

# Kompozit levhaların mekanik özelliklerindeki değişkenliği üzerinde üretim prosesi ve malzeme parametrelerinin etkisinin incelenmesi

Raif SAKİN<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Balıkesir Üniversitesi, Edremit Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Makina Programı, Tuzcumurat Mah. Yaylaönü Cad. 10300, Edremit, Balıkesir

<sup>2</sup>Balıkesir Üniversitesi, Kompozit Araştırma Eğitim-Simülasyon Uygulama ve Araştırma Merkezi, Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarı, Çağış yerleşkesi, 10145, Altıeylül, Balıkesir

Geliş Tarihi (Received Date): 30.03.2024

Kabul Tarihi (Accepted Date): 25.04.2024

## Öz

Bu çalışmada reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemiyle üretilen kompozit levhaların mekanik özelliklerindeki değişkenliğinde proses ve malzeme parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, kompozit levhaların üretimi için bir RTM prosesinden yararlanılmıştır. Proseste kullanılan kalıp, ısıtmalı, tam kapalı, tek veya çift noktadan enjeksiyon uygulanabilen metal bir kalıp olup vakum desteği sayesinde kalıp içindeki hava proses süresince boşaltılabilmektedir. Çalışmada kullanılan proses parametreleri ise enjeksiyon basıncı, kürleme basıncı, enjeksiyon nokta sayısı ve ortam sıcaklığıdır. Kompozit plaka imalatı için matris olarak düşük viskoziteli ticari bir polyester reçine, fiber olarak ise 500 g/m<sup>2</sup>'lik iki-yönlü cam-dokuma kumaş kullanılmıştır. Proses sonunda kalıptan her biri 6 tabakalı, 0.5×0.5 m boyutlarında, farklı kalınlık ve fiber hacimlerinde toplam 10 adet kompozit levha üretilmiştir. Levhalardan 0°/90°, 15°/75°, 30°/60° ve 45°/45° fiber oryantasyonlarında standartlara uygun numuneler kesilmiştir. Numuneler, mekanik özelliklerini belirlemek için çekme ve eğme testlerine tabi tutulmuştur. Toplam 367 adet numune test edilmiş ve elde edilen veriler SPSS-24 yazılımıyla istatistik olarak analiz edilmiştir. Mekanik özelliklerin, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon nokta sayısı ve ortam sıcaklığı gibi proses parametreleri ile fiber oryantasyonu ve levha kalınlığı gibi malzeme parametrelerinden etkilendiği tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Cam-dokuma kumaş, kompozit levha üretimi, mekanik özellikler, proses ve malzeme parametreleri

\* Raif SAKİN, rsakin@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-6009-9573>

## Investigation of the effect of production process and material parameters on the variability of mechanical properties of composite sheets

### Abstract

*This study investigated the effect of process and material parameters on the variability of mechanical properties of composite sheets produced by resin transfer molding. For this purpose, an RTM process was utilized for the production of composite sheets. The mold used in the process is a heated, fully closed metal mold that can be used for single or double point injection, and thanks to the vacuum support, the air in the mold can be evacuated during the process. The process parameters used in the study were injection pressure, curing pressure, number of injection points and ambient temperature. The composite sheets were fabricated using low-viscosity commercial polyester resin as the matrix and bidirectional woven-glass fabric of 500 g/m<sup>2</sup> as the fiber. A total of 10 composite sheets which have six layers, 0.5×0.5 m in size and of various thicknesses and fiber volumes, were produced at the end of the process. Standard test specimens were cut from the sheets at 0°/90°, 15°/75°, 30°/60° and 45°/45° fiber orientations. The specimens were subjected to tensile and flexural tests to determine their mechanical properties. SPSS-24 software was used to statistically analyze the data from a total of 367 samples. Mechanical properties are influenced by process and material parameters such as injection pressure, number of injection points, ambient temperature, fiber orientation and sheet thickness, respectively.*

**Keywords:** *Woven-glass fabric, production of composite sheet, mechanical properties, process and material parameters*

### 1. Giriş

Birçok polimer matrisli kompozit malzeme, genelde daha yüksek özgül mukavemet (mukavemet/ağırlık) ve mükemmel korozyon dirençleri göz önüne alındığında; kara, hava ve deniz araçları ile inşaat uygulamalarında metaller dâhil birçok malzemeden daha fazla popülerlik kazanmıştır. Ayrıca, oldukça geniş bir malzeme seçeneği ve üretim kolaylığı da polimer matrisli kompozitleri mühendislik uygulamaları için ideal hale getirmiştir [1-3]. Bu grubun içinde yer alan elyaf takviyeli polimer kompozitler (FRP) ise yüksek mekanik özellikleri, kontrol edilebilir elektrik iletkenliği ve düşük termal genleşme katsayısı, iyi yorulma direnci ve karmaşık şekilli malzemelerin üretimi için uygunluk gibi birçok mükemmel özelliğe sahiptir. Bu olumlu özellikleri sayesinde, FRP'ler birçok uygulamada ahşap, plastik veya metaller gibi geleneksel yapısal malzemelerin alternatifi haline gelmiştir. Özellikle cam elyafı hafif ve dayanımı yüksek bir malzemedir. Mukavemet özellikleri karbon elyafından biraz daha düşük olsa da, cam elyafı tipik olarak çok daha az kırılmandır ve daha ucuzdur. Cam-dokuma kumaş takviyeli polimer kompozitler (GFRP) ise, bu özelliklerin iyi bir kombinasyonu olmaları nedeniyle özellikle otomotiv ve uçak endüstrilerinde, savunma, uzay ve deniz araçlarında kullanılmaktadır [1, 3-5]. Ancak bütün bu olumlu özelliklerine rağmen genel olarak FRP'ler anizotropik ve heterojen yapılarından dolayı mekanik özellikleri oldukça fazla değişkenlik göstermektedir [6]. Örneğin; 0°/90° fiber oryantasyonuna sahip iki-yönlü

