

Araştırma Makalesi / Research Article

RTM Yönteminde Jelkot ve Laminasyon Planının Nihai Ürünün Mekanik Özelliklerine Etkisi

Mustafa Can TOPBAŞOĞLU¹, Cihan KABOĞLU¹, Mustafa KELEŞ²¹Bursa Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Bursa²Bursa Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Polimer Malzeme Mühendisliği, BursaSorumlu Yazar e-posta*: mstafatopbas@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4130-9798>e-posta : cihan.kaboglu@btu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6249-0565>e-posta : mustafakles97@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1687-4303>

Geliş Tarihi: 17.11.2022

Kabul Tarihi: 13.06.2023

Öz

Bu çalışmada, Reçine Transfer Kalıplama (RTM) yöntemiyle üretilmiş cam fiber takviyeli kompozit plakalarda elyaf ağırlığının ve jelkotun mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Üç farklı laminasyon planı ve bu planların jelkotlu halleri kullanılmıştır. Numunelerin incelenmesi için çekme testi, üç nokta eğme testi ve Barcol sertlik testleri yapılmıştır. Laminasyon planlarında 300 g/m², 450 g/m², 600 g/m² olmak üzere 3 farklı ağırlıkta elyaf kullanılmıştır. Ayrıca laminasyon arasında 180 g/m² ve 250 g/m² polipropilen köpük malzeme kullanılmıştır. Her laminasyon için bir jelkotlu, bir jelkotsuz plaka üretilmiştir. Üretim sonunda kalınlıkları 2.5 – 3.2 mm arasında değişen 6 plaka üretilmiştir. Üç nokta eğme ve çekme testi için 10'ar numune kesilmiştir, Barcol sertlik testi plaka üzerinde 5 noktadan alınmıştır. Testler sonucunda elyaf ağırlığının artmasıyla mukavemet değerlerinin arttığı, uzama değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Her laminasyonun jelkotlu hallerinde %5 - 15 aralığında mekanik özellik düşüşü gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler

Kompozit Malzeme;
Laminasyon Planı;
Mekanik Özellikler;
RTM Metodu

The Effect of Gelcoat and Lamination Plan on Mechanical Properties of the Final Product in RTM Method

Abstract

This study investigated the effect of fiber weight and gelcoat on the mechanical properties of glass fiber-reinforced composite plates produced by Resin Transfer Molding (RTM). Three different lamination plans and gelcoat versions of these plans were used. Tensile test, three-point bending test and Barcol hardness tests were performed to examine the samples. Fibers of 3 different weights, 300 g/m², 450 g/m², and 600 g/m², were used in the lamination plans. In addition, 180 g/m² and 250 g/m² polypropylene core material was used between lamination. One gelcoat and one non-gelcoat plate were produced for each lamination. At the end of the production, 6 plates with thicknesses ranging from 2.5 mm to 3.2 mm were produced. For the three-point bending and tensile test, 10 samples were cut each, the Barcol hardness test was taken from 5 points on the plate. As a result of the tests, it was observed that the strength values increased and the elongation values decreased with the increase in fiber weight. A decrease in mechanical properties in the 5 - 15% range was observed in the gelcoat versions of each lamination.

Keywords

Composites;
Lamination Plan;
Mechanical Properties;
RTM Method

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Fiber takviyeli plastikler (FRP), sert cam fiber takviye ve sünek polimer matristen oluşan kompozit malzeme türleridir (Santa *et al.* 2016). FRP'ler uzay,

havacılık, enerji, otomotiv ve birçok alanda sunduğu avantajlar ile ön plana çıkmaktadır (Falaschetti *et al.* 2020). FRP'ler sağladıkları; hafiflik, üstün mekanik özellikler, korozyon özellikleri ve tasarım özgürlüğü

ile diğer malzeme türlerine karşı büyük avantaj sunmaktadır. Ayrıca üretimsel olarak metal veya diğer kompozit parçalarla iyi yapışabilme kabiliyeti büyük avantajlarından bir başkasıdır (Baumann *et al.* 2022).

