



Vakum Torbalamada Basınç Değişkeninin Karbon Elyaf Matrisli Epoksi Yapılarda Estetik ve Mekanik Özelliklere Etkisi

Haluk DİNKÇİ¹

¹ Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa, TURKEY, ORCID ID 0000-0001-7130-1941

Corresponding Author: Haluk DİNKÇİ, haluk.dinkci@tofas.com.tr

Özet

Literatürde, vakum torbalama yönteminde basınç değerinin etkileri konusunda yeterince çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada epoksi matrisli kompozit parça üretiminde kullanılan vakum torbalama yöntemindeki vakum basınç değişkeninin kozmetik ve mekanik etkileri incelenmiştir. Çalışmada vakum torbalama sistemi, kullanılan malzemeler ve uygulanan yöntem açıklanmaktadır. Yöntemde deney düzeneği, reçine ve kumaş sabit olarak tutulmuştur. Basınç değişkeninin üretilen kompozit parçanın üzerindeki kozmetik ve mekanik etkileri çeşitli fiziksel testlerle analiz edilmiştir.

Article Info

Research Article
Received: 17/04/2020
Accepted: 16/06/2020

Anahtar Kelimeler

Epoksi, karbon elyaf kumaş, twil örgü, vakum torbalama, vakum battaniyesi

Öne Çıkanlar

Mekanik ve görsel değerlendirmeler.

Visual and Mechanical Properties Effect of Vacuum Bag Pressure Variable on Epoxy Structures with Carbon Fiber Matrix

Abstract

In the literature, there are not enough studies on the effects of pressure value in vacuum bagging method. In this study, the cosmetic and mechanical effects of the vacuum pressure variable in the vacuum bagging method used in the production of epoxy matrix composite parts were investigated. In the study, the vacuum bagging system, the materials used and the method applied are explained. In the method, experimental setup, resin and fabric were kept constant. The cosmetic and mechanical effects of the pressure variable on the composite part produced were analyzed by physical tests.

Keywords

Epoxy, carbon fiber fabric, twill weave

Highlights

Mechanical and visual evaluations

1. Giriş

TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar & Ge Ürün geliştirme fazında fiziksel doğrulama testleri için karbon elyaf epoksi malzemeden üretilen ve adı Compotest olan komple gövde, çok düşük geometrik tolerans ile üretilmektedir. Bu ürün için üretilen her detay parçanın da kalınlıkları ve geometrisi, birleşim sonrasında oluşan genel geometri için önemlidir. Üretim için kullanılan malzeme, yöntem ve yöntemdeki parametrelerin bir kısmının belirlenmesi için bu çalışma yapılmıştır. Kompozit malzemeler genel olarak matris ve takviye olmak üzere iki malzemeden oluşmaktadır. Kompozit malzeme yapısındaki matris elemanı, kompozit bünyesindeki gerilimlerin bir kısmını karşılayarak taşımaya yardımcı olmakta ve takviye elemanında meydana gelen çatlama ve kopmaları tolere ederek kompozitin tokluğunu artırmaktadır. Takviye malzemesi kompozitin mekanik dayanıklılığında sorumludur ve dayanıklılığı artırıcı etkisi çoğu kez kompozit içerisindeki hacmi %10'unu geçtiğinde gözlenmeye başlar (Korkmaz, 2014). Tek taraflı kalıplarda kompozit parçanın bir tarafının istenilen seviyede elde edilebilmesi için baskı oluşturabilecek bir kuvvet gereklidir. Takviye kumaşın reçine ile ıslanması sonrasında kalıbın tüm yüzeylerine oturarak tam kopyalama oluşturması beklenir. Bu da laminasyon üzerine yapılacak baskı kuvveti ile gerçekleştirilebilir. Kompozit yapı üzerine uygulanacak baskı kuvveti ise çeşitli yöntemler ile elde edilebilir, bunlardan birisi de vakum torbalama sistemidir. Bu sistemdeki baskı kuvveti negatif vakum basıncı ile elde edilir. Bu çalışma, vakum torbalama metodu ile üretilen kompozit parçalarda dış yüzeyin estetik sonuçlarına etki eden en uygun basınç değerini belirlemek ve basıncın değiştirildiğinde parçada nasıl bir mekanik sonuçlar elde edilebildiğini analiz etmek için yapılmıştır. Çalışmada, basınç değişkenliğinin mekanik etkisi de inceleneceği için reçine, karbon elyaf ve diğer tüm vakum torbalama sarf malzemeleri sabit tutulmuş, farklı basınç değerleri ile üretilen fiziksel numuneler test edilmiştir. Çalışmada ayrıca estetik analiz için vakum torbalama yöntemi ile üretilen karbon elyaf takviyeli epoksi parçaların, yüzeyinde oluşan boşluk değerleri analiz edilmiştir. Baskı amaçlı uygulanan negatif basıncın pozitif kalıp etkisi ve bu etkinin kuvvetine bağlı olarak üretilen parça üzerindeki mekanik etkileri 0,600mm-Hg, 0,800mm-Hg, 1,000mm-Hg negatif atmosfer basınçlarında analiz edilmiştir.

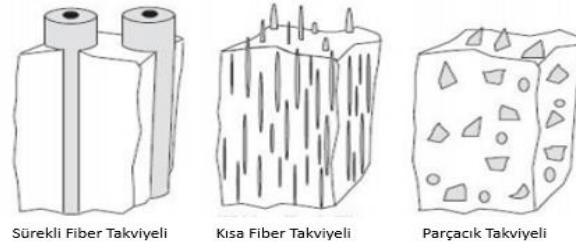
Literatürde kompozit parça üretimine yönelik yöntemlerin çeşitli yönleri ile araştırıldığı çalışmalar vardır. Bu çalışmalarda kompozit parça üretiminde vakum torbalamanın basınç etkisinin kompozit yapı içinde hava kabarcıklarının neden olduğu boşlukları en aza indirilmekte ve bu sayede çatlak oluşma kaynaklarının yok edilerek, yapının mukavemeti önemli ölçüde arttığı bildirilmiştir (Turgut ve ark., 2007). Boşlukların kompozit yapı içinde etkileri mekanik ve görsel olarak karşımıza çıkmaktadır. Abdurrohman ve arkadaşlarının (2018) yapmış oldukları çalışmada vakum torbalama prosesi ile üretilen kompozit yapıda da boşluklar ile karşılaşıldığı bu boşlukların da mekanik olarak yapıya etki ettiği vurgulanmıştır. Yıldızhan, (2008) çalışmasında, boşluk olan bölgelerde matris ile elyafın bir arada olmadığı, elyafın tam anlamıyla matris tarafından ıslatılmadığı sem görüntüleri ile anlatmıştır. Hanh, (1978) yapmış olduğu çalışmada kompozit malzemede birçok yorulma modu olduğunu: örneğin matriste çatlak oluşması, elyafların kopması, elyaf ve matris arasında bağın kopması, malzeme içindeki boşlukların büyümesi ve tabakalar arası bağların kopmasından bahsetmektedir. Erden ve arkadaşları, (2009) çalışmalarında, fiber ve matrisler 3 boyutlu bir düzlem oluşturuyor ise, oluşan parçanın mekanik özelliği fiber ve matrisin arasındaki bağa bağlıdır. Bu bağ, fiber-matris arasındaki yüzeyde pürüzlülük oluşturarak birbirine tutunmasını sağladığından bahsetmektedir. Bu bağda oluşan en ufak bir değişiklik mekanik özellikleri

etkiler. Yapılan çalışmalarda kompozit yapı içindeki reçine elyaf bağının önemi, etkileri belirtilirken bu bağın tüm kompozit yapı içinde homojen olması önemli bir konudur, homojenliği de artırmak için etkili unsurların kullanılması gerekliliği görülmektedir. Bu unsurların en önemlilerinin başında vakum ile bir basınç etkisi yaratmak ve bunu torbalama sistemi ile de disiplin altına almaktır. Makro ölçüde heterojen karakterli bir yapıya sahip olan kompozit malzemelerin içyapıları incelendiğinde yapı bileşenlerinin seçilip ayırt edilmesi mümkündür. Yapı bileşenlerinin farklı karakteristik özellikleri kompozit malzemenin yapısında bütünleşir. Bu nedenle kompozitin sahip olduğu özelliklerin tümünü tek bir yapı bileşeninde görmek mümkün değildir (Şahin, 2000) Yapıyı oluşturan tüm malzemelerin karakteristik özellikleri de yapının mekaniğine etki etmektedir. Kompozit parça üretiminde prosesin doğru uygulanması, ortam sıcaklığı, toz, nem, reçinenin karışım oranları, karıştırma süresi, uygulama hızı, vb birçok etken kompozit parçanın performansına etki eder. Vakum torbalama yönteminde ayrıca basınç faktörü vardır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Kompozit