dokuma kumaş takviyeli kompozit bir bileşenin yapısındaki fiberlerin oryantasyonu  $\pm 45^\circ$  döndürülerek test edildiğinde, ilgili parçanın nihai çekme mukavemetinin %67-71 düzeyine azaldığı görülmüştür [7, 8]. Mekanik özelliklerdeki bu ciddi değişkenlik sadece fiber oryantasyonu gibi malzeme parametresiyle değil aynı zamanda, sıcaklık ile nem gibi çevre şartlarıyla ve kompozit üretim proses parametreleriyle de ilgilidir [9-12]. Bazı çalışmalarda malzeme parametresi olarak fiber tipi ve tabaka sayısı, proses parametreleri olarak ise belirli bir basınçta reçine enjeksiyonu sağlayan pistonun strok boyu, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon noktasının kalıptaki yeri (merkez veya köşede gibi) ve kalıp sıcaklığı gibi farklı parametrelerin üretilen kompozit parçanın mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır [13]. Bu çalışma kapsamında olan ve Reçine transfer kalıplama yöntemiyle imal edilen cam-dokuma kumaş takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özellikleri de birçok faktörden etkilenmektedir. Örneğin kullanılan reçinenin cinsi ve viskozitesi, dokumanın örgü tipi, kumaş geometrisi, elyaf hacim oranı, laminat konfigürasyonu, laminat içinde kalan hava boşluğu miktarı ve dokuma kumaşın birim alan yoğunluğu ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) da önemli bazı malzeme parametrelerindedir [1, 11, 14]. Global olarak imalat endüstrilerindeki hızlı büyüme, malzemelerin mukavemet, rijitlik, özgül mukavemet ve daha düşük maliyetle daha iyi sürdürülebilirlik açısından iyileştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. En başta karbon (CFRP) ve cam (GFRP) gibi elyaflarla takviyeli polimer kompozitler ise günümüzde birçok sektöre hizmet eden ve mekanik özellikleri bu tür iyileştirmelere uygun malzemeler olarak ortaya çıkmıştır [3]. Mevcut literatürde olduğu gibi bu çalışma kapsamında ve muhtemelen gelecek çalışmalarda da FRP'lerin fiziksel ve mekanik özelliklerini etkileyen faktörleri anlama ve amaca göre iyileştirme çabaları devam edecek gibi görünüyor. Bu çalışmada ise reçine transfer kalıplama yöntemiyle üretilen kompozit levhaların çekme ve üç nokta eğilme gibi temel mekanik özelliklerindeki değişkenliğinde proses ve malzeme parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışma sonuçları istatistiksel olarak yorumlanarak literatüre katkı sağlamaya çalışılmıştır.

## 2. Malzeme ve metot

### 2.1. Cam-dokuma elyaf takviyeli kompozit (GFRP) levha üretimi

Bu çalışmada, GFRP levhaların üretimi için  $500 \text{ g}/\text{m}^2$  birim alan ağırlığına sahip E-camı dokuma fitil (WR) tipinde elyaflar kullanılmıştır. WR elyaflar Fibroteks A.Ş. tarafından üretilmiş iki eksenli cam-dokuma kumaşlardır. Reçine enjeksiyonu için Poliya A.Ş. tarafından üretilen RTM tipi düşük viskoziteli (300 Cp) ortoftalik polyester reçine (Polipol™ 336) ile metil etil keton peroksit (MEKP) ve kobalt naftenat (CoNa) katalizörleri kullanılmıştır. Tablo 1'de kompozit levha imalatında kullanılan fiber, matris ve katalizörlerin detayları görülmektedir.