Reçine Transfer Kalıplama (RTM), karmaşık yapılar sahip kompozitlerin üretilmesini sağlamaktadır (Optiz *et al.* 2019). RTM, günümüzün en umut verici kompozit üretim yöntemlerinden biridir. RTM; yüksek mekanik performans, küçük boyut toleransı, yanmazlık ve yüksek yüzey kalitesi avantajları sağlamaktadır (Saad 2023). RTM; düşük viskoziteye sahip (<1 Pa.s), bir reçinenin, dişi-erkek kapalı bir kalıba yerleştirilmiş kuru preform haline getirilmiş takviyelere; düşük basınç ve düşük akış hızında enjekte edildiği sıvı kompozit üretim yöntemidir. Enjeksiyon aşaması tamamlandıktan sonra, polimerizasyon süreci başlar ve işlem bitince kalıp açılarak parça çıkartılır (Laurenzi and Marchetti 2012).

RTM üretim süreci öncesinde tasarımın iyi yapılması; nihai şekle yakın karmaşık parçaların üretilmesini sağlar ve orta hacimli miktarlar için uygun maliyetli yapısal parçaların üretilmesini sağlar. Bu avantajlara ek olarak, iyi yapışma özellikleri sayesinde metal yapılara özgü olan bağlantı sorunları oluşmaz (Poodts *et al.* 2014, Goumghar *et al.* 2022).

Yapısal parça üretiminde özellikle son yıllarda çevre sorunlarının ön plana alınmasıyla; hafiflik, malzeme israfının azaltılması gibi etkenler tasarımlarda belirleyici faktör olmuştur (Miranda *et al.* 2022). Laminasyon planının optimizasyonu, bu özelliklerin en iyi şekilde sağlanması için kilit rol oynamaktadır. Laminasyon planını etkileyen 4 parametre bulunmaktadır. Bunlar; 1) örgü hammaddesi, 2) katman sayısı, 3) örgü yoğunluğu, 4) örgü deseni'dir (Cristian *et al.* 2011).

Lee (2021) çalışmaları sırasında farklı laminasyonlarda testler yapmışlardır. Laminasyon planına ekstra farklı yönlendeki bir elyaf katmanının eklenmesi mekanik özellikleri olumlu anlamda geliştirmiştir.

Katman sayısı optimizasyonunun, mekanik özellikler açısından büyük öneme sahip olduğunu Sakin (2021) çalışmasında göstermiştir. Optimum laminasyon sayısı ve yönlendemesini çalışma sonucunda ortaya çıkarmıştır.

Davallo ve Pasdar (2009) farklı elyaf oranlarının RTM ve el yatırması yönteminde parçanın mekanik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Bu çalışma için farklı laminasyonlar kullanmışlardır ve RTM parçalarında elde edilen çekme mukavemetleri laminasyon planına göre \pm %30 değişmektedir. Bu da bize laminasyon planının önemini göstermektedir.

Reddy vd. (2012) farklı laminasyon planlarının boşluk ve ağ yapısına etkisini incelemişlerdir. Laminasyon optimizasyonunun boşluk geometri ve sayısını değiştirdiğini gözlemlemişler, bunun da mekanik anlamda etkisini incelemişlerdir.

Khalil vd. (2009) cam ve doğal fiberler ile hibrid takviye edilmiş FRP parçanın farklı laminasyonlarda mekanik özelliklerinin değişimine bakmışlardır. Farklı laminasyonlarda eğme mukavemetleri 100 MPa ile 250 MPa arasında değişmektedir.

Bu çalışmada RTM üretim yönteminde farklı laminasyon planlarının etkisiyle mekanik özelliklerin, ağırlığın nasıl değiştiği ve jelkotun parçanın mekanik özellikleri üzerine etkisi olup olmadığı incelendi.