En az iki malzemenin karıştırılarak elde edilen yeni malzemeye kompozit denir. Oluşan kompozit malzeme tersine dönüşüm ile eski hallerine getirilemez. Kompozit malzemeler alaşım değildir. (Anonim, Kompozit Malzemeler). Fiziksel olarak kompozitlerin sınıflandırılması Şekil 1. 'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kompozitlerin fiziksel birleşimleri (Anonim, Kompozit Malzemeler)

Sürekli fiber takviyeli kompozitler; Sürekli fiber takviyeli kompozit malzeme içerisinde çok yönlü olarak takviye edebilmek için çoklu fiberler halinde veya kumaş halinde kalıp içerisine yerleştirilebilir. Fiberlerin kompozit malzeme içerisinde belli doğrultularda yerleştirebilmeleri büyük avantaj sağlar (Bayraktar, 2016).

Kısa fiber takviyeli kompozitler; Kısa fiber olarak adlandırılan fiberler yaklaşık 1-5 µm çapında ve 0,5-6 mm uzunluğunda üretilirler. Kompozit malzeme içerisindeki kısa fiberlerin verimi sürekli fiberlere oranla düşüktür. (Bayraktar, 2016).

Kompozit malzemelerin avantajları

- Yüksek mukavemet, hafiflik, tasarım esnekliği ve boyutsal sabitlik
- Yüksek elektrik yalıtımı, korozyon dayanımı ve yanmazlık
- Kalıplama kolaylığı, geniş yüzey uygulamaları ve tamir edilebilme
- Fiberlerin kuvvet yönüne göre yerleştirilebilmesi
- Kırılma tokluğu, titreşim ve darbe dayanımı, yorulma dayanımı ve aşınma direnci, düşük ve kontrol edilebilir termal genleşme, ısı direnci ve ısı iletkenliği

Kompozit malzemelerin dezavantajları

- Kompozit malzemelerin üretimi zor ve maliyetleri nedeniyle pahalıdır ve Kompozit malzemeler geri dönüşü olmayan malzemelerdir.
- Kompozit malzeme kalitesi üretim yöntemlerine bağlıdır, standartlaştırılmış bir kalite yoktur.
- Özellikle lamine edilmiş kompozitlerin özellikleri kalınlık yönünde düşük dayanıklılık ve katlar arası düşük kesme dayanıklılık özelliği olmak üzere yöne ve kalınlığa bağlı olarak değişebilmektedir.
- Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri, malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkiler.
- Çekme, basma, kesme operasyonları uygulanan aynı kompozit numunelerin liflerinde açılma meydana geldiğinden, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez (Korkmaz, 2014).

2.2. Kompozit fiber malzemeler

Günümüzde yaygın kullanımda olan elyaflar; Karbon, cam, aramid, boron, Alüminyum oksit, grafit olarak sayılabilir. Takviye türlerinin mekanik özellikleri Çizelge 1. 'de verilmiştir.

Çizelge 1. Takviye türlerinin mekanik özellikleri (Bayraktar, 2016)

Takviye Türleri	Gerilme Dayanımı (MPa)	Gerilme Modülü (GPa)	Özgül Ağırlık g/cm ³	Özellikler
Cam	3000-5000	72-82	2.48-2.60	Yüksek mukavemet, İyi kalıplama özellikleri, Düşük maliyet
Karbon	2500-3000	200-700	1.75-1.96	Yüksek modül, Elektriksel iletkenlik, Yüksek maliyet
Aramid	2750-3000	82-124	1.44	İyi spesifik özellikler, Orta maliyet
Boron	3500	400	2.55	Yüksek modül, Yüksek maliyet
Polyester	1000	9	1.38	İyi darbe dayanımı ve Kimyasal özellikler
Naylon	950	5	1.16	İyi darbe dayanımı ve Alkali dayanımı
Polietilen	1200-1500	40-60	0.97	Düşük yoğunluk, iyi darbe dayanımı,

Karbon elyaf ; PAN-polyacrylonitrile ve zift kökenli karbon elyafı ticari olarak ilk defa 1800'lerin sonlarında, akkor lamba teli (flamenti) elde etmek amacıyla pamuk ve bambu lifinin karbonizasyonu ile elde edilerek kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak kullanımı ise, 1950'lerin sonlarında roket parçası üretimi için olmuştur. Karbon elyafı epoksi matrisler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özellikleri gösterir. (Anonim, 2006 Kompozit Malzemelerin Yapısı) Her bir atkı ipliğinin çözgü ipliklerinden 2 tanesinin altından 2 tanesinin üstünden olacak şekilde geçerek dokunduğu örgü tipi twill örgüdür. Dış görünümü önem arz eden kompozit parçalarda en dış yüzeyde sıklıkla kullanılır (Örs, 2014). Karbon elyafından üretilen iplik endüstriyel bir ürüne

dönüştürülebilir için kumaş olarak dokunurlar. Bu çalışmada 3K 2x2 Twill örgü dokuma 245g/m² kumaş kullanılmıştır Şekil 2. ' de 3K karbon elyaf iplikten 2x2 dokunmuş kumaş örneği görülmektedir. Çalışılan örneklerde kumaş 2 kat ve aynı yönde kullanılarak farklı açılarının oluşturacağı mekanik etkiler ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 2. 3K 2x2 Twill örgü karbon elyaf kumaş

2.3. Matrisler ve Genel Özellikleri

Polyester: Özellikle denizcilik ve inşaat alanında en çok kullanılan termoset reçinedir. Kompozit malzemelerde kullanılan 2 tür polyester reçine vardır; daha ekonomik olan ortoftalik ve suya dayanım gibi daha iyi özelliklere sahip olan isoftalik polyester.

