YÖNTEMLERİNİN DENEYSEL ÇALIŞMALARI

Deneysel çalışmalarda polimer matrisli kompozit malzeme imalatında kullanılan mevcut imalat tekniklerinin deneysel gözlemleriyle, tekniklerin homojen akışı sağlayamama, üretim süresinin uzun oluşu gibi problemlerine çözüm olan VIPR yöntemine ait alternatif çözümleri üzerinde durulmuştur.

3.1 VARTM İmalat Yönteminin Deneysel Çalışmaları

3.1.1 Malzeme kalıp özellikleri

VARTM yönteminin deneysel uygulamasında 500 gr/m² yüzeysel yoğunluk değerlerinde cam elyaf keçe kullanılmıştır. 40*40 cm² alanında olan kareden L şeklinde kesilip 8 kat şeklinde hazırlanan cam elyaf keçeler, pürüzsüz bir cam kalıbın üzerine yerleştirilmiştir.

Kalıba enjekte edilecek reçine, kullanım kolaylığından dolayı termoset yapılı mısır şurubudur. Akışı doğrudan etkileyen bir parametre olan viskozite değerini sabitlemek için, deneyde kullanılacak mısır şurubuna su katılarak viskozite değeri 200 mPa.s'ye sabitlenmiştir.

Mısır şurubunun cam elyaf keçeye ilk temasını homojenleştirmek için 70 cm uzunluğunda, reçine akışını hızlandıran ve gözenekli dağıtım kanallarına sahip spiral boru eklenmiştir. Cam kalıp üzerine reçine girişini ve vakum çıkışını sağlayacak 2 adet plastik boru yerleştirilmiştir.

Vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi imalat tekniğinin temelini oluşturan vakum basıncı ile akışı sağlayabilmek için, kurulan bu düzeneğin üzeri sızdırmaz conta kullanılarak vakum torbası ile kapatılmıştır. Deneye başlamadan önce sızdırmazlığı sağlanan sistem kontrol edilmiştir.

Analog ve dijital regülatörler kullanılarak, vakum torbası içerisine uygulanan ve reçine akışını sağlayan vakum basıncı 80 kPa'a sabitlenmiştir.

Vakum destekli reçine transfer kalıplama imalat yönteminin deneneceği deney düzeneğinde, kullanılan malzemelerin listesi çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : VARTM deneyi malzeme listesi.

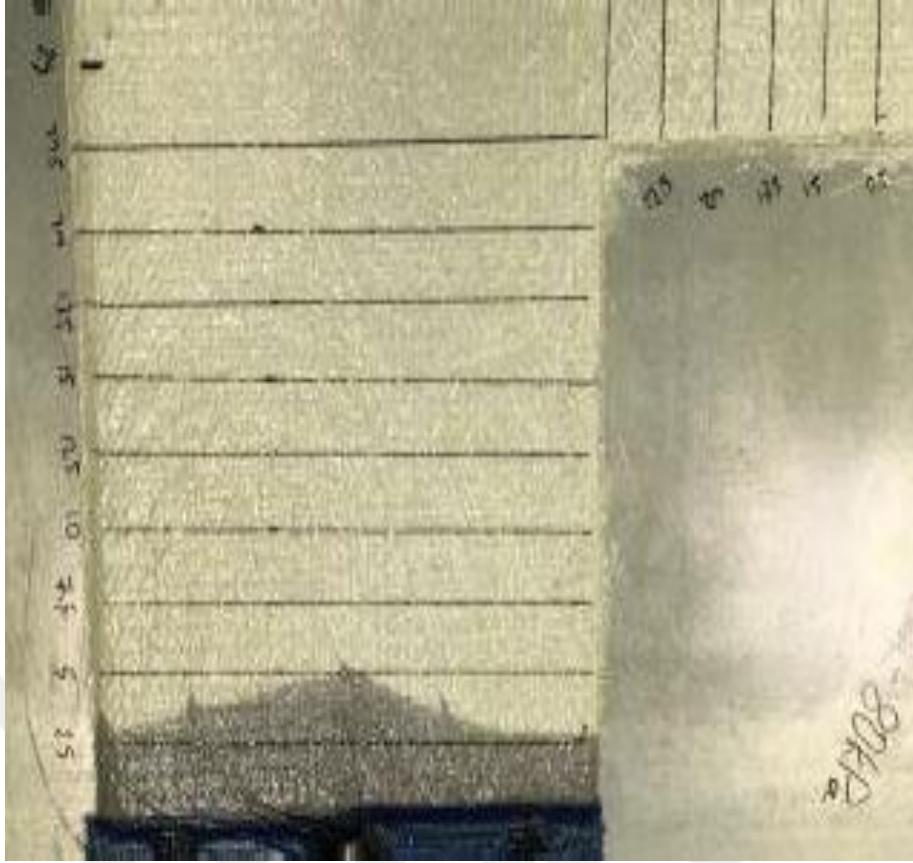
Malzeme	Miktar	Ölçüler	Özellikler
Keçe Elyaf	8 kat	(40 X 30) cm ²	Fibroteks (500 gr/m ²)
Plastik Boru	3 Adet	1.5 m (çap = 1 cm)	-----
Spiral Boru	1 Adet	70 cm (çap = 1 cm)	-----
Reçine	1 Adet	500 ml	Mısır Şurubu, 0.2 Pa.s
Vakum Torbası	1 Adet	-----	-----
Vakum Pompası	1 Adet	-----	-----
Conta Bant	1 Adet	-----	-----
Analog Regülatör	1 Adet	-----	-----
Dijital Regülatör	1 Adet	-----	-----
Düz Kalıp	1 Adet	90 cm X 30 cm	Akrilik

3.1.2 Deneyisel gözlem sonuçları

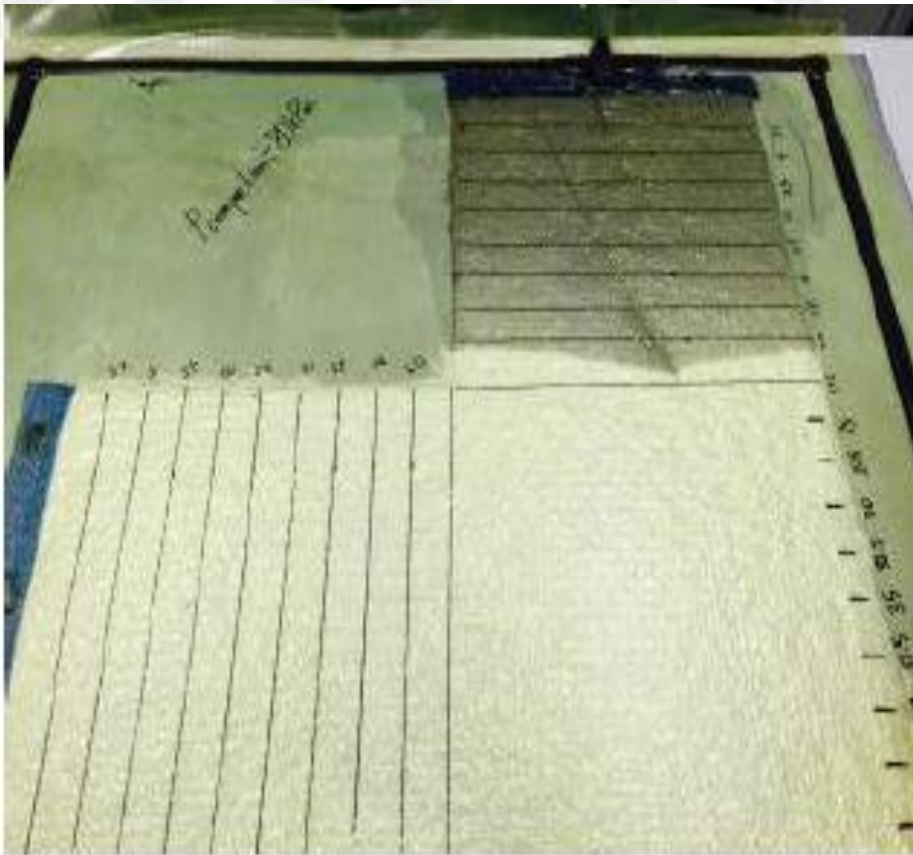
Şekil 3.1’de ki gibi hazırlanan VARTM deney düzeneğinde 80 kPa’lık vakum basıncının etkisi ile mısır şurubu, elyaf üzerinde 5 cm’lik ilerleyişini 15 saniyede, şekil 3.2’deki gibi tamamlamaktadır. Elyaf içerisinde akışına devam eden reçine, 20 cm’ye 660 sn’de ulaşmıştır (şekil 3.3) ve elyafı komple ıslatması ise 4860 sn’de gerçekleşmiştir (şekil 3.4).



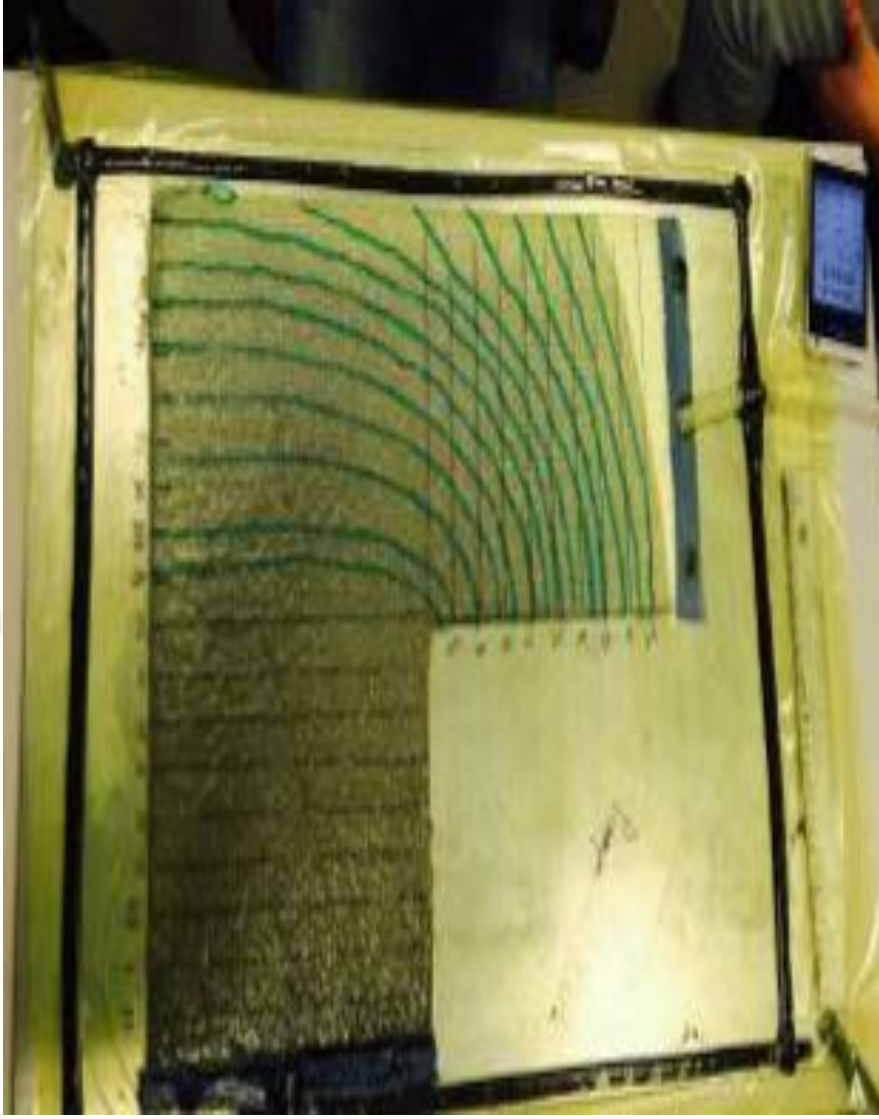
Şekil 3.1 : VARTM deney düzeneği.