Bu çalışma sonucunda üretilen FRP parçanın özelliklerini en optimum düzeye getirebilmek için laminasyon planlarının ve jelkotun parça üzerinde etkisini analiz ederek mekanik özellikleri iyileştirmeyi ayrıca uygun laminasyon plan seçimiyle beraber malzeme israfını azaltma amacımız bulunmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Malzeme

FRP üretimi için RTM yöntemi tercih edilmiştir. Düşük viskoziteli doymamış polyester reçine, teknik detayları Çizelge 2'de verilmiş olan elyaflar ile 6 ayrı parça olarak 1 Bar enjeksiyon basıncı ve 400 mbar vakum basıncı altında üretilmiştir. Üretim sonrası

60°C'de 4 saat kürlenme işlemi yapılmıştır. Üç farklı elyaf laminasyonunda bir tane jelkot uygulaması yapılmış, bir tane yapılmamış olarak üretim yapılmıştır.

Çizelge 1. Numunelerde kullanılan reçine, jelkot, elyaf ve üretimde kullanılan parametreler

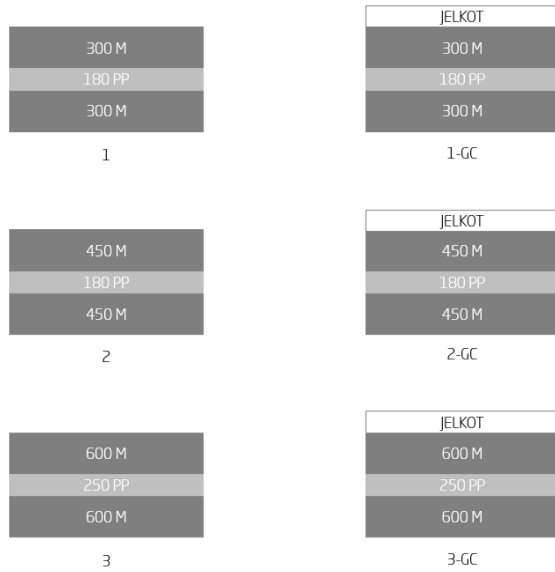
Plaka No	Jelkot Uygulaması	Elyaf Tipi
1	Yok	300M* / 180PP* / 300M
1-GC*	Var	300M / 180PP / 300M
2	Yok	450M / 180PP / 450M
2-GC	Var	450M / 180PP / 450M
3	Yok	600M / 250PP / 600M
3-GC	Var	600M / 250PP / 600M

*GC; jelkot uygulaması yapılmış plakayı ifade etmektedir.

*Elyaf tipi sütununda M; keçe elyafı, PP; polipropilen köpüğü ifade etmektedir.

Çizelge 2. Kullanılan elyafların teknik özellikleri

Plaka No	Elyaf	Ağırlık	Dikiş Ağırlığı
1, 1-GC	300M / 180PP / 300M	790 g/m ²	10 g/m ²
2, 2-GC	450M / 180PP / 450M	1161 g/m ²	11 g/m ²
3, 3-GC	600M / 250PP / 600M	1459 g/m ²	9 g/m ²

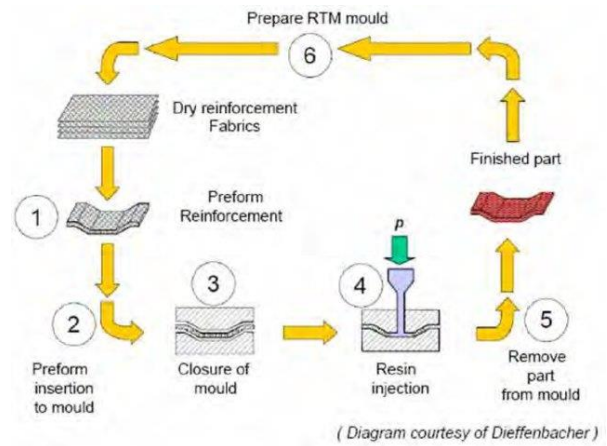


Şekil 1. Elyaf laminasyonlarının şematik gösterimi

2.2 RTM Prosesi

RTM prosesi beş temel aşama içermektedir, bunlar; 1) Takviye Yerleştirme, 2) Kalıp Enjeksiyonu, 3) Polimerizasyon, 4) Kürlenme, 5) Soğutma ve Son İşlemler'dir (Hillermeier *et al.* 2013). Şematik gösterim Şekil 2'de gösterilmiştir (Friedrich *et al.* 2011). RTM, daha düşük üretim maliyeti, yüksek kalite ve daha yüksek üretim hızı gibi özelliklerinden dolayı diğer tekniklere göre çeşitli avantajlara