Epoksiler: havacılık, spor, ulaşım, askeri ve deniz araçları elemanları gibi geniş kullanım alanına sahiptirler. Avantajları, iyi mekanik özellikler, suya dayanım, ıslakken 140°C, kuruyken 220°C 'ye kadar ısı dayanımı ve sertleşme sırasında düşük oranda çekme; dezavantajları ise yüksek maliyettir. Bu çalışmada oda sıcaklığında kurlaşan, DURATEK marka düşük viskoziteye sahip epoksi esaslı elyaf laminasyon reçinesi DT 1200 kullanılmıştır, sertleştirici olarak DTS 1151 tercih edilmiştir. Fiberlerin matristen sıyrılma kuvvetinin yüksek veya düşük olması fiber ve matris arasındaki yapışmaya bağlıdır (Bayraktar, 2016). Bu nedenle üretim esnasında kullanılacak matrisin kurlaşma ve çalışma sıcaklığına göre doğru seçilmesi önemlidir. Çalışmada karbon elyaf kumaş ve epoksi kullanılmıştır. Çizelge 2.'de Karbon elyaf ve reçine mekanik özellikleri gösterilmektedir. Ayrıca Vinilester, Bismaleimid (BMI) , Fenolikler, Silikon, Cynate Ester, Poliimidler, Poliüretan gibi matrisler de vardır.(Anonim, 2006 Kompozit Malzemelerin Yapısı)

Çizelge 2. Karbon elyaf ve reçine mekanik özellikler

Malzemeler	Karbon Lif	Epoksi
Çekme Dayanımı (MPa)	4900	70-80
Elastisite Modülü (Gpa)	240	3,2-3,5
Yoğunluk (g/cm ³)	1,79	1,13-1,17

2.4. Diğer Etkenler

Kompozit üretiminde etki eden başkaca unsurlar vardır, bu unsurların değerlerindeki değişiklikler kompozit parça üretimine doğrudan etki ederler

Vakum pompası; Vakum pompası hava kompresörlerinin ters yönde çalışması prensibi ile çalışırlar, havanın ortamdaki emilmesi sağlarlar. Vakum kaçaqları nedeniyle sistemde

basınç değerleri değişecektir. Bu nedenle sistem basınç değerlerini sürekli analiz eden ve basınç değeri düştüğünde tekrar istenilen değerlere gelenebilmesini sağlayan vakum santralleri kullanılmaktadır. Örnek uygulamada kullanılan vakum santrali Şekil 3. 'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Vakum santrali

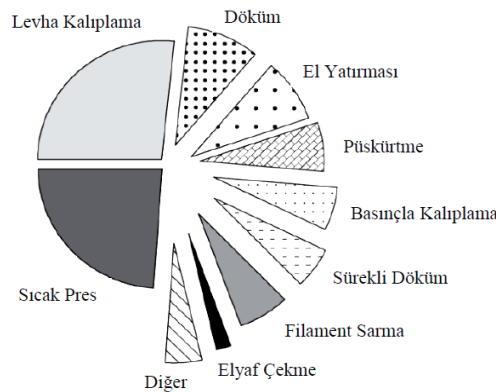
Vakum basıncı; Basıncın kürleşme esnasında sürekli olması proses için iyidir, bu süreklilik sistemin sürekli aynı kuvvet ile kalıp yüzeyinde uygulayacağı kuvveti sabit tutmasını sağlar. Basınç değeri için yaklaşımlar yapılır, örneğin 1m²'lik bir laminasyon için 0,700 mm-Hg basınç uygulandığında 70kPa'lık bir basınç elde edilir, bu da tüm laminasyon üzerinde 7138kg'lık bir kuvvet elde edilmesini sağlar.

Debi; Pompa seçiminde pompanın birim zamanda taşıyacağı hava hacminin de (litre/dk) önemi vardır. Eğer sistem tam anlamıyla sızdırmazlık koşullarını oluşturmuş ise vakum basıncında en yüksek değere ulaşılabilecektir. Pompanın debisi arttıkça istenilen ideal vakum koşullarına yaklaşırlar.

Sistemde ayrıca sarf malzemeler mekanik gereçler bulunmaktadır bunlar; Kalıp Ayırıcısı, Vakum Torbalama Filmi, Delikli Folyo, Çift Taraflı Bant, Soyma Kumaşı, Vakum Keçesi, Konektör Hızlı Bağlantı Kaplinidir.

2.5. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Polimer esaslı kompozit malzemelerin üretimi için birçok yöntem vardır. Bu yöntemler üretilecek parçanın özellikleri ile farklılaşmaktadır. Üretilmesi istenen parçanın geometrisi, mekanik özellikleri, kullanım yeri ve şartlarına göre yöntemler ve süreçler seçilmektedir. Proseslerde yapılan bir hata sonucunda kullanılan tüm malzeme ve işçilik boşa çıkacaktır. Bu nedenle kurallara ve proses sıralamalarına, karışım oranlarına verilen reçetelerdeki gibi uymak gereklidir. Şekil 4 'te üretim yöntemlerinin dağılımı görülmektedir.



Şekil 4. Kompozit üretim yöntemleri kullanım oranları

2.5.1. Termoset reçineli kompozit parça genel üretim yöntemleri

Kompozit parça üretiminde kullanılan reçineler %90 oranında termoset reçinelerdir. Bu reçinelerin üretiminde kullanılan elyaflarında kısa ve sürekli elyaf olarak bölümlere ayrıldığında Çizelge 3. 'te ki üretim yöntemleri gösterilmiştir.

Çizelge 3. Termoset kompozitlerin üretim yöntemleri

Termoset Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	
Kısa Fiber Kompozitler	Sürekli Fiber Kompozitler
SMC Kalıplama BMC Kalıplama Sprey Püskürtme Enjeksiyon SRIM	Flament Sarma Çekme (Pultrüzyon) RTM El Yatırma Otoklav Vakum İnfüzyon Vakum Torbalama

Üretim Yöntemlerini ayrıca daha farklı yönlerden de ayırabiliriz.

Keçe kumaş ve dokunmuş lif kumaş türü takviye malzemelerin kalıp yüzeyine yerleştirilmesi

- Elle yatırma (hand lay-up), Keçe kumaş, Dokuma kumaş, Prepreg kumaş
- Kırpıntı Eltaf Püskürtme
- Elyaf sarma (filament winding)
- Profil çekme / pultrüzyon (pultrusion)

Kürleştirme ortamları

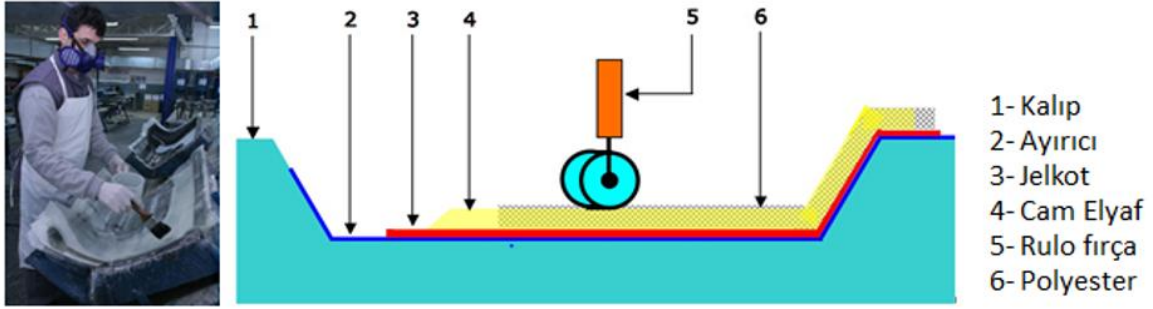
- Açık kalıp üzerinde oda sıcaklığında
- Vakum Torbalama oda sıcaklığında
- Kür fırınında vakum torbalama sistemi ile birlikte
- Autoclave içinde vakum torbalama ile birlikte

Reçine uygulamaları

- El ile uygulama (fırça ya da rulo ile)
- Vakum infüzyon (Kapalı çevrim vakum altında reçine emilimi)
- Reçine transfer sistemi RTM