Şekil 3.2 : x_{elyaf} : 50 mm, $t_{\text{akış}}$: 0,25 dk



Şekil 3.3 : x_{elyaf} : 200 mm, $t_{\text{akış}}$: 11 dk



Şekil 3.4 : Akış sonu, $t_{akış}$: 81 dk

3.1.3 Gözlemlenen sonuçların irdelenmesi

VARTM imalat yönteminin en önemli dezavantajlarından biri reçine akışının homojen bir şekilde elyaf içerisinde ilerlemiyor oluşudur. Reçinenin homojen olarak elyaf içerisine dağılamaması, üretilen parçalarının mukavemetini, darbe dayanımını, yalıtımını vb. özelliklerini etkileyeceğinden kullanışlı bir yöntem olmamaktadır.

Reçinenin cam elyaf keçeyle temas anındaki hızı yaklaşık 198 mm/dk iken, elyafın tamamıyla ıslatıldığı andaki reçine hızı 4,94 mm/dk hızına kadar düşebilmektedir. VARTM imalat yönteminin bu dezavantajından dolayı, yüksek üretim kapasiteleri ile üretim yapan firmalar için uygun bir yöntem olamamaktadır. VARTM hızının bu kadar düşmesinin başlıca nedeni atmosfer basıncı ile 80 kPa'lık vakum basıncı arasındaki fark seviyesidir.

3.2 FASTRAC İmalat Yönteminin Deneysel Çalışmaları

3.2.1 Malzeme ve kalıp özellikleri

VARTM imalat yöntemine benzer şekilde, FASTRAC imalat yönteminin deneysel uygulamasında da 500 gr/m² yüzeysel yoğunluk değerlerinde cam elyaf keçe kullanılmıştır. 40*40 cm² alanında kare şeklinde kesilip 8 kat şeklinde hazırlanan cam elyaf keçeler, pürüzsüz bir cam kalıbın üzerine yerleştirilmiştir. Deneyde kullanılan reçine termoset yapılı mısır şurubudur ve viskozitesi 200 mPa.s'ye sabitlenmiştir. Reçinenin akışa homojen bir dağılım ile başlamasını sağlamak için 70 cm uzunluğunda reçine akışını hızlandıran ve gözenekli dağıtım kanallarına sahip spiral boru eklenmiştir. Reçine transferini gerçekleştirmek ve vakum basıncını sağlayabilmek için 2 adet plastik boru düzeneğin başına ve sonuna yerleştirilmiştir. Kurulan düzenek sızdırmaz bant kullanılarak vakum torbası ile kapatılır. Vakum basıncı 80 kPa'a sabitlenmiştir. Çizelge 3.2'de, FASTRAC deney düzeneğinde kullanılan malzemelerin listesi verilmiştir.

FASTRAC imalat yöntemini, VARTM imalat yönteminden ayıran en önemli özellik ise, FASTRAC yönteminde ikinci bir vakumlu ortam içerisinde kullanılan vakum haznesidir. Vakum torbaları arasında oluşturulan farklı vakum basınçlarının etkisi ile, vakum haznesinin uygulandığı bölgedeki birinci vakum torbası ve elyaf üzerindeki basınç azalır. Böylelikle o bölgede elyaf içerisinde ilerleyen reçinenin akışı hızlanmış olur.

Çizelge 3.2 : FASTRAC deneyi malzeme listesi.

Malzeme	Miktar	Ölçüler	Özellikler
Keçe Elyaf	8 kat	(40 X 30) cm ²	Fibroteks (500 gr/m ²)
Plastik Boru	3 Adet	1.5 m (çap = 1 cm)	----
Spiral Boru	1 Adet	70 cm (çap = 1 cm)	----
Reçine	1 Adet	500 ml	Mısır Şurubu , 0.2 Pa.s
Vakum Torbası	2 Adet	----	----
Vakum Pompası	1 Adet	----	----
Vakum Haznesi	1 Adet	----	Akrilik
Conta Bant	1 Adet	----	----
Analog Regülatör	1 Adet	----	----
Dijital Regülatör	1 Adet	----	----
Düz Kalıp	1 Adet	90 cm X 30 cm	Akrilik

Flexiglass malzemeden üretilmiş olan vakum haznesi, içerisinde 20 kPa'lık vakum basıncı oluşturacak şekilde ikinci bir vakum torbası ile kapatılarak düzenekte elyafı örten vakum torbası üzerine harici olarak uygulanmıştır.

3.2.2 Deneysel gözlem sonuçları

Şekil 3.5'de ki gibi hazırlanan FASTRAC deney düzeneğinde, mısır şurubu 5 cm'lik akışını 9 saniyede tamamlamıştır (Şekil 3.6). Şekil 3.7'de gösterildiği gibi, mısır şurubu 20 cm'e 660 saniyede gelmiş olup, şekil 3.8'de gösterildiği gibi bütün elyafı ıslatması 2220 saniye sürmüştür.

Reçinenin cam elyaf keçeeye temas anında ki hızı yaklaşık 330 mm/dk iken elyafın tamamıyla ıslatıldığı anda ki reçine hızı 10,8 mm/dk hızına kadar düşebilmektedir. FASTRAC imalat yöntemi, VARTM imalat yöntemine kıyasla elyafı daha hızlı doldurmuş olmasına rağmen mevcut imalat süresi hala oldukça uzundur.



Şekil 3.5 : FASTRAC deney düzeneği



Şekil 3.6 : X_{elyaf} : 50 mm, $t_{akış}$: 0,15 dk



Şekil 3.7 : x_{elyaf} : 200 mm, $t_{\text{akış}}$: 11 dk



Şekil 3.8 : Akış sonu, $t_{\text{akış}}$: 37 dk

3.2.3 Gözlemlenen sonuçların irdelenmesi

Reçinenin cam elyaf keçeyle temas anında ki hızı yaklaşık 330 mm/dk iken elyafın tamamıyla ıslatıldığı anda ki reçine hızı 10,8 mm/dk hızına kadar düşebilmektedir. FASTRAC imalat yöntemi, VARTM imalat yöntemine kıyasla elyafı daha hızlı doldurmuş olmasına rağmen mevcut imalat süresi hala oldukça uzundur.

İkinci vakum ortamı vakum haznesi ile birlikte üretimden önce yerleştirilir. Böylelikle üretim anında herhangi bir müdahale de bulunulamaz. Bu durum ikinci vakum torbası ile kapatılan ve düzeneğe yukarıdan harici olarak uygulanan vakum haznesinin daha az etkili olacağı ya da hiç etkili olmayacağı bölgelere uygulanmasına olanak sağlar. Vakum haznesinin, reçine akış hızının yavaşlamasının istenildiği bölgelere uygulanması neticesinde üretilen kompozit parçalarda ekstra homojensizlikler oluşur. Uygulanışının pratik olmaması ve VARTM’de ki mevcut sorunlara yeteri kadar çözüm üretememesinden ötürü kullanımı oldukça sınırlıdır.

3.3 VIPR İmalat Yönteminin Deneysel Çalışmaları

3.3.1 Malzeme ve kalıplama

VARTM ve FASTRAC imalat yöntemlerine benzer şekilde hazırlanan VIPR deneysel düzeneğinde de 500 gr/m² yüzeysel yoğunluk değerlerinde cam elyaf keçe kullanılmıştır. 40*20 cm² alanında kare şeklinde kesilip 4 kat şeklinde hazırlanan cam elyaf keçeler, pürüzsüz bir cam kalıbın üzerine 2 adet olacak şekilde yerleştirilmiştir. Üretilen kompozit malzemenin matris elemanı, 200 mPa.s viskozite değerine sahip mısır şurubudur. Mısır şurubunun keçe elyaf dokumaya ilk temasını homojenleştiren 20 cm uzunluğunda gözenekli dağıtım kanallarına sahip spiral boru eklenmiştir. Reçine transferini gerçekleştirmek ve vakum basıncını sağlayabilmek için 2 adet plastik boru düzeneğin başına ve sonuna yerleştirilmiştir. Kurulan düzenek sızdırmaz bant kullanılarak vakum torbası ile kapatılmıştır. Vakum basıncı 80 kPa’a sabitlenmiştir. VIPR deney düzeneğinde kullanılan malzemeler çizelge 3.3’te gösterilmiştir.

Reçine akış hızını yavaşlatan ve düzeneğe dik bir şekilde etki eden 101 kPa’lık atmosfer basıncına VARTM yönteminde herhangi bir çözüm getirilemezken, FASTRAC yönteminde harici vakum ortamı ve vakum haznesi kompozit malzeme üretiminden önce sisteme monte edilmektedir.

Çizelge 3.3 : VIPR deneyi malzeme listesi.

Malzeme	Miktar	Ölçüler	Özellikler
Keçe Elyaf	4 kat	(40 X 20) cm ²	Fibroteks (500 gr/m ²)
Plastik Boru	3 Adet	1.5 m (çap = 1 cm)	-----
Spiral Boru	1 Adet	20 cm (çap = 1 cm)	-----
Reçine	1 Adet	500 ml	Mısır Şurubu, 0.2 Pa.s
Vakum Torbası	1 Adet	-----	-----
Vakum Pompası	1 Adet	-----	-----
Vakum Haznesi	1 Adet	-----	Akrilik
Conta Bant	1 Adet	-----	-----
Analog Regülatör	1 Adet	-----	-----
Dijital Regülatör	1 Adet	-----	-----
Düz Kalıp	1 Adet	90 cm X 30 cm	Akrilik

Tez çalışmasında uygulanan VIPR imalat yönteminde, VARTM yönteminde ki atmosfer basıncının olumsuz etkilerini azaltmak ve FASTRAC yönteminde ki uygulanabilirliğini kolaylaştırmak için harici olarak uygulanan vakum ortamı ortadan kaldırılarak, 20 kPa'lık vakum basıncı direk olarak harici vakum haznesine uygulanmıştır. Böylelikle akışı hızlandıran vakum haznesi, üretim esnasında reçinenin keçe elyaf içerisinde ki akışının yavaş kaldığı bölgelere harici olarak uygulanarak reçine akışını anlık kontrol edilebilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede üretilen kompozit parçaların imalat süresi oldukça düşük ve sağladığı homojenize akış sayesinde mekanik özellikleri oldukça iyi olması hedeflenmiştir.

Bilindiği üzere vakum haznesi içerisine uygulanan vakum basıncının etkisi ile elyaf geçirgenliği artırılıp reçine akışı rahatlatılırken, öte yandan vakum haznesinin elyaf ile temas ettiği yüzeyde sıkıştırma basıncı uygulamasına neden olmaktadır.

Deneylerde, atmosfer basıncı 101 kPa ve vakum torbası içerisine uygulanan vakum basıncı 80 kPa 'dır. Sıkıştırmayı yerel olarak azaltmak için en yüksek vakum basıncı olarak 20 kPa uygulanmıştır.

Şekil 3.9'da, VIPR ve VARTM imalat yöntemlerinin karşılaştırılmalı uygulamaları için hazırlanan deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : VIPR deney düzeneği.