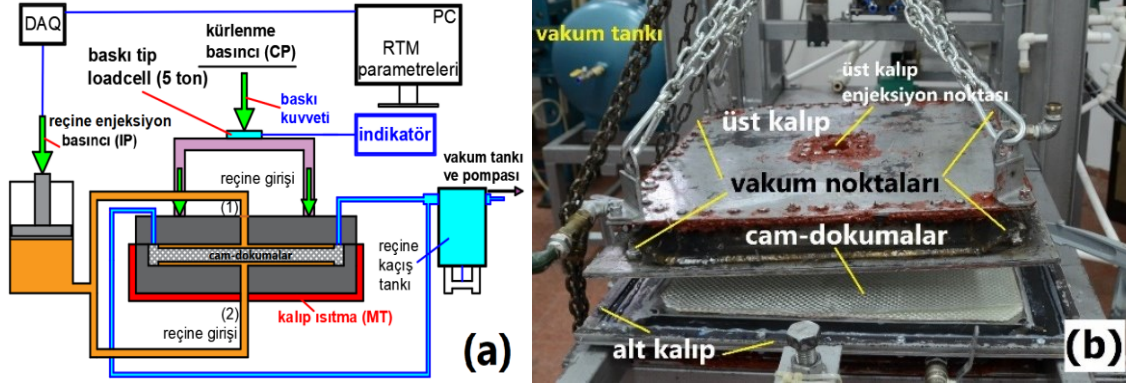
Tablo 1. GFRP levha bileşenleri ve özellikleri [15, 16]

<b>Matris (reçine)</b>	<b>Fiber (WR elyaf)</b>
Özgül ağırlık ( $\rho_m$ )=1.094 $\text{g}/\text{cm}^3$	E-camı dokuma
Çekme dayanımı=64 MPa	Özgül ağırlık ( $\rho_f$ )=2.54 $\text{g}/\text{cm}^3$
Elastisite modülü=2.8 GPa	Lif çapı=12–17 $\mu\text{m}$
Eğilme dayanımı=113 MPa	Çekme dayanımı=2306 MPa
Eğilme modülü=3.1 GPa	Elastisite modülü=72.4–81.5 GPa
Poisson oranı=0.36	Poisson oranı=0.22
Maks. deformasyon=%2.8 (çekme), %4.3 (eğilme)	Maks. deformasyon =%2.97 (çekme)
<b>Sertleştirici</b>	<b>Hızlandırıcı</b>
matris hacminin %0.5'i kadar MEKP	matris hacminin %0.1'i kadar CoNa

RTM, elyaf takviyeli kompozit parçaların üretimi için çok yönlü bir prosestir. Tipik bir RTM prosesiyle kompozit parça üretimindeki işlem sırası şu şekildedir: a) alt kalıp boşluğuna elyafların yerleştirilmesi, b) üst kalıp kapatılarak tam-kapalı bir kalıp sistemi oluşturulması, c) düşük viskoziteli reaktif bir reçinenin kapalı kalıba belirli bir basınçla enjekte edilmesi, d) kalıptaki parçanın belirli bir sıcaklık ve sürede kürleme işlemine tabii tutulması ve e) kalıp açılarak üretilen kompozit parçanın çıkarmasıdır. RTM'de, üretilen kompozit parçanın kalitesini etkileyen birçok proses parametresi vardır. Bunlardan bazı önemlileri; reçine enjeksiyon basıncı, kalıp sıcaklığı, reçine giriş ve tahliye noktalarının konumu, elyaf hacim oranı ve yapısı, vakum uygulaması ve kürleme işlemi olarak sayılabilir [17].

Literatürde, RTM prosesinde farklı parametreler kullanılarak iyi ıslanma ve RTM parametrelerinin levha kalitesi üzerine etkisi gibi bazı deneysel çalışmalar yapılmıştır [18, 19]. Ancak bu çalışmanın amacı; reçine enjeksiyon basıncı (IP), enjeksiyon nokta sayısı (NIP) ve kürleme basıncı (CP) gibi proses parametrelerine ilaveten ortam sıcaklığı (AT) gibi çevre faktörü ile fiber oryantasyonu (FO) ve levha kalınlığı (ST) gibi malzeme parametrelerinin levhaların mekanik özelliklerindeki değişkenliği üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bu amaçla Şekil 1(a) ve (b)'de görülen, ısıtmalı, vakumlu, gövde çelik, içi krom saçtan yapılmış rijit bir RTM prosesinden yararlanılmıştır. Şekil 1(a)'da görüldüğü gibi reçine enjeksiyonu, kalıba sadece üstten (1) veya aynı anda hem üst hem alttan (2) olarak iki farklı noktadan (NIP) uygulanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Kalıp içindeki cam-dokumalar arasında sıkışabilecek hava boşluklarını gidermek için enjeksiyona başlamadan önce kalıp köşelerinden -0.95 bar basınçla vakum uygulanmıştır. Şekil 2(b)'de görüldüğü gibi iki-yönlü cam-dokuma elyaflar kalıp boşluğuna altı kat olacak şekilde ve  $[0^{\circ}/90^{\circ}]_6$  diziliminde simetrik olarak yerleştirilmiştir. Daha sonra, alt ve üst kalıplar sızdırmazlık sağlanarak kapatılmıştır. Kalıp, ortalama 45 °C ısıtılmış ve her bir levhanın imalatı esnasındaki laboratuvar ortam sıcaklıkları (AT) dijital bir sıcaklık ölçerle ile ölçülerek ve kaydedilmiştir. Tablo 2'deki sıcaklık değerleri, her bir levhanın imalat aşamasında ortalama 112 dakikalık reçine transferi süresince ölçülen ortam sıcaklıklarıdır. Çalışma kış döneminde yapıldığı için ortam sıcaklıkları oda sıcaklığından (20 °C) daha düşüktür. Ortam sıcaklığının reçine viskozitesi üzerinde etkisi olduğundan el yatırması, vakum infüzyon ve RTM gibi proseslerde etkili bir parametredir [20]. Hatta literatürdeki bazı çalışmalarda kompozit üretimine başlamadan önce reçineye “ön ısıtma” gibi işlemler uygulanmaktadır [21].