2.5.1.1. El yatırma yöntemi

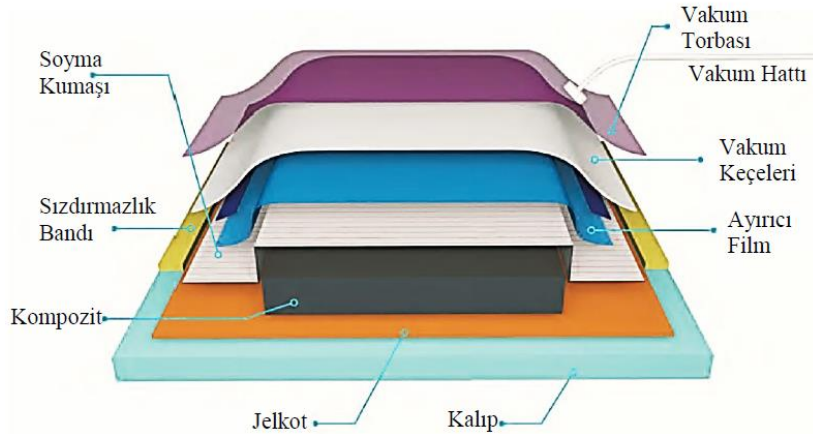
Bilinen en yaygın ve ucuz yöntemdir. Elyafların reçine ile kalıp üzerine fırça ya da rulo gibi araçlar ile açık uygulanması işlemidir. Çalışanın kontrolü altında olmayan hava boşlukları oluşabilir. Boşluklar parça yüzey kalitesini ve mukavemetini azaltacak önemli bir konudur. El yatırma yönteminde açık kalıp üzerine önce ayırıcı, daha sonra bir kat jelkot ve daha sonra da elyaf ve reçine uygulaması ile devam eder, kalınlığa göre elyaf katman sayısı artırılır. Bu yöntem Şekil 5. 'te gösterilmektedir.



Şekil 5. El yatırma yöntemi

2.5.1.2. Vakum torbalama yöntemi

Termoset reçine kompozit parça üretimindeki en temel ve yaygın yöntem elle yatırma işlemidir. El yatırma yönteminde elyaf/reçine oranı standart olarak sağlanamaz. Kompozit parçanın kalıp ile kopyalamayan yüzeyi deformasyonlu olarak karşımıza çıkacaktır. Bazı durumlarda kalıp geometrisine bağlı olarak elyaf ve reçine karışımının tüm yüzeye yapışmadığı da görülebilir. Elyaf reçine oranının sabit ve kompozit parçanın bir diğer yüzeyinin daha az deformasyonlu, parçanın geometrisinin boşluksuz bir şekilde üretimi için el yatırma yöntemine ek olarak vakum torbalama yöntemi kullanılır. Vakum torbalama yönteminde elyaf reçine laminasyonunu sıkıştırmak için negatif basınçtan faydalanılır. Torbalamanın fiziksel bir baskı unsuru olarak kullanılabilmesi için hava geçirmez bir düzenek kurulmalıdır. Bu düzenek genelde bir tarafı kalıp yüzeyi diğer tarafı ise hava geçirmez naylon kaplamadan oluşmaktadır. Bu sistemde, naylon ile kapalı devre bir sistem oluşturulur ve içerideki hava bir vakum pompası ile çekilir, oluşan negatif basınç, reçine ve kumaş birleşimini baskı altında tutar, hava kaçak kontrolü yapılır ve sistem sabitlenir, reçinenin sabit basınç altında kürleşmesi için beklenir. Vakum torbalama yöntemi şematik gösterimi Şekil 6 'da gösterilmiştir. Teorik olarak ortamda sağlanabilecek maksimum basınç 1atm 'dir. Bu da vakum torbalama kapalı devre sistemdeki tüm havanın kayıpsız bir şekilde çekilebilmesi ile oluşur. Oluşan negatif basınç kürleşme süresince devam etmelidir. Vakum torbalamada elle yatırma yönteminden kaynaklı ortamdaki fazla reçineyi de kontrol edebiliriz, homojen reçine-elyaf oranı elde edilmesini sağlar.



Şekil 6. Vakum torbalama şeması (Bayraktar, 2016).

Avantajlar

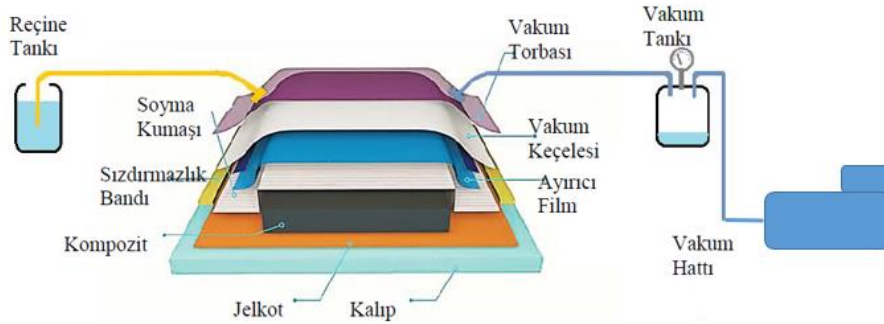
- Üretilen katmalı kompozit yapı içinde hava kabarcıklarının neden olduğu boşluklar en aza indirilmekte ve bu sayede çatlak oluşma kaynakları yok edilerek, yapının mukavemeti önemli ölçüde artmaktadır. Vakum uygulaması sonucunda katmanlı yapı içinde kalan fazla reçine emilerek, yapının lif-reçine oranının artması sağlanmaktadır.
- Vakum uygulaması sayesinde reçinenin bütün katmanlar arasında daha iyi yayılması sağlanmakta ve bu sayede daha homojen bir reçine dağılımı elde edilmektedir. Homojen reçine dağılımı ise, yapının mukavemetinin hesaplanabilir olmasını sağlamaktadır. Böylece sayısal ve analitik yöntemler yolu ile kompozit yapının mukavemeti daha doğru olarak hesaplanabilir.
- Vakum uygulaması sırasında katmanlar birbirleri üzerine basacaklarından, katmanların birbirleri ile olan birleşim mukavemeti daha güçlü olacaktır. Bir başka deyişle katmanlar arası kesme mukavemeti artacaktır (Turgut ve ark. 2007).

Dezavantajlar

- Büyük yapılarda hava kaçaklarının vakum düşüşü ve vakum santralinin sürekli çalışmada kalması
- Kullanılan komponent ve sarf malzemelerin tekrar kullanılamaması

2.5.1.3. Vakum infüzyon yöntemi

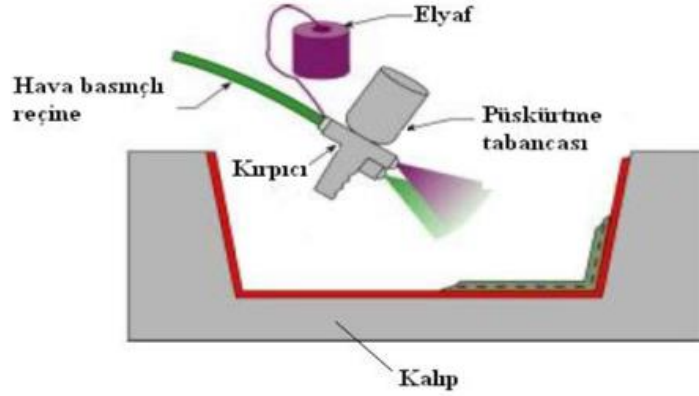
Vakum torbalama yönteminde elyaf ve reçine laminasyonu yapıp vakum torbası kapatılırken infüzyon yönteminde elyaf reçine laminasyonu yapılmadan torba kapatılır ve sisteme dışarıdan hazırlanan bir kaptan vakum sistemi sayesinde reçine çekilir. Reçine infüzyonunu başlatmadan önce sistemin kaçak kontrolü yapılır. Vakum tankı aynı zamanda kaçış kabı olarak ta adlandırılmaktadır. Proses esnasında sistemden gelen fazla reçine bu kaba gelerek vakum santraline gelmeden proses sonlanmış ve vakum santrali korunmuş olur. Vakum infüzyon yöntemi Şekil 7. 'de gösterilmiştir. Bu yöntemde eğer sistem hava sızdırmazlığı anlamında iyi izole edilmiş ise çok iyi yüzey kalitesi elde edilebilecek bir yöntemdir.