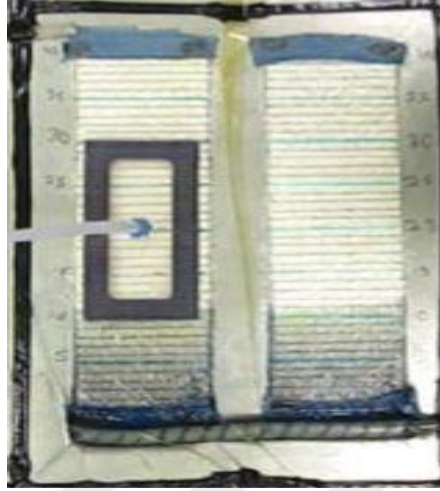
3.3.2 Deneysel gözlem sonuçları

Şekil 3.10'da görüldüğü üzere, akışa başlayan mısır şurubu, hem VIPR hem de VARTM imalat yöntemlerinin uygulandığı elyaf dokumalarda 5. santimetreye 16 saniyede gelmiştir.



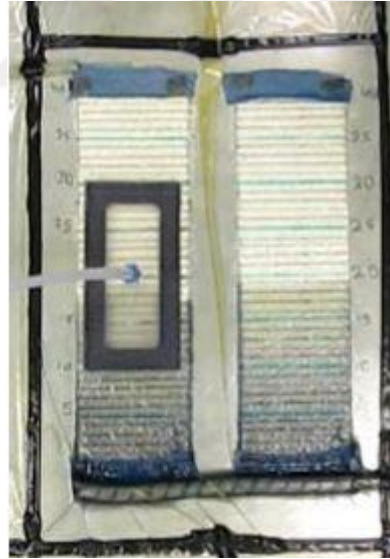
Şekil 3.10 : x_{VIPR} : 50 mm, x_{VARTM} : 50 mm, $t_{akış}$: 0,27 dk

Şekil 3.11’de ki gibi her iki imalat yönteminde de akışına devam eden mısır şurubu 13. santimetreye 117 saniyede eşit hızlarla gelmiş ve bu esnada VIPR vakum haznesi uygulanmıştır.



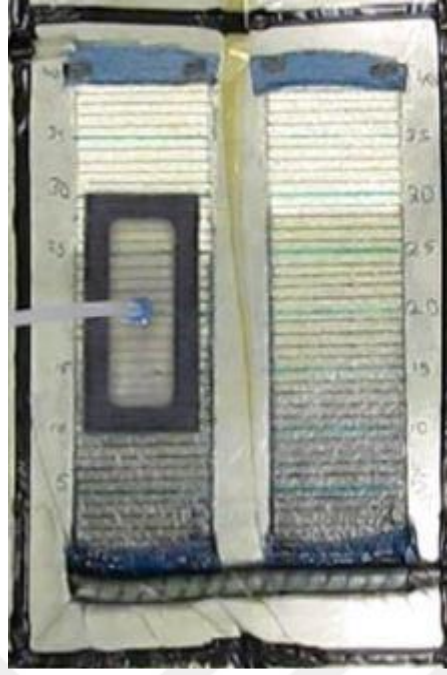
Şekil 3.11 : Vakum haznesi uygulanış anı,
XVIPR : 130 mm, XVARTM : 130 mm, $t_{akış}$: 2 dk

Şekil 3.12’de gösterildiği gibi VIPR vakum haznesi içerisinde ilerleyen reçine, 360. saniye sonunda VARTM’de akışına devam eden reçineye göre 20 mm öndedir.



Şekil 3.12 : Reçinenin vakum haznesi içerisinde ki ilerleyişi,
XVIPR : 210 mm, XVARTM : 190 mm, $t_{akış}$: 6 dk

Şekil 3.13’te gösterildiği gibi, 780 saniye sonunda VIPR yönteminde ilerleyen reçine VARTM yönteminde ilerleyen reçineye göre 30 önde bulunmaktadır. Deneyin 780. saniyesinde reçine VIPR vakum haznesinin sonuna ulaşmıştır. VIPR vakum haznesinde ilerleyen reçinenin, VARTM bölgesinde ilerleyen reçineye göre çok daha hızlı akış gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.13 : Reçinenin vakum haznesinin sonuna ulaştığı an,
 $X_{VIPR} : 300 \text{ mm}$, $X_{VARTM} : 270 \text{ mm}$, $t_{akiş} : 13 \text{ dk}$

Şekil 3.14'te de gösterildiği gibi, vakum haznesi kaldırıldığında, elyaf üzerinde artan sıkıştırma basıncı neticesinde VIPR yönteminde ilerleyen reçine 4 dakika boyunca sadece 10 mm ilerleyebilmiştir. Bu süre zarfında VARTM tarafında ilerleyen reçine 3 mm ilerleyerek VIPR'da ki reçine ile aynı hizaya gelmiştir.

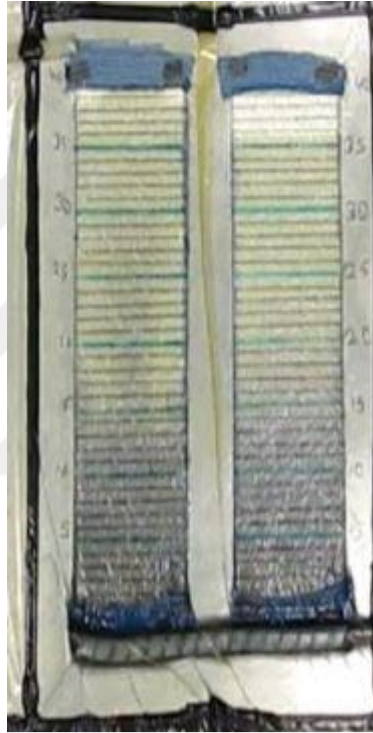


Şekil 3.14 : Vakum haznesinin kaldırıldığı an,
 $X_{VIPR} : 310 \text{ mm}$, $X_{VARTM} : 300 \text{ mm}$, $t_{akiş} : 17 \text{ dk}$

Şekil 3.14 ve 3.15’te de görüleceği üzere, 1020. saniyede aynı hizada olan reçinelerden VIPR yönteminde ilerleyen reçine 180 saniyede 90 mm yol alırken VARTM yönteminde ki reçine sadece 50 mm yol alabilmiştir.

3.3.3 Gözlemlenen sonuçların irdelenmesi

Vakum haznesi uygulaması kaldırılmasına rağmen VIPR’da ilerleyen reçinenin VARTM’deki reçineye göre 2 kat daha hızlı bir şekilde elyafı doldurmasının nedeni ise, vakum haznesi içerisinde biriken reçinenin, vakum haznesi kaldırılması ile ileri akışının rahatlaması olarak düşünülebilir.



Şekil 3.15 : Akış sonu,

$X_{VIPR} : 400 \text{ mm}$, $X_{VARTM} : 350 \text{ mm}$, $t_{akiş} : 20 \text{ dk}$

Bu kısımda karşılaştırılan her iki imalat yönteminde de reçineler, 80 kPa’lık vakum basıncı ile cam elyaf keçe içerisinde 600 mm/dk hızla hareketlerine başlamaktadır. Reçine, elyaf içerisinde 13. santimetreye geldiğinde vakum haznesi düzeneğin sol tarafında ki elyafa uygulanır. Bu esnada düzende ki iki ayrı elyaf dokumada da hareket eden reçinelerin hızları 48 mm/dk’dır. Vakum haznesi uygulaması ile birlikte atmosfer basıncı düşeceğinden ve elyaf geçirgenliği artacağından, hazne içerisinde ilerleyen reçine hızı, VARTM yönteminde ilerleyen reçineye göre 3 mm/dk daha hızlı hareket etmektedir. Harici vakum haznesinde ilerleyen reçinedeki hız düşüşü başlangıca göre %75 iken, VARTM imalat yönteminde ilerleyen reçinenin hız kaybı

%81'dir. VIPR imalat yönteminde hareket eden reçinenin hızının daha az düşmesinin başlıca nedeni, harici vakum haznesine uygulanan 20 kPa'lık vakum basıncı etkisi ile elyaf üzerine etki eden 101 kPa'lık atmosfer basıncının sıkıştırma etkisinin azalmasıdır.

Vakum haznesi çıkışında ise, vakum haznesinin elyaf ile temas ettiği bölgelerde oluşturduğu sıkıştırma basıncı neticesinde reçine akış hızı %80 düşmektedir. VARTM yönteminde böyle bir sıkıştırma basıncı etkisi olmadığı için reçine hızında ki düşüş giriş noktasına olan uzaklık ile doğru orantılı olacak şekilde % 33 düşmüştür.

Harici vakum haznesinin uygulandığı bölgede biriken reçine, yerel basınç uygulaması kaldırıldıktan sonra, yerel birikiminin etkisiyle hızını arttırmaktadır. VIPR yönteminde ilerleyen reçine hızı, vakum haznesi kaldırıldıktan sonra %1150 artarak 2,4 mm/dk'den 30 mm/dk'ya çıkmıştır. Bunun nedeni olarak sıkıştırma basıncının hazne içerisinde biriken reçinenin hareketine etkisinin ortadan kalkması gösterilebilir. VARTM yönteminde ilerleyen reçine hızı ise %200 artarak 18 mm/dk olmuştur. Her iki imalat yönteminin eş zamanlı deneysel uygulamasındaki reçine hızları, çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : VIPR reçine akış hızı - VARTM reçine akış hızı karşılaştırılması.

	Giriş	Hazneye Giriş	Hazne İçerisinde	Hazne İçerisinde	Hazneden Çıkış	Çıkış
VIPR	187 mm/dk	48 mm/dk	20 mm/dk	12 mm/dk	2,4 mm/dk	17 mm/dk
VARTM	187 mm/dk	48 mm/dk	14 mm/dk	9 mm/dk	6 mm/dk	9 mm/dk

VIPR imalat yönteminde kullanılan harici vakum haznesi, içerisine uygulanan vakum basıncı ile elyaf üzerinde ki atmosfer basıncının etkisini azaltarak elyafın yukarı yönlü açılmasını ve böylelikle reçine akışını hızlandırmayı hedeflemektedir. Bu durum reçine akışını hızlandırmış olsa da haznenin vakum torbası ile temas ettiği yüzeyde ki sıkıştırma basıncını da arttırmaktadır.

4. VIPR VAKUM HAZNESİNİ GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI

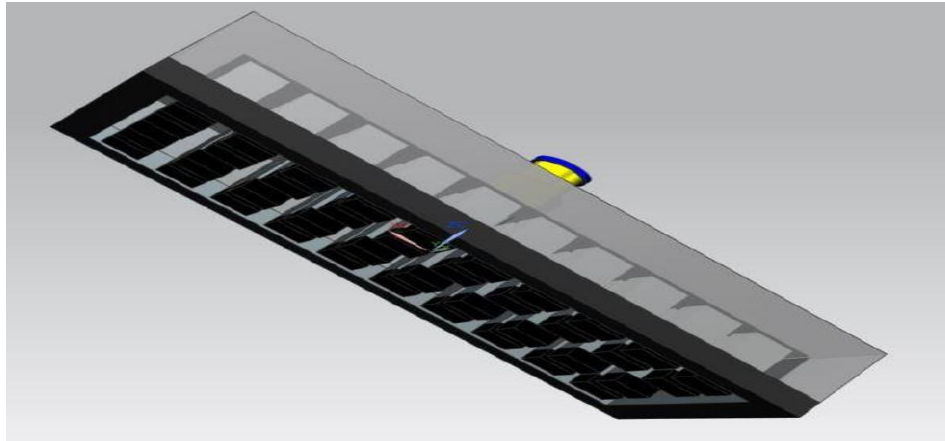
Elyaf üzerine uygulanan atmosfer basıncı neticesinde elyaf birbirlerine yaklaşır ve geçirgenlikleri azalır. Bu durumu iyileştirmek amacıyla uygulanan VIPR imalat yönteminde kullanılan harici vakum haznesi içerisine uygulanan vakumun artması ise, tez çalışmasında gerçekleştirilen ve bölüm 3'te sunulan deneysel çalışmalarla da teyid edildiği üzere, haznenin keçe elyaf ile temas ettiği alana uyguladığı sıkıştırma basıncını arttırmaktadır. O da, reçinenin vakum haznesine girerken bir direnç ile karşılaşmasına yol açmaktadır. Böylelikle reçine akış hızı, reçinenin vakum haznesine giriş ve çıkışlarında oldukça düşmektedir.