Bu çalışmada reçine, RTM'ye uygun düşük viskoziteli ve amaca yönelik bir polyeester olduğundan ön ısıtma yapılmadan ortam sıcaklığında enjeksiyona hazır hale getirilmiştir. Enjeksiyon sonunda, metal kalıba üstten 132–136 kPa'lık aralığında farklı kürleme basınçları (CP) uygulanmıştır. Daha sonra levhalar, sıcak kalıp içinde ve sabit basınç altında 22–48 saat aralığında kürlemeye tabii tutulmuştur. Böylece Tablo 2'de verilen farklı proses ve malzeme parametreleri kullanılarak 0.5×0.5 m boyutlarında toplam 10 adet kompozit levha üretilmiştir. Tablo 2'de görüldüğü gibi her levha, farklı kalınlık ve farklı fiber hacmine sahiptir.



Şekil 1. a) RTM proses şematigi, b) cam-dokumaların yerleştirilmesi ve kalıbın kapanışı

Her bir levha için kullanılan cam-dokuma katmanı altı adet olup, % olarak fiber hacim oranları (VF) denklem (1)'de verildiği gibi hesaplanmıştır [22].

$$VF = \frac{n A_w}{\rho_f t} 100 \quad (1)$$

Burada,  $n$ : katman sayısı (adet),  $A_w$ : bir katmandaki cam-dokumanın alansal ağırlığı ( $\text{kg/m}^2$ ),  $\rho_f$ : fiberlerin özgül ağırlığı ( $\text{kg/m}^3$ ) ve  $t$ : kalıptan çıkan levhanın kalınlığıdır

(m).

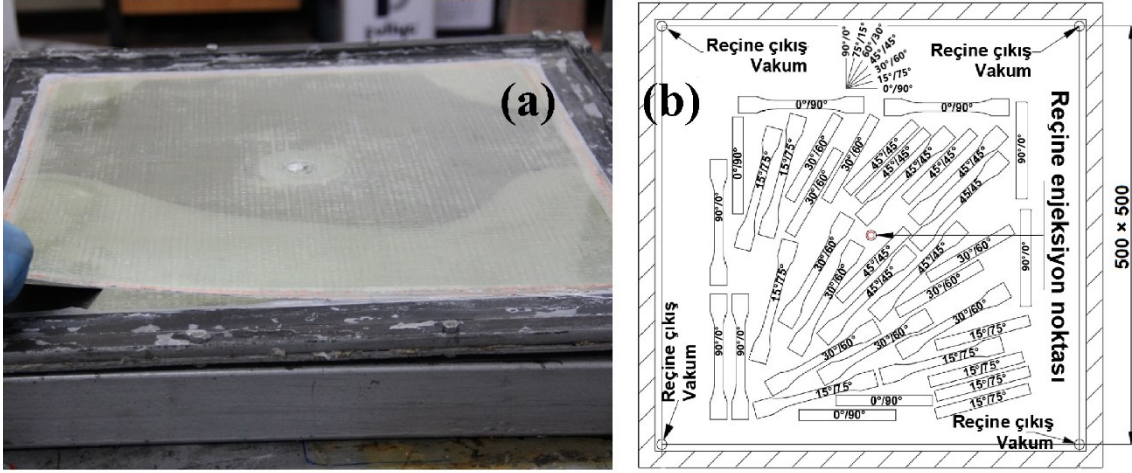
Tablo 2. Proses ve malzeme parametreleri ( $N=367$  adet veri)

Parametre, kısaltma (birim)	Levha no									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Enjeksiyon basıncı, IP (bar)	2.39	1.67	2.64	5.50	3.46	4.76	4.83	3.47	4.90	5.08
Enjeksiyon noktası, NIP (adet)	2	2	2	1	2	1	2	2	1	1
Kürleme basıncı, CP (kPa)	136	134	136	132	133	133	135	134	132	130
Ortam sıcaklığı, AT ( $^{\circ}\text{C}$ )	18.8	19.1	19.8	13.5	16.3	15.7	15.3	15.5	18.0	16.0
Fiber hacmi, VF (%)	44.3	44.0	43.9	42.8	41.7	41.6	41.2	40.5	38.1	37.2
Ort. levha kalınlığı, ST (mm)	2.71	2.73	2.73	2.81	2.87	2.87	2.93	2.97	3.13	3.22
Veri sayısı (N)	38	38	38	38	38	36	31	35	38	37