Şekil 7. Vakum infüzyon yöntemi (Korkmaz, 2014)

2.5.1.4. Elyaf püskürtme

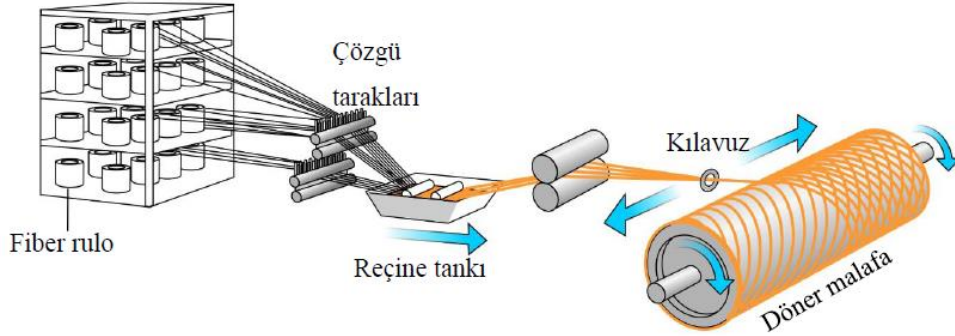
Özel bir düzenek yardımı ile açık kalıp yüzeyine kırprıcı bir tabanca içinden elyafın reçine ile birlikte püskürtülme işlemidir. Bu işlem sonrasında da reçine ve elyaf arasındaki havanın alınması gereklidir. Sistem Şekil 8. 'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Elyaf püskürtme yöntemi (Korkmaz, 2014)

2.5.1.5. Elyaf sarma yöntemi

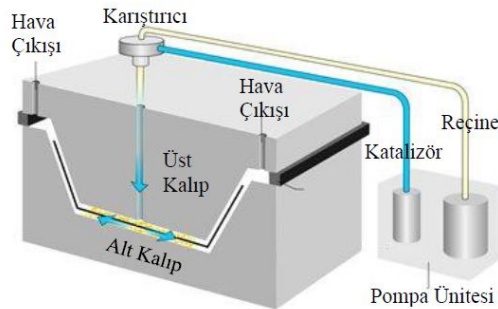
Fiber elyaf demetlerinin bir reçine havuzundan geçirilerek bir silindir üzerine sarılması yöntemidir. Bu yöntem esnasında kullanılan eksenler artıkça daha karmaşık geometrilere sahip parçalar üretilebilir. Sistem Şekil 9. 'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Elyaf sarma yöntemi (Bayraktar, 2016)

2.5.1.6. Reçine transfer yöntemi

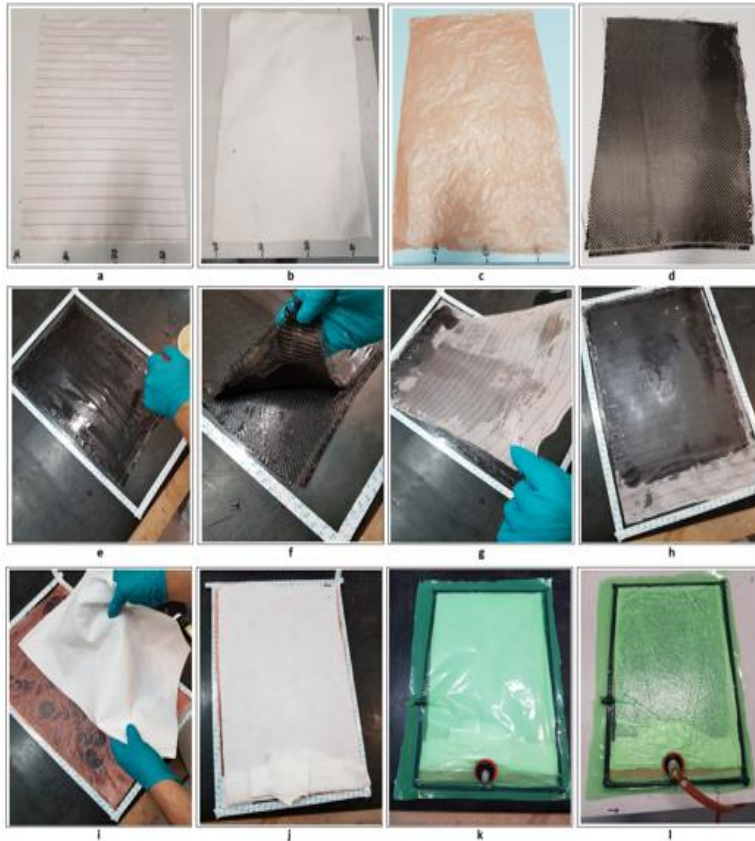
Dişi ve erkek kalıptan oluşan bir kalıp sistemidir. Kalıplar kapandığında ortada kalan hacim bitmiş parça hacmini oluşturur. Pompa ve dozajlama sistemi, reçineyi uygun oranda ve hava kabarcıklarından arındırılmış bir şekilde kapalı kalıp içine enjekte ederek prosesi gerçekleştirir. Eğer reçine enjeksiyonu ve hava çıkışı doğru bir şekilde yapıldıysa parça içinde hava kabarcıkları kalmaz. Diğer tüm sistemlere göre daha pahalıdır, seri üretim amaçlı kullanılır. Reçine kürleşmesi için kalıp ısıtmalı-soğutmalı yapılır. Bu yöntem RTM (Resin Transfer Moulding) adı verilir. RTM sistemi Şekil 10. 'da gösterilmektedir.



Şekil 10. Vakum enjeksiyon yöntemi (Bayraktar, 2016)

2.5.2. Test Plakalarının Vakum Torbalama Yöntemi ile Üretimi

Örnek uygulamada kalıp kullanılmadan cam üzerinde çalışma yapılmıştır. Şekil 11. 'de işlem sırasına göre alfabetik olarak sıralanmıştır. Soyma kumaşı (a), vakum keçesi (b), reçine geçiş delikli naylon (c) ve 2 kat karbon elyaf kumaş (d) uygun boyutlarda kesilir. Öncelikli olarak kalıp yüzeyi temizlenir, sınır bantları çekilir, kalıp ayırıcısı sürülür, bir bez ile kalıp ayırıcısı yüzeye iyice yedirilerek dağıtılır (Turgut ve ark. 2007). 1.kat karbon elyaf kumaş uygulanmadan önce ayrı bir kaptaki epoksi reçine hazırlanır, reçine miktarı karbon elyaf kumaş ağırlığının 2 katı kadar hazırlanmalıdır. Epoksi reçine fırça ile cam yüzey üzerine 1 kat sürülür (e), sırasıyla 1.ve 2. kat karbon elyaf kumaşlar yerleştirilir (f), her katman yerleştirildiğinde yüzeyde hava kabarcığı kalmayacak şekilde fırça ile tüm yüzeye reçine laminasyonu yapılır, soyma kumaşı yerleştirilir (g-h), fırça ile reçineli yüzeye kumaşın tam ve hava kalmayacak şekilde yerleştirilmesi tamamlanır. Sırasıyla delikli naylon ve vakum keçesi yerleştirilir (i), uygun boyutlarda kesilmiş vakum naylonu çift taraflı bant üzerine yerleştirilir, vakum soketi keçe ile beslenmiş alana konumlandırılarak (k) vakum hortumu da takılıp sistem kapatılır, vakum santrali çalıştırılarak sızdırmazlık kontrolü yapılır (j) sistemde vakum kaçağı yok ise oda şartlarında ya da bir kür fırınında reçinenin kürleştirilmesi süreci başlar. Bu yöntem ile üretilen test plakaları, baskı amaçlı uygulanan negatif basıncın pozitif kalıp etkisi mantığı ile üretilmiş olur. Basınç değişkeninin mekanik ve kozmetik etkilerini analiz etmek için 0,600mmHg, 0,800mmHg, 1000mm Hg negatif atmosfer basınçlarında üç farklı örnekleme plakası üretilmiştir.