Tezin bu bölümünde, vakum haznesi kenarlarının-çerçevesinin elyaf üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla gerçekleştirilen tasarımlara ve deneysel çalışmalara yer verilmektedir.

4.1 Kalın Conta Uygulamalı Tasarım ve Denenmesi

VIPR imalat yönteminde kullanılan vakum haznesinin, vakum torbası ile temas ettiği yüzeyinde kullanılan conta, hem vakum torbasının delinmesini hem de oluşan sıkıştırma basıncının sönmelenmesini sağlayabilir. Bu amaçla gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan contanın kalınlığının artırılmasının sıkıştırma basıncına olan etkisi gözlemlenmiştir.

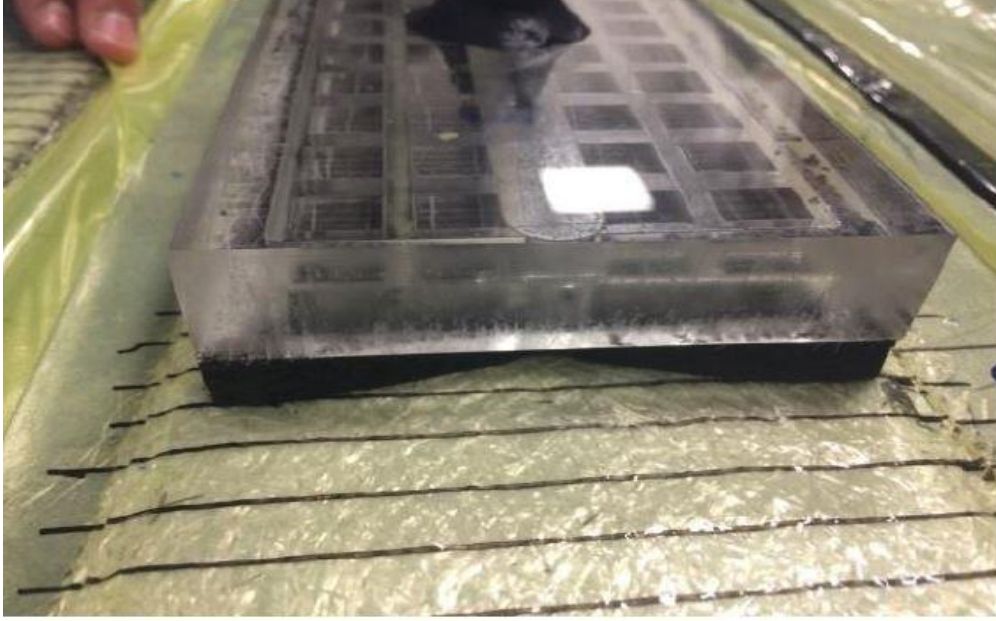
Şekil 4.1'de de görüldüğü gibi, kalın contalı vakum haznesinin orta kısmına, 1 cm² alana sahip 40 adet destek eklenmiştir.



Şekil 4.1 : Kalın contalı vakum haznesi.

Yukarıda ki tasarıma göre üretilmiş olan vakum haznesinin dış yüzeyindeki conta kalınlığı 10 mm, destek ayaklarının hepsinin contası 5 mm kalınlığındadır.

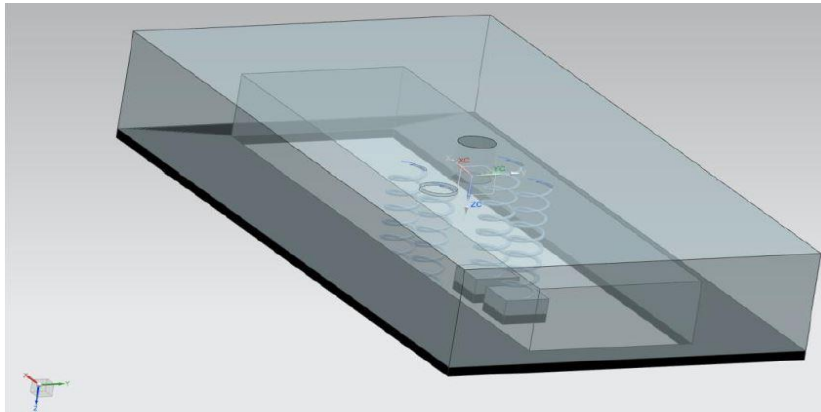
Şekil 4.2’de de gösterildiği gibi, yapılan deneysel çalışmada, hazne içerisine uygulanan vakum basıncı etkisi ile haznenin çerçevesinde bulunan kalın conta içeriye doğru deforme olduğu gözlemlenmiştir.



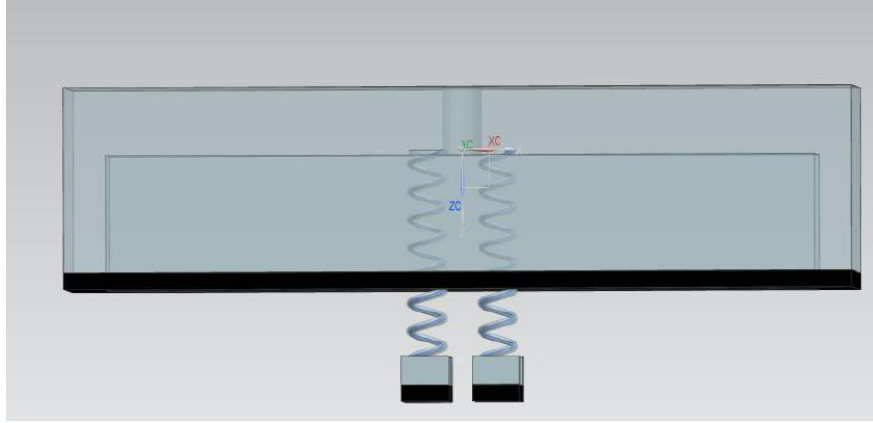
Şekil 4.2 : Kalın contalı vakum hanzesi uygulaması.

4.2 Yay Destekli Harici Vakum Haznesi Tasarımı ve Denenmesi

Vakum haznesinin vakum torbası ile temas ettiği alanda ki sıkıştırma basıncını azaltmak için şekil 4.3 ve 4.4’teki gibi tasarlanan yay destekli harici vakum haznesinde, haznenin iç kısmına yerleştirilen yayların, haznenin çerçevesinde oluşan sıkıştırma basıncını sönmülemesi, böylelikle reçine akışının hazneye giriş ve çıkış anında karşılaştığı direnç azaltılabilir.



Şekil 4.3 : Yay destekli vakum haznesinin x, y ve z düzlemlerindeki görüntüsü.



Şekil 4.4 : Yay destekli vakum haznesinin x ve y düzlemlerinde ki görüntüsü.

Tasarlanan vakum haznelerinin imalatında, çizelge 4.1’de özellikleri sunulan 3 farklı tipte yay kullanılmıştır.

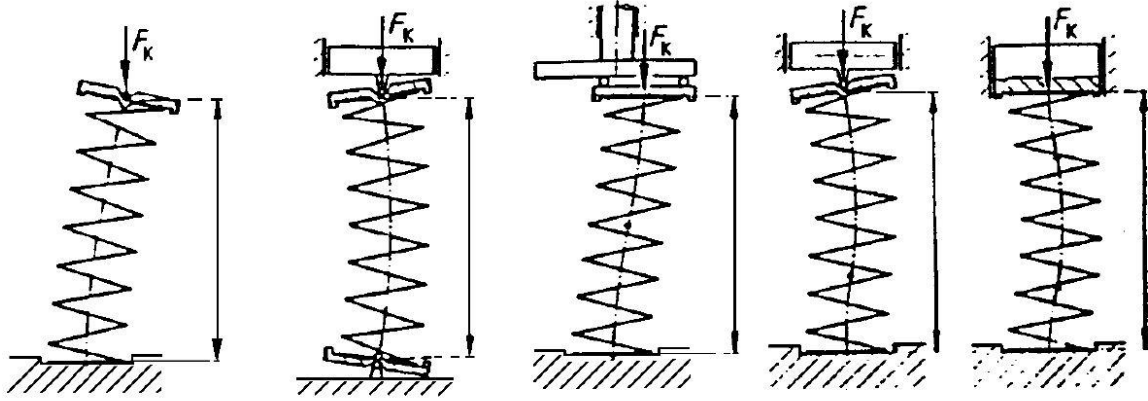
Çizelge 4.1 : Yay parametreleri.

Yay Parametreleri	1 Numaralı Yay	2 Numaralı Yay	3 Numaralı Yay
r_{tel} (mm)	1.2	1.5	2.6
r_{yay} (mm)	9.7	11.4	22
$L_{serbest}$ (mm)	38	31	35
$N_{aktif\ tel}$	7	7	2
k_{yay} (N/m)	3643	5785	15840

Yay destekli harici vakum haznesinde yayların desteği ile vakum haznesinin elyaf üzerine uyguladığı sıkıştırma basıncı azalmaktadır. Böylelikle reçinenin harici vakum haznesine girişinde ve çıkışında ki akış hızı, farklı vakum haznesi tasarımları ile gerçekleştirilen VIPR uygulamalarına göre daha fazladır. Bu sayede birim zamanda vakum haznesi içerisine girebilen reçine miktarı da arttırılmış olmaktadır. Vakum haznesine girişte ve çıkışta ki sıkıştırma basıncı kaynaklı reçine akış direncini azaltan yayların uygulama anında yarattığı en büyük dezavantaj ise, sıkıştırma basıncını sönmömlerken yayların kendilerinin elyaf üzerine yarattığı kuvvettir. Yayların elyaf ile temas ettiği bölgelerde elyafa dik olacak şekilde uyguladığı kuvvetin artması, keçe elyaf geçirgenliğini azaltmakta, bu durum ise reçine akış hızını düşürmektedir.

Yay destekli harici vakum haznesinin VIPR imalat yöntemindeki deneysel çalışmalarda karşılaşılan problem ise, vakum haznesine uygulanan vakum basıncının etkisi ile yaylarda görülen burkulma deformasyonudur. Vakum haznesine yerleştirilen yaylar üzerine etki eden kuvvetin yaylarda yarattığı deformasyon, sönmömlenen ve iletilen kuvvetlerin elyaf üzerindeki etki doğrultularını değiştirmektedir. Bu durum,

yay destekli harici vakum haznesinin sağladığı avantajları kısıtlamaktadır. Deformasyon sonucu yaylarda oluşan deformasyon şekil 4.5’te gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : Yayların burkulması durumu.