sa sahiptir (Asim *et al.* 2017). Reçine, preforma enjeksiyon sistemi aracılığıyla iki kalıp arasında basınç altında empenye edilir. Enjeksiyon işlemi sırasında reçine sızıntısını önlemek için iki kalıp plakası sıkıca kenetlenir (Dai and Fan 2014). Enjeksiyon sonrası reçine tamamen sertleşene kadar reçine viskozitesi sürekli artar. RTM prosesinde ıslanabilirliği arttırmak için vakum desteği kullanılmaktadır. Parça kalıptan çıkarıldıktan sonra malzemenin sertliğinin artması için kürlenme işlemine sokulur (Mehdikhani *et al.* 2018). Kürlenme işlemi sonrası parça çıkarılır ve kalıp temizlenerek yeni üretimlere hazır hale getirilir (Cristian *et al.* 2011).



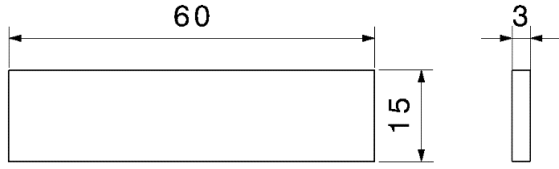
Şekil 2. RTM Prosesinin şematik gösterimi

2.3 Testler

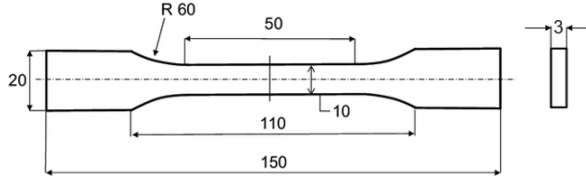
20 kN kapasiteli mekanik test cihazında (Şekil 3.a) ISO 14125 standardına uygun üç nokta eğme testleri, ISO 527-4 standardına uygun şekilde çekme testleri uygulanmıştır. Eğme testleri için 60 x 15 mm boyutlarında (Şekil 4), çekme testleri için 150 x 20 x 10 mm boyutlarında papyon şeklinde 10 adet numune alınmıştır. Üç nokta eğme testinde parçanın orta noktasına yük uygulanarak, malzemenin eğme deformasyonu incelenir. ASTM D2584 standardına uygun şekilde Barcol cihazıyla (Şekil 3.b) sertlik testleri yapılmıştır.



Şekil 3. a) Mekanik Test Cihazı, b) Barcol Sertlik Cihazı



Şekil 4. Üç nokta eğme testi numune boyutları

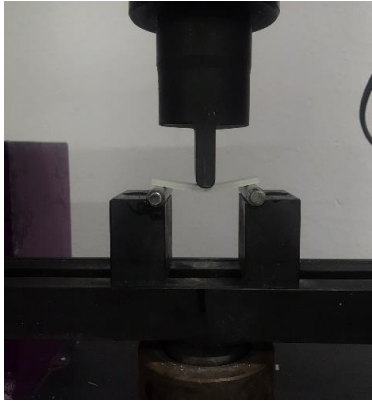


Şekil 5. Çekme testi numune boyutları

3. Bulgular

3.1. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

ISO 14125 standardına uygun şekilde üretilmiş olan, Şekil 7'de gösterilen numuneler üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur (Şekil 6). Test sonucunda eğme dayanımı, eğme kuvveti verilerine ulaşılmıştır. Çizelge 3'te veriler verilmiştir.