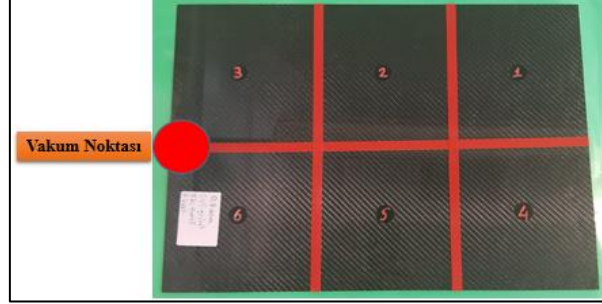


Şekil 11. Test plakalarının üretimi (Turgut ve ark. 2007)

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Kalınlık ölçümleri

Kalınlık ölçümlerinde alanlar arasında farklıklar oluşup oluşmadığı analiz edilmiştir. Bu amaçla her farklı basınç değerlerinde üretilen test plakaları alanlara bölünmüş ve plaka Şekil 12. 'de gösterilmiştir.



Şekil 12. Alanlara bölünmüş test plakası

Nominal Kalınlık Hesabı, kullanılan kumaş 245 g/m^2 olup bir kat kumaş $0,245 \text{ mm}$ 'dir. Reçine kumaş içine emilse de cam üzerine önceden sürülen reçine ve uygulamada kullanılan reçine miktarı ile 0.1mm kadar bir kalınlık nominal hesaba katılmalıdır. Böylece 2 kat kumaş ve reçine toplam olarak $0,59\text{mm}$ nominal kalınlık değeri olarak hesaplanır. Kalınlık ölçüm sonuçları Çizelge 4. 'te verilmiştir.

Kalınlık ölçümü bulguları

Ölçümler sonrasında nominal değerden sapma oranlarına bakıldığında en yüksek ortalama değer $0,018\text{mm}$ fark ortaya çıkmaktadır, dijital kumpasların $0,01$ hassasiyeti vardır, ölçülen kalınlıkların el yatırma vakum torbalama prosesinde vakum basıncının kalınlığa etkisinin olmadığı ortaya çıkmaktadır. Daha geniş alanlarda yapılacak çalışmalarda vakum nokta sayısı baskının homojen olması için artırılmalıdır. Her üretim öncesinde kalınlık analizi yapılmalıdır.

Çizelge 4. Kalınlık ölçüm sonuçları

0,6 ATM Vakum Torbalama Plaka Kalınlık Ölçümleri								1. kat kumaş	0,245
								2. kat kumaş	0,245
								Reçine	0,1
								Nominal	0,590
Bölge	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	Ortalama	Sapma		
1 Nolu bölge	0,59	0,58	0,59	0,6	0,57	0,586	0,004		
2 Nolu bölge	0,57	0,57	0,57	0,59	0,57	0,574	0,016		
3 Nolu bölge	0,58	0,57	0,56	0,6	0,61	0,584	0,006		
4 Nolu bölge	0,58	0,56	0,59	0,56	0,57	0,572	0,018		
5 Nolu bölge	0,58	0,56	0,58	0,57	0,57	0,572	0,018		
6 Nolu bölge	0,58	0,57	0,59	0,6	0,6	0,588	0,002		

0,8 ATM Vakum Torbalama Plaka Kalınlık Ölçümleri								1. kat kumaş	0,245
								2. kat kumaş	0,245
								Reçine	0,1
								Nominal	0,590
Bölge	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	Ortalama	Sapma		
1 Nolu bölge	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,590	0,000		
2 Nolu bölge	0,58	0,59	0,58	0,58	0,57	0,580	0,010		
3 Nolu bölge	0,58	0,59	0,59	0,59	0,59	0,588	0,002		
4 Nolu bölge	0,6	0,6	0,59	0,61	0,6	0,600	-0,010		
5 Nolu bölge	0,6	0,6	0,61	0,6	0,6	0,602	-0,012		
6 Nolu bölge	0,58	0,6	0,6	0,58	0,58	0,588	0,002		

1,0 ATM Vakum Torbalama Plaka Kalınlık Ölçümleri								1. kat kumaş	0,245
								2. kat kumaş	0,245
								Reçine	0,1
								Nominal	0,590
Bölge	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	Ortalama	Sapma		
1 Nolu bölge	0,56	0,59	0,59	0,57	0,56	0,574	0,016		
2 Nolu bölge	0,56	0,6	0,59	0,56	0,57	0,576	0,014		
3 Nolu bölge	0,56	0,59	0,56	0,58	0,6	0,578	0,012		
4 Nolu bölge	0,58	0,58	0,58	0,58	0,59	0,582	0,008		
5 Nolu bölge	0,56	0,6	0,57	0,56	0,58	0,574	0,016		
6 Nolu bölge	0,56	0,58	0,59	0,58	0,56	0,574	0,016		

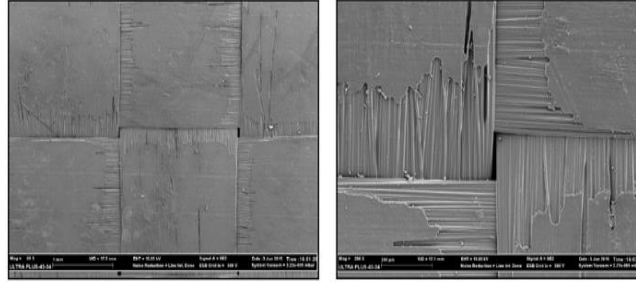
3.2. Görsel ölçümler

Vakum torbalama yönteminin beklenen sonuçlarından birisi de kumaş dokumasındaki atkı çözümler arasında kalan boşluklardır. Epoksi matrisin bu köşelere ve karbon elyaf demetleri arasına tam olarak sızmadığı belirlenmiştir. Basınç değişkeninin bu boşlukların oluşumuna nasıl etki ettiğini anlamak için kozmetik yüzey değerlendirmeleri yapılmıştır, bu kapsamda alandaki boşluklar analiz edilmiştir (Aşkın, 2015). Bu amaçla her bölge 10X oranında büyütülerek fotoğrafları alınmıştır. Şekil 13 'te vakuma en uzak bölgede alan oranlaması yapılmıştır Bu amaçla boşluk alanların dolu olan alanlara oranları hesaplanmıştır.



Şekil 13. 10X Büyütülmüş test plakası

Benzer bir büyütme çalışması 59X ve 250X oranlarında büyütürken görüntüleri Şekil 14. 'te görülmektedir. Atkı ve çözgüler arasında kalan boşluklar net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 14. 59X ve 250X büyütülmüş test plakası (Aşkın, 2015)

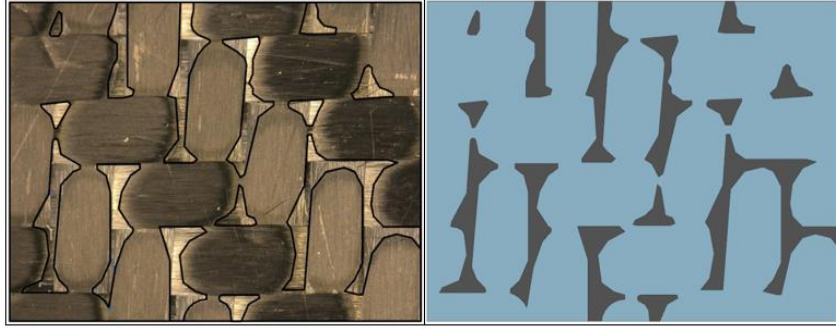
Görsel ölçüm ve bulguları

Alan hesaplama, 10X büyütülerek elde edilen fotoğraflar Unigraphics Cad programında oluşan boşlukların çevresinde eğriler oluşturulmuştur, oluşturulan eğrilerden elde edilen alan ile toplam alan oranlanarak hesaplamalar yapılmıştır. 0,6 Atm Vakum basınç görsel değerlendirmesi Şekil 15. 'te gösterilmiştir. Buna göre yapılan oranlama sonucunda 0,6 atm basınç ile üretilen plakanın Şekil 11. 'de verilen vakuma en uzak 1 nolu bölgesinde %16,2 oranında boşluk ile karşılaşmıştır.