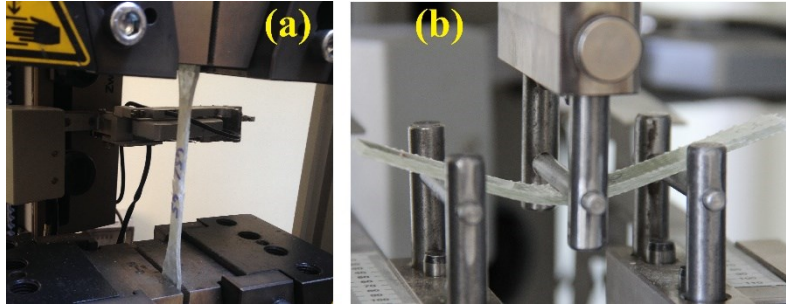
### 2.3. Çekme ve üç noktadan eğme testleri

Bu çalışmada üretilen kompozit levhalar, kürleme süresi sonunda Şekil 2(a)'da görüldüğü gibi kalıptan çıkarılmıştır. Kürlenmiş levhalardan  $\text{Ø}1.5$  mm kesici takımla CNC router ile Şekil 2(b)'de görüldüğü gibi  $0^{\circ}/90^{\circ}$ ,  $15^{\circ}/75^{\circ}$ ,  $30^{\circ}/60^{\circ}$  ve  $45^{\circ}/45^{\circ}$  yönlerinde, EN-ISO-527-4 standardına uygun olarak çekme numuneleri ( $20 \times 150$  mm) ve ASTM-D7264/D7264M standardına uygun olarak ise eğme numuneleri ( $13 \times 115$  mm) kesilmiştir [23, 24]. Şekil 3'de görüldüğü gibi toplam 367 adet numune çekme ve üç-noktadan eğme testlerine tabii tutularak sırasıyla; maksimum çekme mukavemeti ( $\sigma_{tu}$ ), elastisite modülü ( $E_t$ ), maksimum çekme deformasyonu ( $\epsilon_t$ ), maksimum eğilme mukavemeti ( $\sigma_{fu}$ ), eğilme modülü ( $E_f$ ) ve maksimum eğilme deformasyonu ( $\epsilon_f$ ) gibi mekanik özellikler elde edilmiştir. Çekme ve eğme testleri Zwick Roell Z250 (250 kN) marka test cihazı ile

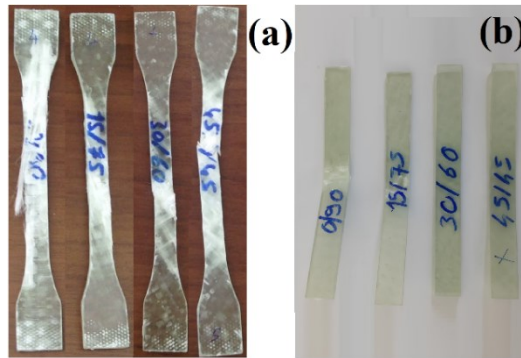
standartlara uygun olarak oda sıcaklığında ve 1 mm/dak hızda gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'de ise hasara uğrayan bazı numuneler görülmektedir.



Şekil 2. a) levhanın alt kalıptan çıkarılışı, b) numunelerin kesim yönleri



Şekil 3. a) çekme ve b) üç noktadan eğme testi



Şekil 4. (a) çekme ve (b) eğilme testi sonucu hasarına uğrayan bazı numuneler

#### 2.4. İstatistik analizler

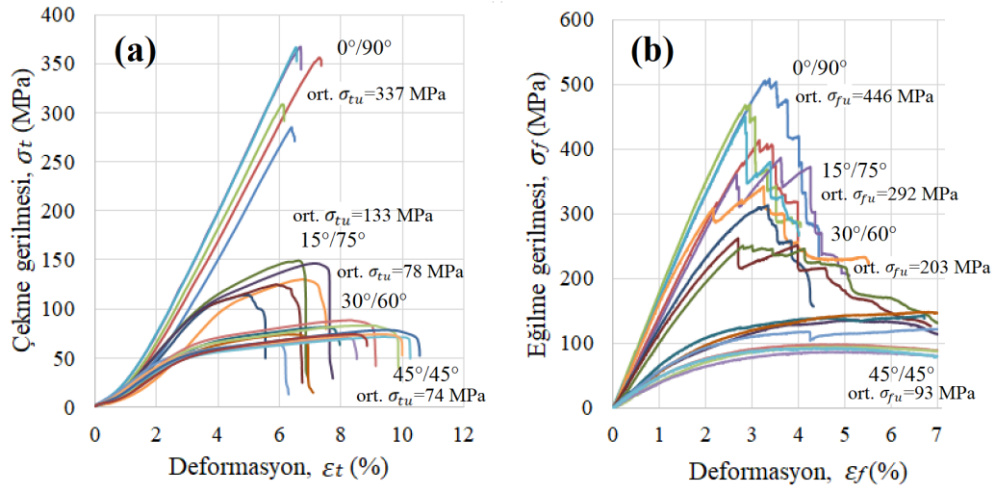
İstatiksel değerlendirmeye geçmeden önce bütün veriler “normallik ve varyansın homojenliği” açısından test edilmiştir. Mekanik özelliklerin proses ve malzeme parametreleriyle arasındaki iki yönlü ilişkilerin anlaşılabilmesi için önce Pearson korelasyon analizleri yapılmıştır. Daha sonra, istatistiksel olarak en etkili parametreler ile mekanik özellikler arasındaki regresyon denklemlerinin eldesi için Stepwise metodu ile çoklu regresyon analizleri yapılmıştır. Ayrıca, mekanik özelliklerdeki değişkenliği