Şekil 6. Üç nokta eğme testi



Şekil 7. Üç nokta eğme testi numuneleri

Çizelge 3. Üç nokta eğme testi sonuçları

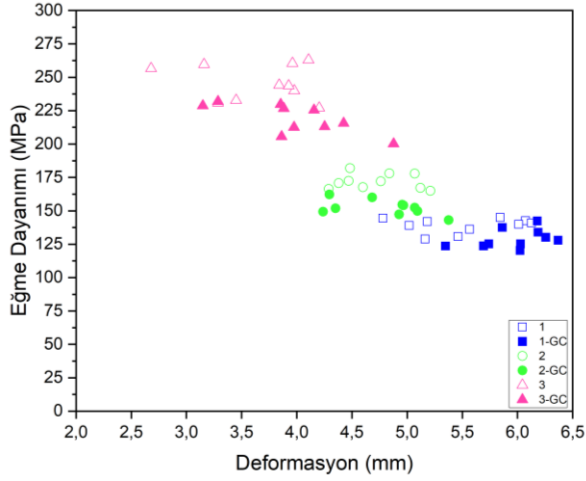
Numune	Kalınlık	Ortalama Eğme Dayanımı (MPa)
1	2.621 ± 0.216*	139.124 ± 5.725
1-GC	3.014 ± 0.181	127.980 ± 7.779
2	2.878 ± 0.173	172.160 ± 6.070
2-GC	3.068 ± 0.103	152.299 ± 7.407
3	3.042 ± 0.142	244.154 ± 12.022
3-GC	3.118 ± 0.121	212.503 ± 10.570

*Sonuçlar numunelerin ortalamasına göre verilmiştir. Artı eksi ile verilen değerler standart sapma değerleridir.

Şekil 8'de eğme testinden elde edilen dayanım/uzama sonuçları verilmiştir. Metrekare başına elyaf ağırlığı arttıkça eğme dayanımı arttığı, deformasyonun düştüğü görülmektedir.

RTM prosesinde kullanılan elyafların ortasında reçine emip şişmesi ve hafiflik sağlaması için PP köpük bulunmaktadır. Aynı kalıp içerisinde üretilen FRP parçalarda kalınlık, elyaf ağırlığına göre değişmektedir. Elyaf ağırlığı Numune 1'den Numune 2'ye geçtiğinde %47 artmış olsa da kalınlık artışı %9'da kalmıştır. Bu durum da kalıbın reçineden çok elyafla doldurulmasına yol açmış ve mekanik özelliklerde artış gözlemlenmiştir. Numune 2'den Numune 3'e geçtiğimizde ise elyaf ağırlığı %25 artmış olmasına rağmen kalınlık %2 oranında artmıştır. Bunun sebebi aynı RTM kalıbını kullanıyor olmamızdır, kalıp kalınlığı zaten belli olduğu için Numune 3'ün değerleri Numune 1 ve 2'ye oranla çok daha yüksek çıkmıştır. Çünkü elyaf ağırlığı artışına rağmen kalınlık limitli kalmış ve bu sebepten parçada elyaf oranı artmıştır.

Jelkotun parçanın eğme özelliklerine etkisini incelediğimizde ise eğme dayanımında her numune için yaklaşık %10 - 15'lik bir düşüş gözlemlenmiştir. Kalıplara üretim başlamadan önce 0,5 mm kalınlığında jelkot uygulaması yapılmıştır. Parçanın içerisindeki takviyesiz yapı yüzdesinin artması da mekanik özellikleri olumsuz anlamda etkilemiştir.



Şekil 8. Eğme dayanımı/Deformasyon grafiği

3.2 Çekme Testi Sonuçları

ISO 527-4 standardına uygun şekilde üretilmiş olan, Şekil 11’de gösterilen numunelere çekme testi yapılmıştır (Şekil 10). Sonuçları Çizelge 4’te verilmiştir.