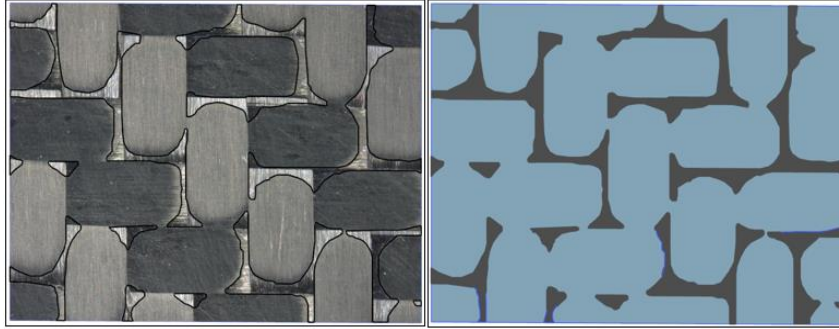
Şekil 15. 0,6 Atm vakum basıncı plaka görsel ölçümü sonuçları

0,8 Atm Vakum basınç görsel değerlendirmesi Şekil 16. 'da gösterilmiştir. Yapılan oranlama sonucunda 0,8 Atm basınç ile üretilen plakanın Şekil 11. 'de verilen vakuma en uzak 1 nolu bölgesinde %15,1 oranında boşluk ile karşılaşılmıştır.



Şekil 16. 0,8 Atm vakum basıncı plaka görsel ölçümü sonuçları

1,0 Atm Vakum basınç görsel değerlendirmesi Şekil 17. 'de gösterilmiştir. Yapılan oranlama sonucunda 0,8 Atm basınç ile üretilen plakanın Şekil 11. 'de verilen vakuma en uzak 1 nolu bölgesinde %13,9 oranında boşluk ile karşılaşılmıştır. Bu oronlama ile ilgili



Şekil 17. 1,0 Atm vakum basıncı plaka görsel ölçümü sonuçları

3.3. Mekanik Testler ve Test Plakalarının Hazırlanması

3.3.1. Test plakaları ölçüleri

ASTM normuna göre aşağıdaki gibi test plakalarının kesim ölçüleri belirlenmiştir. Çizelge 5. 'te belirlenen plaka ölçüleri ve numune adetleri gösterilmiştir.

Çizelge 5. Plaka ölçüleri

Test Plakaları Kesim Ölçüleri			
Test Normu	Vakum Basıncı (Atm)	Ölçüler (mm)	Adet
ASTM D3039	0,6	25x250	7
	0,8	25x250	7
	1	25x250	7
ASTM D790	0,6	12,7x100	6
	0,8	12,7x100	6
	1	12,7x100	6

3.3.2. Test plakalarının kesilmesi

Test plakaları için istenilen ölçülerde numune hazırlayabilmek amacıyla freze ile ahşap tabla üzerinde sabitlenmiş plakaların kesim işlemleri Şekil 18. 'de gösterildiği gibi yapılmıştır. Kesim sonrasında oluşan çapaklar temizlenmiştir.



Şekil 18. Test plakalarının kesilmesi

3.3.4. Mekanik testler ve ölçümler

Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla sırasıyla ASTM D3039 çekme testi, ASTM D790 3 nokta eğme testleri yapılmıştır (Bayraktar, 2016). Gerçekleştirilen mekanik testler ve kullanılan test cihazları Çizelge 6. 'da belirtilmiştir.

Çizelge 6. Testler ve mekanik test cihazları

No	Testler	Kullanılan Cihaz
1	Kalınlık	Mikrometre
2	Görsel Değerlendirme	Steoroscope
3	Çekme Testi	Zwick marka test cihazı
4	3 Nokta Eğilme Testi	Zwick marka test cihazı

Kullanılan cihazlar

Dijital mikrometre; Kalınlık ölçümü için kalibrasyonlu Dijital Mikrometre kullanılmıştır. Dijital mikrometre Şekil 19. 'da gösterilmiştir. Hassasiyet 0.001mm dir.



Şekil 19. Dijital mikrometre

Steoroscope ; Plakaların görsel olarak değerlendirmesini yapabilmek için 10X büyütme yaparak görüntü alınan Steoroscope Zeiss stemi508 cihazı Şekil 20. 'de gösterildiği gibidir.



Şekil 20. Steroscope Zeiss Stemi508

Zwick test cihazı; Test Plakaların çekme ve basma testleri için Zwick/Roell Z250 SH Allround-Line cihazı Şekil 21. 'de gösterildiği gibidir.



Şekil 21. Zwick/Roell Z250 SH Allround-Line

3.3.4.1. Çekme testi

Çekme testi, malzemelerin statik yük altındaki mekanik özelliklerini belirlemek ve malzemelerin özelliklerine göre sınıflandırılmasını sağlamak amacıyla uygulanan mekanik bir deneydir. Bu deney ile; elastisite modülü (E), elastiklik sınırı, akma gerilmesi, çekme dayanımı (maksimum gerilme), uzama (%) ve kesit daralması (%) gibi özellikler belirlenebilir (Örs, 2014). Uygulamada kullanılan çekme testi cihazı TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Arge Test Merkezi Zwick/Roell Z250 SH Allround-Line cihazı kullanılmıştır. Çekme testi Şekil 22 'de göstermiştir.



Şekil 22. Çekme testi

Çekme testi bulguları

Çizelge 7. 'de çekme mukavemeti test sonuçlarına bakıldığında düşük basınçtan yükseğe doğru lineer bir artış , yüksek basınç değerinde daha mukavim bir yapı elde edildiği görülmektedir. Vakum torbalama siteminde reçinenin uygulanması ve sonrasında sistemin kapatılarak vakum altında kürleşme anında reçinenin bir kısmı vakum battaniyesine geçer, vakum basıncı arttıkça reçine miktarının azalması ile birlikte hava kabarcıklarının azalması söz konusudur, bu da yapıda porozitenin azalmasına neden olmaktadır, yani basınç arttıkça porozitenin düşmesi ile kesit alanı küçüldüğü için daha sıkı bir yapı oluşmaktadır, bu da yapıda çekme esnasında daha yüksek mukavemet ile karşılaşılmasına neden olmaktadır. Compostest gövde detay parçalarında geometrik stabilite çok önemlidir. Çekme testi sonuçlarına göre düşük vakum basıncı ile ürün üretilmesi hava kabarcıklarının artmasına neden olacağı için , parçaların detay üretimlerinden sonraki birleşimlerinde esneme ve kırılmalara neden olabilir. Bu da genel geometriyi doğrudan etkileyecektir. Vakum torbalama prosesi esnasında 0.8 Atm vakum basıncı kullanılması olası riskleri ortadan kaldıracaktır.