sayısal olarak daha iyi anlayabilmek için mekanik özellikler ile onları en fazla etkileyen parametreler arasında üçlü kontur grafikleri çizilmiştir. Çekme testleri için 180 ve eğilme testleri için ise 187 adet veri analiz edilmiş olup çalışmada adı geçen istatistiksel analizler SPSS-24 yazılımı ile yapılmıştır.

### 3. Sonuçlar ve tartışma

Öncelikle, dört adet proses (IP, NIP, CP, AT) ve üç adet malzeme (ST, VF, FO) parametreleri ile altı adet mekanik özelliklere ( $\sigma_{tu}$ ,  $E_t$ ,  $\varepsilon_t$ ,  $\sigma_{fu}$ ,  $E_f$ ,  $\varepsilon_f$ ) ait veriler için normallik testleri yapılmıştır. Bütün verilerin çarpıklık (Skewness) ve basıklık (Kurtosis) değerleri -2 ile +2 aralığında olduğundan verilerin normal dağıldığı varsayılmıştır [25].



Şekil 5. Mukavemetleri en yüksek numunelere ait (a) çekme gerilmesi-deformasyon ve (b) eğilme gerilmesi-deformasyon eğrileri

Şekil 5(a) ve (b)'de hem çekme hem de eğilme mukavemeti ortalaması en yüksek seviyede elde edilen 1-nolu levhadan elde edilen numunelerin gerilme-deformasyon eğrileri görülmektedir. Tablo 2'deki parametrelere göre; enjeksiyon basıncı ve levha kalınlığı en düşük, fiber hacmi ve kütleme basıncı ise en yüksek seviyede olan numuneler 1-nolu levhadan elde edilmiştir. Özellikle fiber oryantasyonlarına göre mekanik özelliklerindeki değişim net görülmektedir. Kompozit laminatların anizotropik yapısı gereği doğal olarak mukavemet ve modül değerleri 0°/90° yönlerde en yüksek, 45°/45° yönlerde ise en düşük seviyededir. Farklı olarak, fiber oryantasyonu 0°/90° dan 45°/45°'e doğru değiştikçe deformasyon miktarlarının da arttığı görülmektedir. Hatta Şekil 4(c)'de görüldüğü gibi 45°/45° fiber oryantasyonundaki bazı numunelerin çok fazla deformasyona uğradığı, hasar gördüğü ancak nihai olarak kırılmadığı gözlenmiştir. 0°/90° fiber oryantasyonuna sahip numunelerin ortalama deformasyonları ise en düşük seviyededir.

#### 3.1. Mekanik özellikler ve parametreler arasındaki ilişkiler

Mekanik özelliklerle parametreler arasındaki ikili ilişkilere ait korelasyon değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Tablodaki bu rakamlar Pearson korelasyon katsayılarını ( $r$ ) göstermektedir. İki değişken arasında hesaplanan korelasyon katsayısının ( $r$ ) yorumu şöyledir:  $r < 0.20$  ve sıfıra yakın değerler ilişkinin olmadığı yada çok zayıf ilişkiyi,  $r = 0.21 - 0.40$  arasında ise zayıf ilişkiyi,  $r = 0.41 - 0.60$  arasında ise orta düzeyde ilişkiyi,  $r = 0.61 - 0.80$  arasında ise yüksek düzeyde ilişkiyi ve  $r = 0.81 - 1.0$  ise çok yüksek ilişkiyi ifade eder

[26]. Ayrıca korelasyon katsayılarının önündeki işarete bakarak mekanik özellikleri hangi yönde (pozitif veya negatif) etkiledikleri anlaşılabilir. Parametreler ile ilişkili olarak mekanik özelliklere ait test verilerinin saçılımına en uygun lineer regresyon denklemleri çıkarılmıştır (Tablo 4). Daha sonra Şekil 6’da, mekanik özellikler üzerinde etkili olan parametrelerin etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi adına için kontur grafikler çizilmiştir.