4.3 Çift Ayak Destekli Harici Vakum Haznesi Tasarımı ve Denenmesi

Yay destekli harici vakum haznesinin sağladığı avantajları kaybetmeden, yani sıkıştırma basıncını sönmölerken, sahip olduğu dezavantajları ortadan kaldıracılamak amacıyla çift ayak destekli harici vakum haznesi tasarlanmıştır. Çift ayak destekli vakum haznesinin iki ayrı bölmesine civata ile bağlanan ve yapıda yayların sönmöleme görevini gören destek ayaklarının elyaf ile temas eden yüzeylerinin her biri vakumlanan toplam yüzey alanının yarısı kadar seçilmiştir. Vakum haznesi iççerisine yerleştirilen destek ayakları, manuel olarak yukarı ve aşağı hareket ettirilerek reçinenin vakum haznesine giriş ve çıkışlarında ki reçine akış hızını ve miktarını kontrol altında tutulabilmektedir.



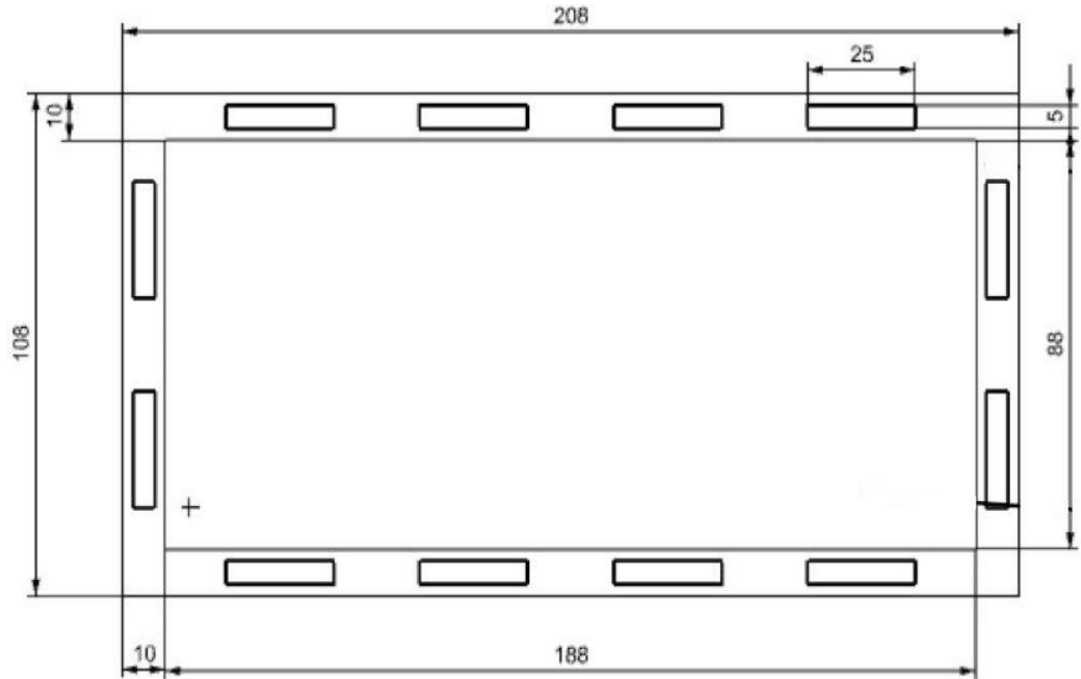
Şekil 4.6 : Çift ayak destekli harici vakum haznesi.

Mısır şurubunun, şekil 4.6’da tasarlanıp üretilmiş hali bulunan çift ayak destekli harici vakum haznesine girişı anında, 1 ve 2 nolu destek ayakları belirli konumlara

getirilerek, vakum haznesinin elyaf ile temas ettiği bölgelerde yarattığı sıkıştırma kuvveti azaltılmış ve reçineye çıkış bölgesine doğru itici kuvvet oluşturmaya neden olmuştur. Böylelikle vakum haznesi tarafından reçine akışına dik olarak uygulanan ve reçine akışını yavaşlatan sıkıştırma kuvveti azaltılmış olmaktadır. Reçine vakum haznesine girdiği anda ise 1 nolu destek ayağı yukarı kaldırılarak hazne içerisinde ilerlemeye çalışan reçinenin akışı hızlandırılmaktadır. 2 nolu destek ayağı, reçine 2. bölgeye gelene kadar aşağı pozisyonda bekletilerek vakum haznesinin elyaf üzerinde ki sıkıştırma basıncını sönmlemeye devam etmektedir. Reçine 2. bölgeye akışına başladığı anda ise önce 2 nolu destek ayağı yukarı kaldırılmış, sonra da 1 nolu destek ayağı aşağı indirilerek reçineye itici kuvvet oluşturmıştır. Reçine vakum haznesinden dışarı çıkmaya başladığı anda ise 2 nolu destek ayağı aşağı yönde hareket ettirilerek reçinenin hızlı bir şekilde vakum haznesinden çıkışı sağlanmaktadır.

4.3.1 Deneysel adımlar

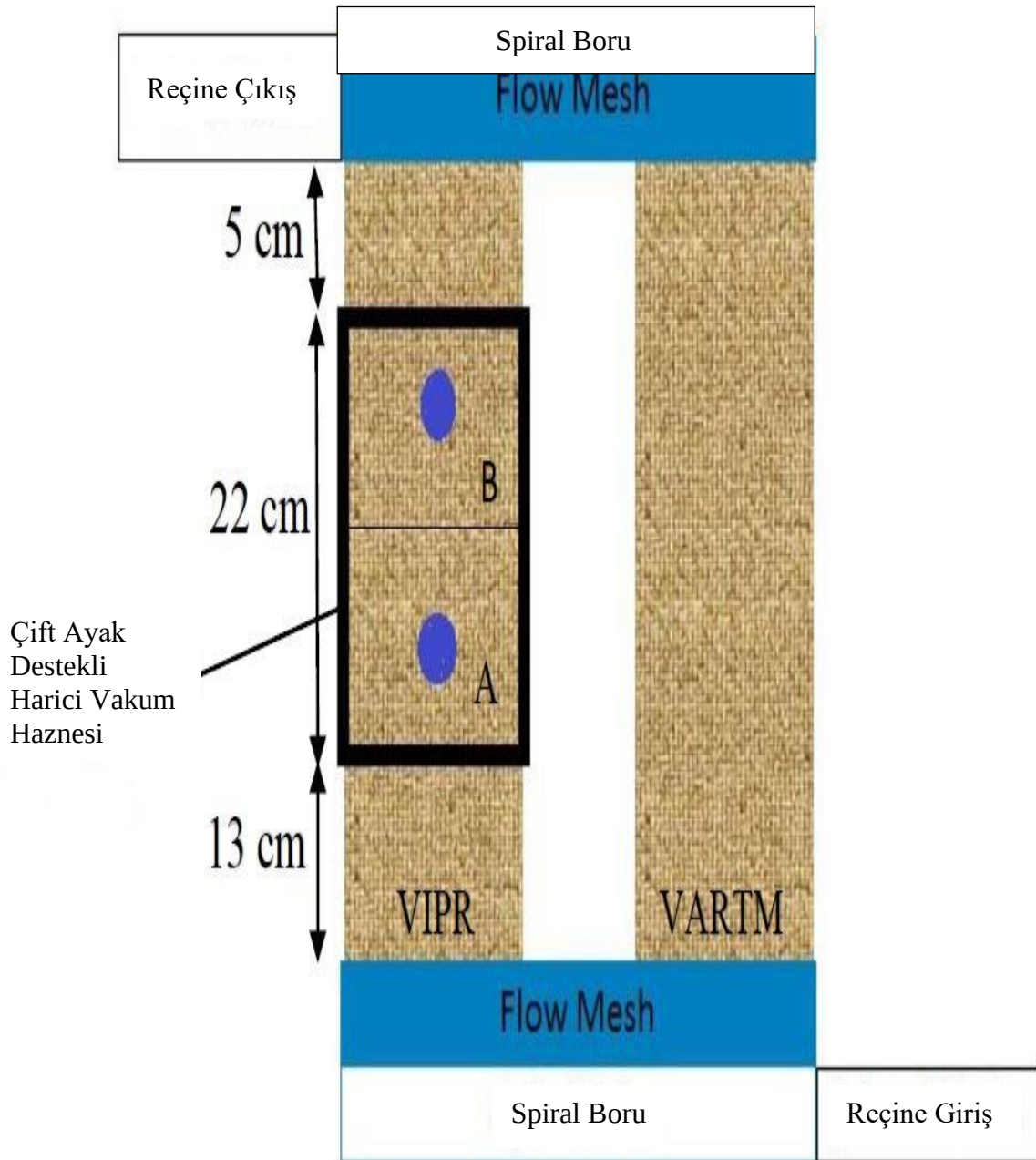
Şekil 4.7’de, tasarlanan vakum haznesinin CAD görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : Çift ayak destekli vakum haznesinin CAD görüntüsü.

Çift ayak destekli harici vakum haznesi uygulamasının yapılacağı VIPR deneysel düzeneğinde 500 gr/m^2 yüzeysel yoğunluk değerlerinde cam elyaf keçe kullanılmıştır. $40 \times 20 \text{ cm}^2$ alanında kare şeklinde kesilip 4 kat şeklinde hazırlanan cam elyaf keçeler, pürüzsüz bir cam kalıbın üzerine 2 adet olacak şekilde yerleştirilmiştir. Üretilecek

kompozit malzemenin matris elemanı, 200 mPa.s viskozite değerine sahip mısır şurubudur. Mısır şurubunun keçe elyaf dokumaya ilk temasını homojenleştiren 20 cm uzunluğunda gözenekli dağıtım kanallarına sahip spiral boru eklenmiştir. Reçine transferini gerçekleştirmek ve vakum basıncını sağlayabilmek için 2 adet plastik boru düzeneğin başına ve sonuna yerleştirilmiştir. Kurulan düzenek sızdırmaz bant kullanılarak vakum torbası ile kapatılır. Vakum basıncı 80 kPa'a sabitlenmiştir. Şekil 4.8'de deney düzeneğinin çizimi ve 4.9'da hazırlanan deney düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 4.8 : Deney düzeneği çizimi.



Şekil 4.9 : Deney Düzenegi.

Her iki yöntemin de eş zamanlı uygulandığı deneyde, şekil 4.10’da gösterildiği gibi reçineler 10. santimetreye 90 saniyede ulaşarak eşit hızlara sahip olmuşlardır.



Şekil 4.10 : $X_{VIPR} : 100 \text{ mm}$, $X_{VARTM} : 100 \text{ mm}$, $t_{akış} : 1,5 \text{ dk}$

Deneyin 142. saniyesinde her 2 reçine de 13. santimetreye eşit hızlarla ulaşmışlardır ve şekil 4.11’de gösterildiği gibi vakum haznesi uygulaması başlamıştır.