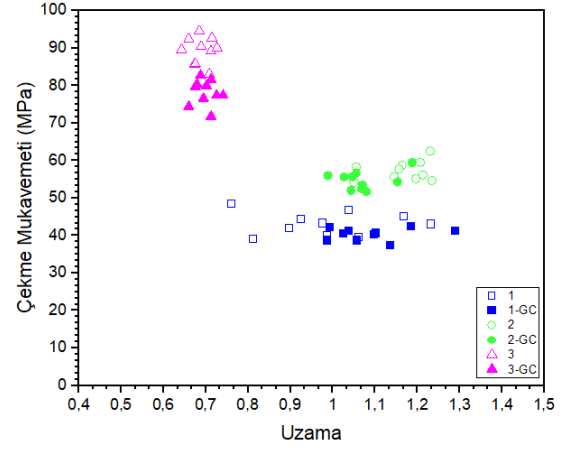
Çizelge 4. Çekme testi sonuçları

Numune	Kalınlık	Ortalama Çekme Dayanımı (MPa)
1	2.716 ± 0.237*	43.198 ± 3.068
1-GC	3.114 ± 0.269	40.601 ± 2.543
2	2.947 ± 0.094	58.286 ± 2.790
2-GC	3.246 ± 0.243	55.604 ± 2.696
3	3.177 ± 0.102	89.168 ± 4.398
3-GC	3.271 ± 0.178	83.386 ± 3.738

*Sonuçlar numunelerin ortalamasına göre verilmiştir. Artı eksi ile verilen değerler standart sapma değerleridir.

Çekme testi sonuçları mekanik değerler olarak eğme testi sonuçlarıyla örtüşmektedir. Elyaf ağırlığının artışı ve limitli kalınlık artışı sebebiyle parçadaki takviye oranı artmış ve mukavemet değerleri artmıştır. En iyi mukavemet 3 ve 3-GC numunelerinde gözlemlenmiştir.

Jelkot, çekme dayanımını Numune 1 ve Numune 2’de %5 - 10 aralığında olumsuz etkilerken, Numune 3’te bu değer %15 seviyelerinde çıkmıştır.



Şekil 9. Çekme mukavemeti/Yüzde Uzama grafiği



Şekil 10. Çekme testi



Şekil 11. Çekme testi numuneleri

3.3 Barcol Sertlik Testi Sonuçları

Her numune için ASTM D2584 standardına uygun şekilde Barcol sertlik ölçümü yapılmış olup sonuçlar Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. Barcol sertlik testi sonuçları

Numune	Ortalama Barcol Sertlik
1	62 ± 2.48
1-GC	64 ± 1.72
2	67 ± 3.65
2-GC	66 ± 2.41
3	72 ± 3.54
3-GC	74 ± 3.82

*Sonuçlar numunelerin ortalamasına göre verilmiştir. Artı eksi ile verilen değerler standart sapma değerleridir.

Sonuçlara göre numuneler arasında gözle görülür bir fark yoktur. Elyaf ağırlığı daha yüksek olan numunelerde ölçülen sertlikte ortalamalar alınınca küçük bir artış söz konusudur, fakat birbirlerinden daha düşük veya yüksek sertlik sonucu aldığımız numuneler de mevcuttur.

4. Tartışma ve Sonuç

Altı farklı deney plakası RTM yöntemiyle üretilmiştir. Bu plakaların laminasyon planı elyaf ağırlıklarına göre değişmektedir. Her laminasyon planı için bir de jelkotlu numune üretilmiştir. Bu numunelerin mekanik özelliklerinin tayini için üç nokta eğme testi, çekme testi ve Barcol sertlik testi uygulanmıştır. Eğme testinde elyaf ağırlığının artmasıyla eğme dayanımı artmış, deformasyon miktarı azalmıştır. Çekme testindeki sonuçlar da eğme testini doğrulamıştır. Jelkotlu numunelerde ise eğme ve çekme testlerinde her laminasyon için eğme dayanımı ve çekme dayanımı özelliklerinde %5 - 15 arasında düşüş gözlemlenmiştir.

1. Elyaf ağırlığının artmasıyla kompozit parçanın eğme özelliklerinde artış gözlemlenmiştir. Numune 2 ile Numune 1 arasında eğme dayanımı açısından ortalama değerler baz alındığında %23.7'lik bir fark söz konusudur. Bu sonuç metrekare başına düşen elyaf ağırlığının artmasına bağlıdır. Numune 3 ile Numune 2 arasında ise %41.8'lik bir artış vardır. Artışın Numune 1 ile Numune 2 arasındaki orandan daha yüksek olmasının sebebi limitli kalınlığa

sahip kalıpta kalınlık artışının çok daha düşük olup, takviyesiz bölümün daha düşük kalmasına bağlıdır. Eğme testinin kompozit malzemeler gibi katmanlı yapılar için en önemli mekanik test olduğunu söyleyebiliriz. Çünkü üç nokta eğme testinde parçaya alttan çekme kuvveti, yukarıdan da basma kuvveti uygulanırken katmanlar arasında kayma gerilmesi meydana gelir. Bunun sonucunda da laminasyon katlarının hataları belirlenir. Eğme testi sonucunda numunelerin kırık yüzeylerini incelediğimizde delaminasyon, ıslanmama gibi kritik hatalar görülmedi.