Tablo 3. Mekanik özellikler ile parametreler arasındaki iki yönlü korelasyon katsayıları

	IP (bar)	NIP (adet)	CP (kPa)	AT (°C)	VF (%)	ST (mm)	FO (°)
$\sigma_{tu}$ (MPa)	-0.153*	0.129	0.156*	0.149*	0.136	0.089	-0.841**
$E_t$ (MPa)	-0.071	0.145	0.062	0.042	0.059	0.063	-0.813**
$\varepsilon_t$ (%)	-0.576**	0.569**	0.568**	0.485**	0.399**	-0.215**	0.440**
$\sigma_{fu}$ (MPa)	-0.118	0.119	0.115	0.113	0.036	-0.391**	-0.897**
$E_f$ (MPa)	-0.024	0.034	0.057	0.023	0.058	-0.433**	-0.898**
$\varepsilon_f$ (%)	-0.153*	0.087	0.136	0.175*	0.038	0.195**	0.670**

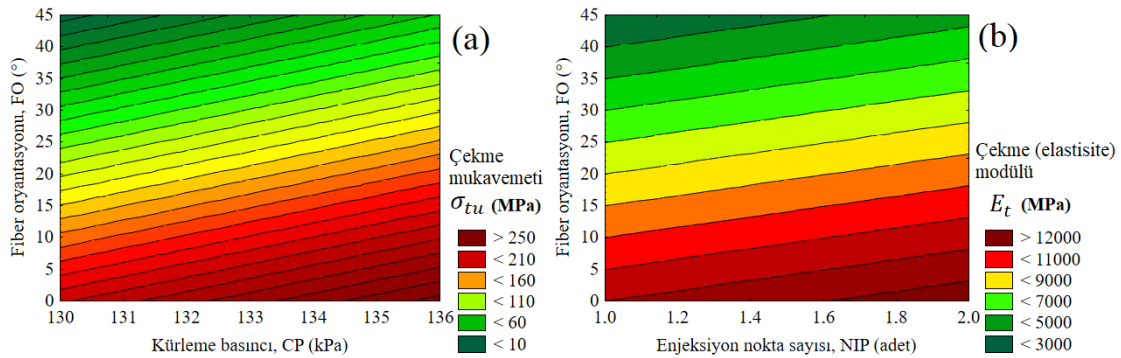
\*\*Pearson korelasyonu  $P < 0.01$  düzeyinde ve \* $P < 0.05$  düzeyinde anlamlıdır (2-yönlü). IP (bar): enjeksiyon basıncı, NIP (adet): enjeksiyon noktası sayısı, CP (kPa): kürlleme basıncı, AT (°C): ortam sıcaklığı, VF (%): fiber hacmi, ST (mm): plaka kalınlığı, FO (°): fiber oryantasyonu.

Her ne kadar Tablo 3’deki korelasyonlarda bazı mekanik özellikleri fazlaca etkileyen parametreler olduğu görülse de esasen çoklu regresyon analizinde hepsinin aynı anda ilgili lineer regresyon denklemlerine girecek kadar etkili olmadığı anlaşılabilir. Örneğin ilk bakışta Tablo 3’deki ikili ilişkilere göre;  $\varepsilon_t$ ’nin sırasıyla 7 adet parametreden de pozitif veya negatif yönde, zayıf, orta veya yüksek düzeyde etkilendiği (\*\*) görülmektedir. Buna rağmen, Tablo 4’deki çoklu regresyon analizine göre anlamlı olup denklemlerde yerini alan etkili parametrelerin sadece FO, NIP ve IP olduğu anlaşılmaktadır.

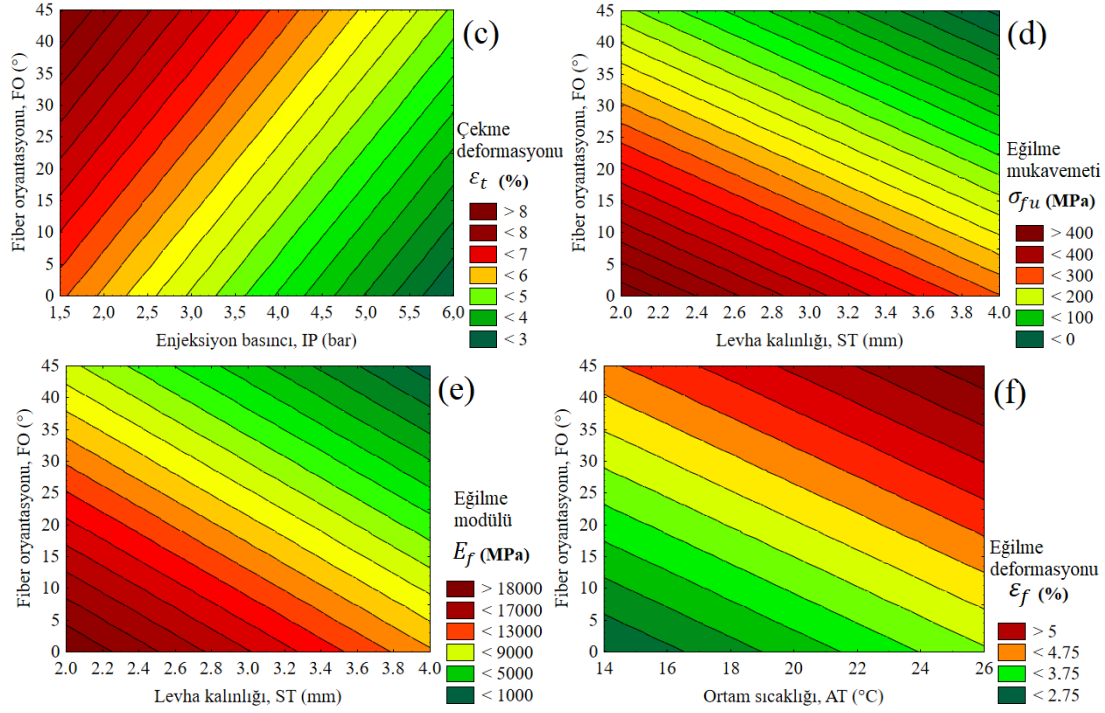
Tablo 4. Mekanik özellikleri ile parametreler arasındaki regresyon denklemleri