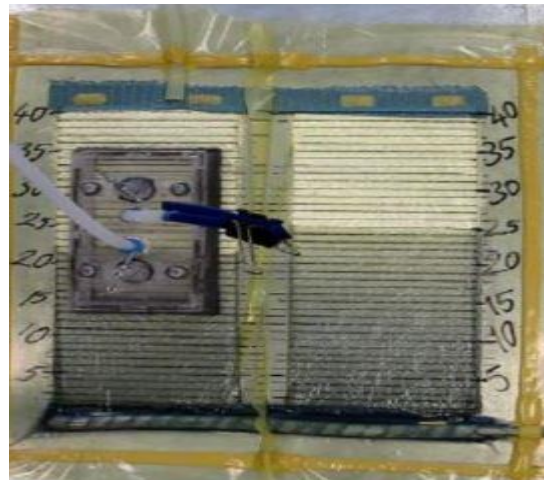


Şekil 4.11 : Vakum haznesinin uygulanış anı,
 $X_{VIPR} : 130 \text{ mm}$, $X_{VARTM} : 130 \text{ mm}$, $t_{akış} : 2,37 \text{ dk}$

Çift ayak destekli vakum haznesinin her iki ayağı da aynı anda 5 kere 360° çevrildiğinde, vakum haznesinin uyguladığı kuvveti tamamiyle sönmülediği ve vakum haznesi ile elyafın temasının kaybolduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.11’de gösterildiği gibi, deneysel çalışmanın 1. adımında reçine vakum haznesine giriş yapmaya çalışmaktadır. Reçinenin vakum haznesi içerisine akışını rahatlatmak amacıyla her 2 destek ayağı da aşağı yönde 4 tam tur çevrilmiştir.

Şekil 4.12’de gösterilen deneysel çalışmanın 2. adımında, reçine vakum haznesine giriş yapmıştır ve 1 nolu destek ayağının olduğu bölgede ilerlemeye çalışmaktadır. Reçinenin vakum haznesi içerisinde akışını rahatlatmak amacıyla 1 nolu destek ayağı yukarı kaldırılarak etkisi sıfırlanmıştır. 2 nolu destek ayağı ise sıkıştırma kuvvetini sönmülemeye devam etmektedir.



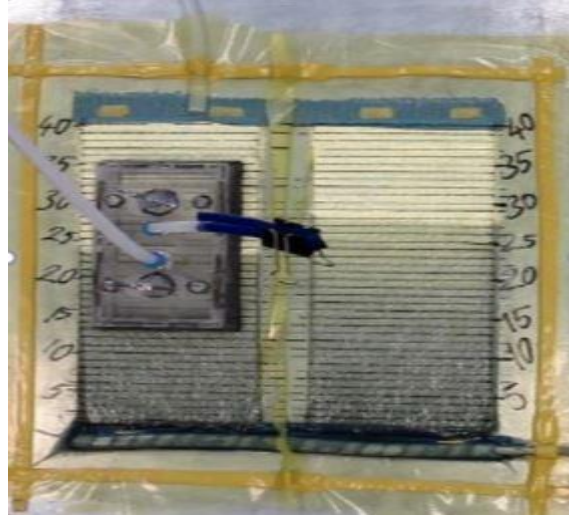
Şekil 4.12 : Reçinenin vakum haznesi içerisinde ilerleyişi,
 $X_{VIPR} : 220 \text{ mm}$, $X_{VARTM} : 250 \text{ mm}$, $t_{akış} : 8 \text{ dk}$

Şekil 4.13'te gösterilen deneysel çalışmanın 3. adımında reçine 1 nolu destek ayağının bulunduğu bölgeden 2 nolu destek ayağının olduğu bölgeye doğru akışına devam etmektedir. 2. bölgede ilerlemeye çalışan reçinenin akışını hızlandırmak adına 2 nolu destek ayağı yukarı kaldırılmıştır. Bu aşamada 1 nolu destek ayağı aşağı yönde 4 tam tur çevrilerek 1. bölgedeki reçineye yukarıdan itici kuvvet uygulamış ve reçinenin 2 nolu bölgeye doğru olan akışını hızlandırmıştır. İtiş sağlandıktan sonra, vakum haznesine 1 nolu bölgeden giriş yapan reçinenin akışını engellemek adına 1 nolu destek ayağı tekrar yukarı kaldırılmıştır.



Şekil 4.13 : Reçinenin vakum haznesi içerisinde ilerleyişi,
 $x_{VIPR} : 230 \text{ mm}$, $x_{VARTM} : 270 \text{ mm}$, $t_{akış} : 10 \text{ dk}$

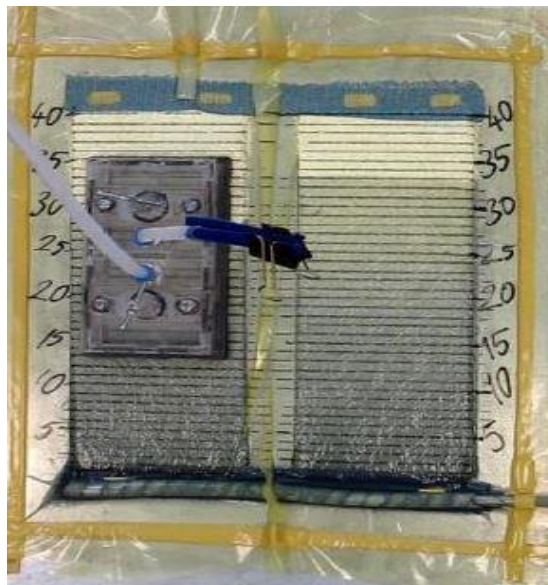
Uygulama sonunda her iki destek ayağı da yukarı pozisyonda bulunmaktadır. Çift ayak destekli vakum haznesinin şekil 4.13'teki 3. adımının uygulanması sonucunda, vakum haznesinin uygulandığı bölgede ki reçine hızlı bir şekilde 2 nolu bölgeye doğru ilerlemiştir. Şekil 4.14'te gösterildiği gibi yaklaşık 200 saniyede VIPR bölgesinde ilerleyen reçine 9 cm ilerlemişken, VARTM bölgesinde ilerleyen reçine sadece 10 mm ilerlemiştir.



Şekil 4.14 : Reçinenin vakum haznesi içerisinde ilerleyişi,
 $X_{VIPR} : 320 \text{ mm}$, $X_{VARTM} : 280 \text{ mm}$, $t_{akış} : 12 \text{ dk}$

Deneysel çalışmanın 4. adımında reçine 1 nolu destek ayağının bulunduğu bölgeden 2 nolu destek ayağının olduğu bölgeye doğru akışına devam etmektedir.

Deneysel çalışmanın 5. adımında, vakum haznesi içerisinde ilerlemeye çalışan reçine vakum haznesinin çıkış kısmına ulaşmıştır. Reçinenin vakum haznesinden çıkışını kolaylaştırmak adına her 2 destek ayakları da 4 tam tur çevrilerek aşağı yönde kuvvet oluşturulmuştur. Böylelikle vakum haznesinin elyaf üzerine uyguladığı kuvvet sönümlenmiş olup reçineye itici kuvvet oluşturulmuştur. Böylelikle reçinenin hazneden çıkışı kolaylaşmıştır. Çift ayak destekli harici vakum haznesinin deneysel uygulamasının bu aşamasında ki durumu şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15 : Reçinenin vakum haznesi sonuna ulaştığı an,
 $X_{VIPR} : 340 \text{ mm}$, $X_{VARTM} : 320 \text{ mm}$, $t_{akış} : 17 \text{ dk}$

Şekil 4.16’da gösterildiği gibi, çift ayak destekli vakum haznesinin yardımı ile VIPR bölgesinde ilerleyen reçine, VARTM bölgesinde ilerleyen reçineye göre daha hızlı ve homojen bir şekilde elyafı doldurmuştur.



Şekil 4.16 : Akış sonu,
XVIPR : 400 mm, XVARTM : 370 mm, $t_{akiş}$: 19 dk

Yapılan çalışmalar neticesinde, eş zamanlı ve farklı zamanlarda uygulanan destek ayaklarının hem vakum haznesinin elyaf üzerinde oluşturduğu sıkıştırma basıncını sönmülediği hem de reçine akışını hızlandırdığı gözlemlenmiştir.

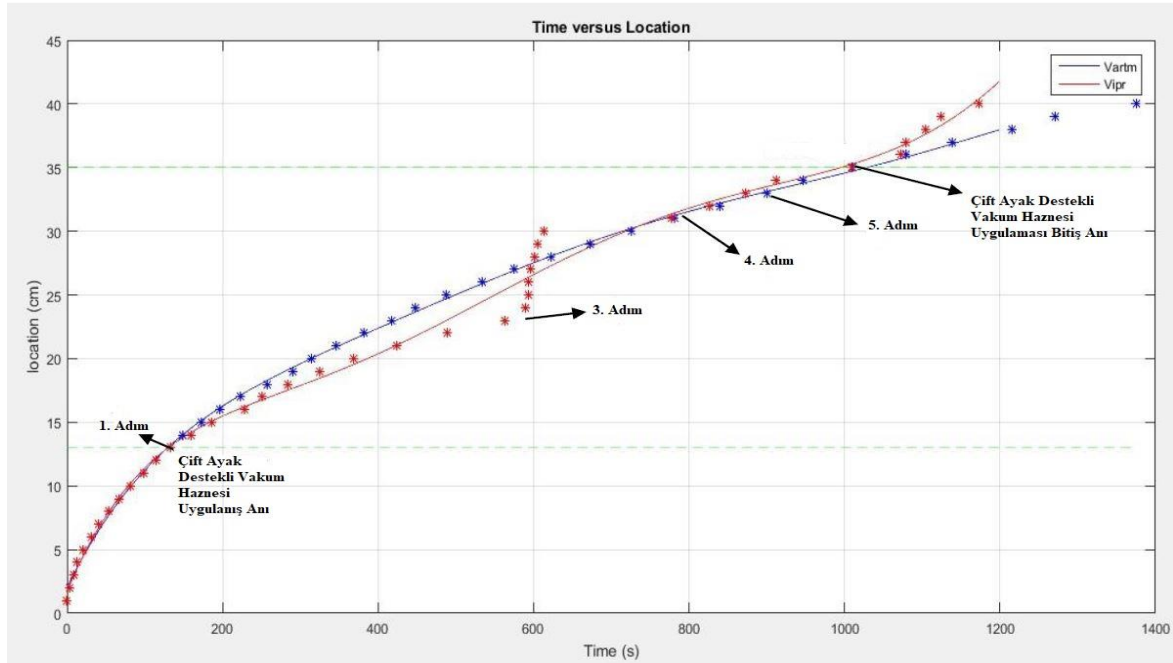
Çizelge 4.17’de, geleneksel VIPR vakum haznesi ile çift ayak destekli vakum haznesinin hızlarındaki yüzdesel değişimler karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Yüzdesel hız değişim karşılaştırılması.

Reçine Konum	Mevcut VIPR	Çift Ayak Destekli VIPR
Hazne Giriş	- % 62	- % 55
Hazne İçerisinde	- % 75	- % 68
Hazne İçerisinde (itici kuvvet oluşturulması)	-----	+ % 800
Hazne Çıkış	- % 80	- % 88
Çıkış	+ % 1150	+ % 650

4.3.2 Matlab analizi

Çift ayak destekli vakum haznesi uygulamasının şekil 4.17’deki matlab modelinde de görüldüğü gibi, hem VIPR imalat yönteminde hem de VARTM imalat yönteminde akış yapan reçine, haznenin uygulandığı noktaya gelene kadar aynı hızlarla hareket etmişlerdir. Haznenin uygulanışının bittiği noktada ise VIPR imalat yönteminin uygulandığı reçine hızı daha fazla olup elyafı daha kısa sürede doldurmuştur.



Şekil 4.17 : Akışın MATLAB modeli.