2. Elyaf ağırlığının artması parçanın çekme özelliklerini de olumlu etkilemiştir. Çekme mukavemeti açısından Numune 2 ile Numune 1 arasında %34.9'luk bir artış söz konusudur. Numune 3 ile Numune 2 arasında %106'lık bir fark bulunmaktadır. Bu yüksek artışın sebebi de eğme özelliklerinde olduğu gibi metrekare başına düşen takviye oranının artışıyla ilişkilendirilebilir. Laminasyon planının düzgün belirlenmesi bu konuda çok kritik önem arz etmektedir. Bizim bu çalışmada incelememiş olduğumuz ağırlık konusu da dikkate alınarak laminasyon planı düzenlenmelidir. Çok küçük ağırlıkların bile önemli olduğu havacılık, uzay gibi kritik sektörlerde kullanılan kompozit parçalardaki laminasyon planında elyaf ağırlığı, parça ağırlığı, -kullanılacak ise- köpük ağırlığı, kat sayısı gibi birçok parametre değiştirilerek optimum sonuç elde edilmelidir.
3. Barcol sertliklerine baktığımızda elyaf ağırlığı artan numunelerin ortalama olarak daha yüksek sertlik değeri verdiği görülmektedir. Fakat numuneler içerisinde sertlikleri diğerlerine yakın numuneler de mevcuttur. Elyaf ağırlığının değiştirilmesinin sertlik özelliğine ciddi bir etkisi bulunmamaktadır.
4. Jelkotlu üretilmiş olan numuneler incelendiğinde eğme özelliklerinde normal numuneye göre eğme dayanımı özelliklerinde %10 - 15 düşüş gözlemlenmiştir. Çekme özelliklerinde de çekme dayanımında %5 - 15 aralığında düşüş vardır. Jelkot, polimer esaslı bir malzemedir, takviyesiz bir yapıda olmasından kaynaklı olarak da mukavemeti düşüktür. Bu

sebepten dolayı yapıda jelkotun bulunması eğme dayanımı ve çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. Jelkotun mekanik özelliklere etkisi ile ilgili literatüre bu konu hakkında bir katkıda bulunuldu. Jelkot kullanımı, konvansiyonel olarak göz ardı edilemeyecek bir durumdur. Jelkotsuz üretilen parçalarda boya tutunması ve görsel sorunlar görülmektedir. Mekanik özelliklerdeki düşüşü minimuma indirebilmek için jelkot uygulaması yapılırken kalınlığa dikkat edilmeli, robot kullanımı, sprey kullanımı ve gelişmiş jelkot sistemlerinin kullanımı arttırılmalıdır.

Teşekkür

Yazarlar, Sazcılar Arge Merkezi'ne üretim ve test konusundaki destekleri için teşekkür eder.

5. Kaynaklar

- Asim, M., Jawaid, M., Saba, N., Ramengmawii, N.M. and Sultan, M.T.H., 2017. Processing of hybrid polymer composites—a review. *Hybrid Polymer Composite Materials*, 1–22.
- Baumann, A., May, D. and Hausmann, J., 2022. Characterization of metallic bushings in RTM-made composites by in-situ leak detection under mechanical loading. *Composites Part C*, **7**, 100226.
- Cristian, I.N., Nauman, S., Boussu, F., Koncar, V., 2011. A Study of Strength Transfer from tow to Textile Composite Using Different Reinforcement Architectures. *Applied Composite Materials*, **19**, 427-442.
- Dai, D. and Fan, M., 2014. Wood fibres as reinforcements in natural fibre composites: structure, properties, processing and applications. *Natural Fibre Composites*, 3–65.
- Davallo, M. and Pasdar, H., 2009. Comparison of Mechanical Properties of Glass-Polyester Composites Formed by Resin Transfer Molding and Hand Lay-Up Technique. *International Journal of ChemTech Research*, **1**, 470-475.