Çizelge 7. ASTM 3039 çekme testi sonuçları

No	Çekme Mukavemeti (MPa)			Uzama (%)		
	Vakum			Vakum		
	0,6 Atm	0,8 Atm	1 Atm	0,6 Atm	0,8 Atm	1 Atm
1	383	497	608	0,9	0,9	1,2
2	445	519	608	0,8	0,9	1,1
3	364	563	642	0,8	1	1,2
4	411	597	604	0,9	1,1	1,1
5	418	557	629	0,8	1	1,1
6	411	614	627	0,9	1,1	1,1
7	399	570	620	0,8	1	1,1
Ortalama	404,4	559,6	619,7	0,84	1	1,13

3.3.4.2. 3 Nokta eğme testi

Eğilme testi malzemenin mukavemeti hakkında üretim bilgilerini belirlemek ve malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla yapılır. İki mesnet üzerine yerleştirilmiş ve yoğunlaştırılmış bir kuvvetle yüklenmiş bir test plakasını inceleyen eğilme testinde eğilen bir çubuğa etkiyen yük ve elastik deformasyon arasındaki ilişkiyi göstermek amaçlanır (Korkmaz, 2014). Bu uygulamada kullanılan 3 nokta basma testi cihazı TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Arge Test Merkezi Zwick/Roell Z250 SH Allround-Line cihazı kullanılmıştır. Şekil 23 'te 3 Nokta eğme testi gösterilmiştir.



Şekil 23. 3 Nokta eğme testi

3 Nokta eğme testi bulguları

Çizelge 8 'de 3 nokta basma testi esnasında elde edilen test sonuçları incelendiğinde düşük basınçta yüksek basma mukavemeti değeri ile karşılaşılrken, yüksek basınçta daha düşük basma mukavemeti ile karşılaşılmaktadır. Vakum torbalama siteminde vakum altında kürleşme esnasında reçinenin bir kısmı vakum battaniyesine geçer, böylece düşük basınç altında üretilen numunede daha fazla reçine bulunmaktadır, reçinenin fazla olmasından dolayı eğilme dayanımı daha yüksek çıkmaktadır. Vakum torbalama yönteminde düşük basınç değeri kullanıldığında reçine oranı fazla kalabilir, fazla reçine bu durumda kalınlığa etki edebilir. Çok yüksek basınç ise reçinenin vakum battaniyesine daha fazla emilimine neden olacaktır, bu da kalınlığı inceltecektir. Her iki durum da istenmediğinden dolayı yine optimum bir değer olan 0.8 Atm vakum basıncı kullanılması olası riskleri ortadan kaldıracaktır.

Çizelge 8. ASTM D790 3 nokta eğme testi sonuçları

Eğme Dayanımı (MPa)			
No	Vakum		
	0,6 Atm	0,8 Atm	1 Atm
1	630,6	544,3	516,3
2	549,9	593,1	602,1
3	594,9	638,4	573,4
4	668,8	556,2	548,6
5	607,9	597,1	514
6	615,5	541,6	504,8
Ortalama	610,9	578,4	543,7

4. Sonuç

Bu çalışmada vakum torbalama sistemi gereksinimleri, malzemeleri, ekipmanları, uygulama safhaları detaylarıyla anlatılmıştır. Vakum torbalama sisteminin avantajları anlatılmış ve uygulamadaki bazı önemli bilgiler verilmiştir. Vakum torbalama yönteminin, elle yatırma sisteminde oluşan hava kabarcıklarının önlenmesi ve homojen reçine dağılımı için gerekliliği anlatılmıştır.

Dokuma karbon elyaf kumaş ile vakum torbala siteminde mutlaka boşluklu yapılar ile karşılaşılacağı anlaşılmıştır, bu yüzey boşlukları yüksek basınçta azalmaktadır. Eğer bu yöntem zorunlu ise dış yüzeye sonradan uygulanacak epoksi reçine uygulaması ve zımpara işlemleri ile bir miktar iyileştirilebilir. Kozmetik yüzey elde edebilmek için reçine transfer kalıplama, vakum infüzyon üretim yöntemleri bulunmaktadır. Unutulmamalıdır ki kalıp yüzeyi ne kadar iyi ise elde edilecek yüzey de o derecede iyi olacaktır. Tüm kompozit üretimlerinde yöntemlerdeki kurallara uyulmalıdır. Özellikle epoksi reçine karışım oranları verilen teknik dokümanlardaki oranlara uygun olmalıdır.

Kalınlık ölçümlerinden anlaşılacağı üzere, bu yöntemde analiz edilen basınç değerlerinde ölçülen kalınlıklarda anlamlı farklılıklar ile karşılaşılmamıştır. Bu sınır basınç değerlerinde yapılacak üretimlerde nominal değere çok yakın sonuçlar elde edileceği anlaşılmıştır. Üretilmesi istenen parça kalınlıklarının artması sonucunda üretim öncesinde numune plaka testleri ile durum analiz edilmelidir. Mekanik testlerden anlaşılacağı üzere bu yöntemde yüksek basınçta porozite (boşluk hacminin tüm hacme oranına) artışı nedeniyle çekmeye maruz kalabilecek yapılarda yüksek mukavemet ve uzama miktarının artışı görülmektedir. Yanal kuvvetlerde ise düşük vakum basıncında yapı içinde daha fazla reçine kaldığı için mukavemet artışı etkisi oluşturduğu anlaşılmıştır. Porozitenin etki ettiği mekanik sonuçların fiziksel olarak doğrulanması için reçine elyaf yoğunluğu analizleri ve taramalı elektron mikroskobu ile boşlukların analizi ve bölgesel yayılımı analiz edilebilir. Tüm bu değerlendirmeler ışığında vakum torbalama yönteminde karbon elyaf ve reçine ile parça üretiminde en uygun basınç değeri ile çalışılması genel ihtiyaçları karşılayacağı söylenebilir, bu değer ise 0,8 atm değeri olarak alınabilir.

5. Kaynaklar

Abdurohman, K. , Satrio, T. , Muzayadah, N. L. 2018. “A comparison process between hand lay-up, vacuum infusion and vacuum bagging method toward e-glass EW 185/lycal composites” Journal of Physics: Conference Series, Volume 1130, 6th International Seminar of Aerospace Science and Technology 25–26 September 2018, Jakarta, Indonesia

Anonim, Kompozit Malzemeler, <https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/d7ee7cd9-f063-4669-8e1c-393503ed6ffb/kompozitmalzemellersunu1giris.pdf> (Erişim tarihi: 27.06.2020)

Anonim, 2006 Kompozit Malzemelerin Yapısı <http://accluster.com/kompozit-malzemelerin-yapisi/> (Erişim tarihi: 27.06.2020)

Aşkın, M. Y. 2015. “Karbon Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü S 56-60.

Bayraktar, Ö. 2016. ” Ön Gerilimli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Üretimi İçin Sistem Tasarımı, İmalatı ve Kompozit Malzeme Üretimi “ Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü S 18-24.

Erden, S. ve diğ. 2009. "Karbon Fiber Takviyeli Termoplastik Kompozitlerde Ara Yüzey Dayanımının Arttırılmasında Kullanılan Yöntemler," Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi, S 39-56.

Hanh, H.T., 1978. Fatigue behaviour and life prediction of composite laminates. In: Tsai SW, editor. Composite materials: testing and design (fifth conference). American Society for Testing and Materials, 674, 383–417.

Korkmaz, N. 2014. "Karbon Elyaf Takviyeli Dokuma Kumaş İçeren Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma" Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü S 4.

Örs, S. 2014. "Farklı Karbon Tekstilleriyle ve Reçineler ile Oluşturulan Karbon Kompozitlerin Karakterizasyonu " Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü S 47.

Turgut, T., Kayran, A., Alemdaroğlu, N., Ceylan, M. 2007. "Vakum Torbalama Yöntemi ile Kompozit Malzemedeki Yapı Üretimi ve Örnek Bir Havacılık Uygulaması" Mühendis ve Makine Cilt No:48 566 14-21.

Yıldızhan, H. 2008. "Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine İmalat Anabilim Dalı, Isparta.