5. TEZ ÇALIŞMASINDA GELİŞTİRİLEN MEKANİZMALARLA İMAL EDİLEN KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

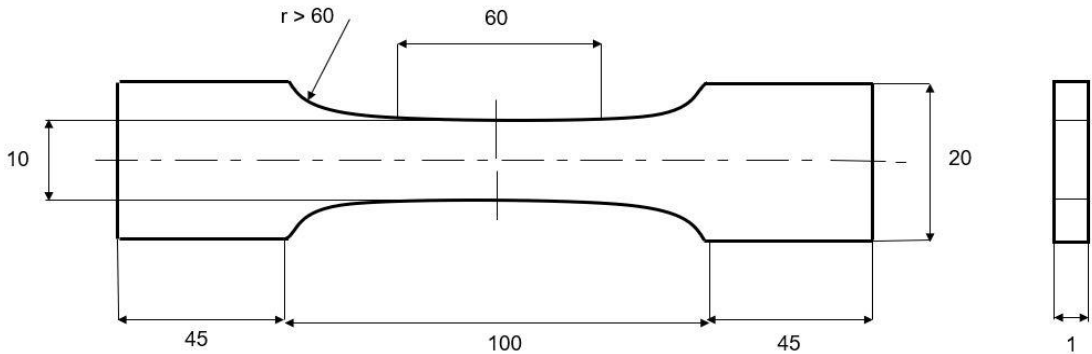
Tez çalışmasında kullanılan düzenklerle, VARTM, FASTRAC, VIPR ve VIPR imalat yönteminde kullanılmak üzere tasarlanan çift ayak destekli harici vakum haznesi uygulanarak imal edilen polyester matris/cam keçe kompozit parçalarda reçine akışı boyunca elde edilen mekanik özellikleri karşılaştırmak amacı ile çekme, 3 noktadan eğme ve darbe dayanım deneyleri yapılmıştır.

5.1 Çekme Deneyleri

VARTM, FASTRAC, geleneksel ve çift ayak destekli vakum haznesi uygulamalı VIPR imalat yöntemleri ile üretilen kompozit parçalar farklı bölgelerinden su jeti ile 10 eş parça olacak şekilde kesilmiştir. Kesilen parçaların görseli şekil 5.1’de, teknik çizimi ise 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Çekme deneyi için kesilen kompozit parça görseli.



Şekil 5.2 : ISO 527-4 Tip 1B çekme deneyi standardı için parça ölçüleri.

ISO 527-4 Tip 1B çekme deneyi standardına uygun olarak her dört imalat yönteminden kesilen ve kalınlıkları 1 mm olan toplam 40 parçaya, Zwick/Roell Z010 üniversal çekme makinesinde çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyinde, çekme hızı 2 mm/dk ve 1 mm/dk olacak şekilde ölçümler yapılmıştır. Yapılan çekme deneyinde kırılan kompozit parçalara ait bir fotoğraf şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3 : Çekme deneyi sonucu kırılan kompozit parça.

Çizelge 5.1 : Çekme deneyi ölçüm sonuçları.

ÇEKME DENEYİ SONUÇLARI				
Kompozit Parça Numarası	VARTM Deney Sonuçları (MPa)	FASTRAC Deney Sonuçları (MPa)	VIPR Deney Sonuçları (MPa)	Çift Ayak Destekli Vakum Haznesi Deney Sonuçları (MPa)
1(Giriş)	207	206	207	205
2	213	216	220	218
3	211	212	215	214
4	217	215	202	212
5	217	219	247	243
6	223	221	245	241
7	221	224	243	248
8	217	218	242	246
9	204	208	194	198
10(Çıkış)	202	205	195	196
Ortalama	213	214	221	222
Standart Sapma	7,1	6,5	21,5	20,5

VARTM, FASTRAC, geleneksel ve çift ayak destekli vakum haznesi uygulamalı VIPR imalat yöntemleri ile üretilen kompozit parçaların çizelge 5.1'de ki çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, VARTM ve FASTRAC yöntemlerinden elde edilen parçaların ortalama çekme mukavemetleri 213 MPa ve 214 MPa iken, geleneksel VIPR imalat yöntemi ile üretilen parçaların ortalama çekme mukavemeti 221 MPa,

Çift ayak destekli vakum haznesi uygulaması kullanılan VIPR imalat yönteminin ise 222 MPa gelmiştir. Ortalama ekme mukavemetinin sirasıyla en yüksek VIPR’da, sonra FASTRAC’te ve son olarak VARTM’de görülmesinin nedeni olarak, reçinenin homojen akışı ve vakum haznesi etkisi ile elyaf geçirgenliğinin arttırılarak elyaf içerisine daha fazla reçine dolması gösterilebilir.

5.2 Eğme Deneyleri

VARTM, FASTRAC, geleneksel ve çift ayak destekli vakum haznesi uygulamalı VIPR imalat yöntemleri ile üretilen kompozit parçalar farklı bölgelerinden su jeti ile 10 eş parça olacak şekilde kesilmiştir. Kesilen parçaların örnek bir fotoğrafı şekil 5.4’te, teknik çizimi ise 5.5’te gösterilmiştir.

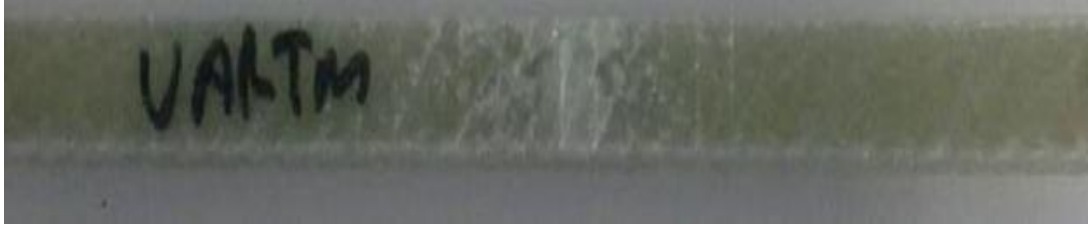


şekil 5.4 : Eğme deneyi için kesilen kompozit parça görseli.



şekil 5.5 : ASTM D 7264 eğme deneyi standardı için parça lleri.

ASTM D 7264 eğme deneyi standardına uygun olarak her dört imalat yönteminden kesilen ve kalınlıkları 1 mm olan toplam 40 parçaya, Zwick/Roell Z010 niversal eğme makinesinde eğme deneyi uygulanmıştır. Eğme deneyinde, eğme hızı 2 mm/dk ve 1 mm/dk olacak şekilde ölçümler yapılmıştır. Yapılan eğme deneyinde kırılan kompozit parçalara ait örnek bir fotoğraf şekil 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.6 : Eğme deneyi sonucu kırılan kompozit parça.

Çizelge 5.2 : Eğme deneyi ölçüm sonuçları.

EĞME DENEYİ SONUÇLARI				
Kompozit Parça Numarası	VARTM Deney Sonuçları (MPa)	FASTRAC Deney Sonuçları (MPa)	VIPR Deney Sonuçları (MPa)	Çift Ayak Destekli Vakum Haznesi Deney Sonuçları (MPa)
1(Giriş)	209	207	208	209
2	214	215	219	217
3	213	213	217	215
4	217	216	201	215
5	219	218	245	246
6	222	220	246	244
7	223	222	242	245
8	218	217	243	247
9	205	206	196	196
10(Çıkış)	204	205	192	195
Ortalama	214	214	221	224
Standart Sapma	6,7	6,0	21,5	20,8

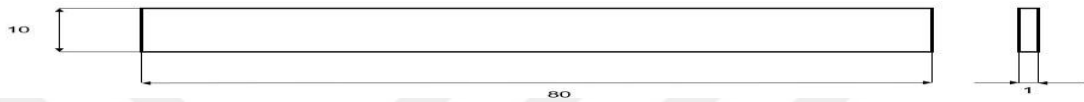
VARTM, FASTRAC ve VIPR imalat yöntemleri ile üretilen kompozit parçaların çizelge 5.2’de ki eğme deney sonuçları incelendiğinde, VARTM ve FASTRAC yöntemlerinden elde edilen parçaların ortalama eğme mukavemetleri 214 MPa iken, VIPR imalat yöntemi ile üretilen parçaların ortalama eğme mukavemeti 221 MPa, çift ayak destekli vakum haznesi uygulaması kullanılan VIPR imalat yönteminin ise 224 MPa gelmiştir. Ortalama eğme mukavemetinin sırasıyla en yüksek VIPR’da, sonra FASTRAC’te ve son olarak VARTM’de görülmesinin nedeni olarak, reçinenin homojen akışı ve vakum haznesi etkisi ile elyaf geçirgenliğinin arttırılarak elyaf içerisine daha fazla reçine dolması gösterilebilir.

5.3 Charpy Darbe Deneyleri

VARTM, FASTRAC, geleneksel ve çift ayak destekli vakum haznesi uygulamalı VIPR imalat yöntemleri ile üretilen kompozit parçalar farklı bölgelerinden su jeti ile 1 mm kalınlığında 10 eş parça olacak şekilde kesilmiştir. Kesilen parçaların görseli şekil 5.7’de, teknik resmi ise 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 : Charpy darbe deneyi için kesilen kompozit parça görseli.



Şekil 5.8 : ISO 179-1 charpy darbe deneyi standardı için parça ölçüleri.

Bunun neticesinde, çizelge 5.3’te ki darbe deney sonuçları incelendiğinde, darbe deney sonuçlarının en yüksek VIPR imalat yöntemi ile üretilen parçalarda olduğu görülmektedir. Standart sapmaların karşılaştırılması yapıldığında ise en yüksek değer FASTRAC yönteminde olduğu görülmektedir. Bunun da nedeni, FASTRAC yönteminde kullanılan ve proses süresince müdahale edilemeyen vakum haznesinin tek bir bölgeye etki etmesi olarak düşünülebilir.

Çizelge 5.3 : Charpy darbe deneyi ölçüm sonuçları.

DARBE DENEYİ SONUÇLARI				
Kompozit Parça Numarası	VARTM Deney Sonuçları (kJ/m ²)	FASTRAC Deney Sonuçları (kJ/m ²)	VIPR Deney Sonuçları (kJ/m ²)	Çift Ayak Destekli Vakum Haznesi Deney Sonuçları (kJ/m ²)
1(Giriş)	149	141	156	153
2	148	145	147	148
3	154	156	169	164
4	162	153	143	147
5	167	147	168	167
6	159	174	168	166
7	166	169	170	173
8	152	166	167	178
9	164	162	158	161
10(Çıkış)	168	171	170	168
Ortalama	159	158	160	163
Standard Sapma	7	11	9	9



6. SONUÇ

VARTM, FASTRAC ve VIPR gibi vakum destekli polimer matrisli kompozit malzeme imalat tekniklerinde karşılaşılan başlıca problemler olan reçinenin elyaf dokumayı hızlı dolduramaması ve reçine akışının homojen olmaması, vakum destekli polimer matrisli kompozit malzeme imalat yöntemlerinin endüstriyel kullanımına çok olanak vermemektedir.

Büyük boyutlu polimer matrisli kompozit malzeme parçalarının imalat sanayisinde yaygın olarak kullanılan VARTM imalat yönteminde, kalıbın dolma süresinin çok uzun oluşu, yüksek hurda oranı ve mekanik özelliklerinin düşük olması gibi sorunlar bulunmaktadır.

Bu problemlere çözüm amaçlı geliştirilen ve temelini VARTM imalat yönteminden olan FASTRAC imalat yönteminde ise kalıbın uzun dolum süresi kısaltılabilmektedir. Fakat FASTRAC yönteminde reçine akışını hızlandıran vakum haznesinin, reçine enjeksiyonu başlamasıyla hareket ettirilememesi ve hazne içerisine giriş yapan reçine miktarının kontrol edilememesi gibi sorunlar ortaya çıkmıştır. Bu durum, kompozit parçaların homojenliğini ve bölgesel olarak mekanik özelliklerinde farklılıkların oluşmasına neden olmaktadır.