- Falascetti, M.P., Rondina, F., Zavatta, N., Gragnani, L., Gironi, M., Troiani, E. and Donati, L., 2020. Material characterization for reliable resin transfer molding process simulation. *Applied Sciences*, **10(5)**, 1814.
- Friedrich, M., Exner, W., and Wietgreffe, M., 2011. Sensitivity analysis of influencing factors on impregnation process of closed mould RTM. *CEAS Aeronautical Journal*, **2**, 195-202.
- Goumghar, A., Assarar, M., Zouari, W., Azouaoui, K., El Mahi, A. and Ayad., R., 2022. Study of the fatigue behaviour of hybrid flax-glass/epoxy composites, *Composite Structures*, **294**, 115790.
- Hillermeier, R.W., Hasson, T.D., Friedrich, L. and Ball, C.A., 2013. Advanced Thermosetting Resin Matrix Technology for Next Generation High Volume Manufacture of Automotive Composite Structures, *SAE 2013 World Congress & Exhibition*.
- Khalil, H. P. S., Kang, C. W., Khairul, A., Ridzuan, R. and Adawi, T. O., 2009. The Effect of Different Laminations on Mechanical and Physical Properties of Hybrid Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **28(9)**, 1123–1137.
- Laurenzi, S. and Marchetti, M., 2012. Advanced Composite Materials by Resin Transfer Molding for Aerospace Applications, *IntechOpen*, 198-226.
- Lee, H., Jung, K. and Park, H., 2021. Study on Structural Design and Analysis of Composite Boat Hull Manufactured by Resin Infusion Simulation. *Materials*, **14(20)**, 5918.
- Mehdikhani, M., Gorbatikh, L., Verpoest, I. and Lomov, S.V., 2018. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. *Journal of Composite Materials*, **53**, 1579 – 1669.

- Miranda, B., Bourbigot, S., Fontaine, G. and Bonnet, F., 2022. Thermoplastic matrix-based composites produced by resin transfer molding: A review, *Polymer Composites*, **43 (5)**, 2485.
- Opitz, M., Bertling, D. and Liebers, N., 2019. FAUST: Material Characterization Of Low-Cost Foam Materials Under Real Boundary Process Conditions For RTM Large-Scale Production. *Technologies For Economical and Functional Lightweight Design*.
- Poodts, E., Minak, G., Mazzocchetti, L. and Giorgini, L., 2014. Fabrication, process simulation and testing of a thick CFRP component using the RTM process. *Composites Part B: Engineering*, **56**, 673-680.
- Radzi, A.M., Sheikh, A.Z., Mohamad, Z.H., Ilyas, R.A., Khairur, R.J., Mohd Yusof, M.D. and Sa'ardin, A. A., 2022. Bamboo-fiber-reinforced thermoset and thermoplastic polymer composites: A review of properties, fabrication, and potential applications. *Polymers*, **14(7)**, 1387.
- Reddy, A.R., Reddy, B.S. and Reddy, K.R., 2012. Application of design of experiments and artificial neural networks for stacking sequence optimizations of laminated composite plates. *International Journal of Engineering Science and Technology*, **3**, 295-310.
- Saad, A., 2023. Control of Thermal Gradients in Thin Resin Transfer Molding Parts. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, **13**, 12.
- Sakin, R., 2021. Layup Design Optimization for E-glass Woven Roving Fabric Reinforced Polyester Composite Laminates Produced by VARTM. *Fibers and Polymers*, **22(2)**, 509-527.
- Santa, J.F., Vanegas-Jaramillo, J.D. and Patiño, I.D., 2016. Mechanical Characterization of Composites Manufactured by RTM Process: Effect of Fiber Content, Strain Rate and Orientation. *Latin American Journal of Solids and Structures*, **13**, 344-364.