FASTRAC imalat yöntemi temel alınarak geliştirilen VIPR imalat yönteminin en büyük avantajı ise, reçine enjeksiyonu esnasında vakum haznesinin hareket ettirilebilir olmasıdır. Bununla birlikte, VARTM imalat yönteminde elyaf üzerine etki eden 101 kPa'lık atmosfer basıncı, VIPR imalat yönteminde 80 kPa'a düşürülerek elyaf geçirgenliği arttırılmıştır. Böylelikle reçinenin yavaş kaldığı bölgelere uygulanan vakum haznesi reçinenin akışını hızlandırmakta ve elyaf üzerinde homojen yayılmasını sağlamaktadır. Bu avantajlarına rağmen, VIPR imalat yönteminde kullanılan ve reçine akışını hızlandıran vakum haznesinin yarattığı en büyük sorun, vakum haznesine uygulanan vakumun artması ile birlikte vakum haznesi ayağının elyaf dokuma üzerine uyguladığı sıkıştırma kuvvetinin artmasıdır. Bu kuvvet neticesinde, elyaf dokuma içerisinde ilerleyen reçinenin vakum haznesine girişi ve çıkışı zorlaşmaktadır.

Bu çalışmada, vakum haznesi ayağının elyaf dokuma üzerine uyguladığı sıkıştırma basıncını azaltarak reçinenin vakum haznesi içerisine ilerleyişini kolaylaştırmak amaçlanmıştır. Bu amaç ile geliştirilen ilk tasarımda, vakum haznesinin sıkıştırma kuvvetinin etki ettiği dış çerçeve bölgesindeki conta'nın kalınlığı arttırılmış ve kullanılan kalın conta ile daha fazla sıkıştırma kuvvetinin sönümlenmesi amaçlanmıştır. Fakat bu tasarımda, vakum haznesine uygulanan vakum basıncının etkisi ile conta stabil kalamamış ve işlevselliğini yitirmiştir.

İkinci tasarım olan yay destekli vakum haznesinde ise, haznenin sıkıştırma basıncının yaylar tarafından sönümlenmesi ve böylelikle reçine akışına olumsuz etki eden sıkıştırma basıncının azaltılması amaçlanmıştır. Fakat yine, vakum haznesine uygulanan vakum sonucu yaylar burkulmuş ve işlevselliğini yitirdiği gözlemlenmiştir. Üçüncü tasarım olarak geliştirilen çift ayak destekli vakum haznesinde ise, vakum haznesi iki eşit parçaya ayrılmış ve yaratılan bu iki eş bölgeye yerleştirilen destek ayaklarının, sıkıştırma basıncını sönümlemesi ve reçineye itici güç verilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç ile tasarlanıp üretilen vakum haznesi aracılığıyla, haznede bulunan destek ayakları sayesinde vakum haznesinde, reçinenin akış profiline göre haznede bulunan destek ayakları sayesinde reçine hızının ve miktarının kontrol edilebildiği gözlemlenmiştir.

Geleneksel VIPR imalat yöntemi uygulanan deneylerde, vakum haznesinin elyaf üzerine uyguladığı sıkıştırma basıncı, çift ayaklı vakum haznesi uygulamalı VIPR imalat yönteminde düşürülmüştür. Böylelikle reçinenin hazne giriş ve çıkışlarında karşılaştığı kuvvet azaltılmış ve reçinenin hazne içerisine girişi ve çıkışı kolaylaştırılmıştır. Tez çalışmasında geliştirilen tasarımın sağladığı bu avantaj neticesinde çift ayaklı vakum haznesi uygulamasıyla gerçekleştirilen VIPR imalat yönteminin, geleneksel VIPR yöntemine göre %5, VARTM yöntemine göre %16 daha hızlı reçine dolumu gerçekleştirebildiği belirlenmiştir.

Çift ayak destekli vakum haznesinin üretim hızını arttırmanın yanısıra sağladığı bir diğer avantaj ise, bu imalat yöntemi ile üretilen kompozit parçaların ortalama çekme, eğme ve darbe mukavemetlerinin artmış olmasıdır. Vakum haznesi uygulamasının yapıldığı bölgelerden kesilen numunelerin mekanik deneylerinin sonuçları her dört imalat yöntemi için de benzerdir. Vakum haznesine giriş ve çıkışındaki, vakum haznesi ayakları tarafından sıkıştırma kuvveti uygulanan bölgelerden kesilen numuneler çizelge 5.1, 5.2 ve 5.3'te verilen 4. ve 9. sırada olanlardır. Geleneksel VIPR ve çift ayak destekli VIPR uygulamalarında, 4. ve 9. test numunelerinin çekme, eğme

ve darbe mukavemetleri VARTM ve FASTRAC uygulamalarına göre daha düşük olmuştur. Bu durum vakum haznesinin uyguladığı sıkıştırma kuvvetinin, bu bölgedeki reçine yoğunluğunu azaltması beklentisiyle uyumludur.

Öte yandan, çift ayak destekli vakum haznesi uygulamasının gerçekleştiği deneydeki mekanik özellikler geleneksel VIPR yöntemine göre daha yüksek olmuştur.

Vakum haznesi uygulandığı bölgelerden kesilen numuneler çizelge 5.1, 5.2 ve 5.3'te 5., 6., 7. ve 8. sıralı olarak verilmektedir. Bu numunelerin mekanik özelliklerinin, VARTM ve FASTRAC imalat yöntemlerine göre daha yüksek dayanımlı olmasının nedeni, elyaf üzerine uygulanan basıncın VIPR imalat yöntemlerinde azaltılmış olmasının mekanik özellikler üzerinde yararlı olduğu göstermektedir.

Çift ayak destekli VIPR uygulamasına ait çizelge 5.1, 5.2 ve 5.3'teki 5. ve 6. parçaların mekanik özellikleri ise, geleneksel VIPR imalat yöntemine göre daha düşük kamıştır. Bunun nedeni, çift ayak destekli VIPR uygulamasında 1. ayağın reçineye itici kuvvet oluşturması ve böylelikle bu bölgelerde ki reçine miktarını 7. ve 8. deney numunelerinin olduğu bölgeye taşınması olarak değerlendirilmektedir. Dolayısıyla 7. ve 8. bölgelerden alınan deney numunelerinin çift ayak destekli VIPR imalat yönteminde, geleneksel VIPR imalat yöntemine göre daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir.

VIPR imalat yönteminde kullanılmak üzere tasarlanmış olan çift ayak desteki harici vakum haznesinin işlevselliğini arttırmak adına, destek ayaklarının boyutlarının etkisi ve mevcut kontrolü manuel olarak yapılan çift ayaklı vakum haznesinin otomasyonu gelecekte araştırılabilecek proje konuları olacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] **Liao, K., Schultheisx, C.R. & Hunston, D.L.** (1999). *Effects of Environmental Aging on the Properties of Pultruded GFRP*. Composites: Part B, 30, 485-493.
- [2] **Benin, M., Retnam, J. & Dhas, R.** (2015). *Comparative Study of Tensile Properties on Thermoplastic & Thermosetting Polymer Composites*. (s.10109-10113).
- [3] **Naidu, P.N.V., Reddy, R.G. & Kumar, A.M.** (2011). Thermal Conductivity of Sisal/Glass Fibre Reinforced Hybrid Composites. *International Journal of Fiber and Textile Research*. (s.28-30).
- [4] **Kim, J.K., & Mai, Y.W.** (1998). *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*, Elsevier Press (1. bs.). (s.14).
- [5] **Ahmed, S.K., Vijayarangan, S. & Naidu, B.C.A.** (2007). Elastic Properties, Notched Strength and Fracture Criterion in Untreated Woven Jute–Glass ,Fabric Reinforced Polyester Hybrid Composites. *Materials & Design*. (s.2287-2294).
- [6] **Atuanya, C., Olaitan, S., Azeez, T., Akagu, C., Onukwuli, O. & Menkiti, M.** (2013). *Effect of rice husk filler on mechanical properties of polyethylene matrix composite*.
- [7] **Wonderly, C., Grenestedt, J., Fernlund, G. & Cepas, E.** (2005). *Comparison of Mechanical Properties of Glass Fiber/Vinyl Ester and Carbon Fiber/Vinyl Ester Composites*. Composites: Part B, xx:1-10
- [8] **Totiger, P., Gothe, M., Nagavi, S. & Mulimani, R.** (2015). *Comparative study of mechanical and thermal characterization of glass/carbon hybrid composite*. (s.300-307)
- [9] **Zhang, K., Gu, Y. & Zhang, Z.** (2014) Effect of rapid curing process on the properties of carbon fiber/epoxy composite fabricated using vacuum assisted resin infusion molding. *Materials & Design*. (s.634-663).
- [10] **Puglia, D., Biagiotti, J. & Kenny, M.** (2004). *A Review on Natural Fibre-Based Composites*. (s.23-65)
- [11] **Walsh, P.J.** (2001). *Carbon fibers*. ASM Handbook. (s.35-40).
- [12] **Allende, M., Mohan, R. V. & Walsh, S. M.** (2004). Experimental and Numerical Analysis of Flow Behavior in the FASTRAC Liquid Composite Manufacturing Process, *Polymer Composites*, (s.384-396).
- [13] **Advani, S. G. & Sozer, M.** (2010). *Process Modelling in Composite Manufacturing* (2. bs.). Florida: CRC Press, Taylor and Francis Group.
- [14] **Beckwith, S.W.** (1998). *Resin Transfer Molding: a Decade of Technology Advances*. (s.7-19)

- [15] **Manalo, A.C., Aravinthan, T., Karunasena, W. & Islam, M.M.** (2010). Flexural behaviour of structural fibre composite sandwich beams in flatwise and edgewise positions, *Composite Structure*. (s.984-995).
- [16] **Sanjay, M. & Yogesha, B.** (2016). *Studies on Mechanical Properties of jute/E-glass Fiber Reinforced Epoxy Hybrid Composites*. (s. 15-25)
- [17] **Cohen, D., Mantell, S.C. & Zhao, L.** (2001). The Effect of Fiber Volume Fraction on Filament Wound Composite Pressure Vessel Strength. *Composites*. (s.413-429)
- [18] **Walsh, P.J.** (2001). *Custom Sailing and Yacht Design, Vacuum Infusion*. ASM Handbook. (s.1185-1221)
- [19] **Sozer E.M. & Advani S.G.** (2012). *Resin Transfer Molding (RTM) in Polymer Matrix Composites, Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites*. (s.245-309).
- [20] **Sozer, M., Hancioğlu, M. & Yenilmez, B.** (2015). *VARTM, FASTRAC ve VIPR elyaf takviyeli kompozit malzeme imalat yöntemlerindeki sorunların belirlenip yeni bir teknoloji geliştirilmesi ve iyileştirilmiş melez yöntem kontrolü*. Koç Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İstanbul

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Batuhan Özdemir
Doğum Tarihi ve Yeri : 18.12.1992 / Eskişehir
E-posta : baozdemir26@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Koç Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2017, Arçelik Üretim Fabrikası, Poliüretan ve Vakum İzolasyon Panel Üretim Sorumlusu
- 2019, BASF Türk Kimya, Poliüretan Teknik Geliştirme Uzmanı