Mekanik özellikler	Regresyon denklemleri*	df (reg)	df (top)
Çekme mukavemeti (MPa)	$\sigma_{tu} = 237 - 4.39 \text{ FO}$	1	179
Çekme modülü (MPa)	$E_t = 10363 - 195.1 \text{ FO} + 1521 \text{ NIP}$	2	179
Çekme deformasyonu (%)	$\varepsilon_t = 5.281 + 0.042 \text{ FO} + 0.785 \text{ NIP} - 0.498 \text{ IP}$	3	179
Eğilme mukavemeti (MPa)	$\sigma_{fu} = 625 - 6.434 \text{ FO} - 85.01 \text{ ST}$	2	183
Eğilme modülü (MPa)	$E_f = 26075 - 241.2 \text{ FO} - 3617 \text{ ST}$	2	183
Eğilme deformasyonu (%)	$\varepsilon_f = 1.297 - 0.046 \text{ FO} + 0.095 \text{ AT}$	2	181

\* Regresyon denklemleri birkaç uç değer çıkarılarak elde edilmiştir ve  $P < 0.01$  düzeyinde anlamlıdır. Sınır şartlar:  $0 \leq \text{FO} \leq 45$ ,  $1 \leq \text{NIP} \leq 2$ ,  $1.67 \leq \text{IP} \leq 5.5$ ,  $2.21 \leq \text{ST} \leq 3.86$







Şekil 6. Mekanik özellikler üzerinde en etkili olan parametreler için kontur grafikler

Tablo 3'deki korelasyon ve Tablo 4'deki çoklu lineer regresyon sonuçları ile birlikte Şekil 6'daki kontur grafikleri aynı anda analiz edildiğinde, mekanik özelliklerin değişkenliği üzerindeki en etkili olan FO, CP, NIP, IP, ST ve AT parametreleri aşağıdaki şekilde yorumlanmıştır.

### 3.1.1. Fiber oryantasyonunun (FO) etkisi

Dokuma-kumaş elyaf kullanılan polimer kompozitlerde fiber oryantasyonu  $0^\circ/90^\circ$  den  $45^\circ/45^\circ$  doğru değiştikçe mukavemet değerleri de ciddi oranda azalmaktadır [7]. Şekil 5, Tablo 3-4 ve Şekil 6 (a, b, c, d, e ve f)'de de görüldüğü gibi elyaf takviyeli polimer kompozitlerin yapısı gereği fiber oryantasyonu (FO), incelenen bütün mekanik özellikler üzerinde en etkili parametredir. Maksimum mukavemetler ( $\sigma_{tu}$ ,  $\sigma_{fu}$ ) ile modüller ( $E_t$ ,  $E_f$ ) üzerinde FO ters yönde (-) etkili iken deformasyonlar ( $\epsilon_t$ ,  $\epsilon_f$ ) üzerinde ise pozitif yönde (+) etkilidir.

### 3.1.2. Kürlleme basıncının (CP) etkisi

Kürlleme basıncı uygulaması ve basıncın artmasıyla birlikte laminat içindeki hava boşlukları azaldığı için mukavemet ve modül değerlerini de artmaktadır. Literatürdeki bazı çalışma sonuçlarında da ifade edildiği gibi uygun enjeksiyon basıncının seçilmesi ve reçine transfer kalıplama işlemi sonrası kürlleme basıncı (CP) uygulamasının, elde edilen parçaların mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir [27]. Regresyon denkleminde yansımasa da Tablo 3 ve özellikle Şekil 6(a)'ya incelendiğinde, kürlleme basıncının (CP) artması ( $\uparrow$ ), başta çekme mukavemeti ( $\sigma_{tu}$ ) ve çekme deformasyonu ( $\epsilon_t$ ) olmak üzere mekanik özellikleri zayıf düzeyde de olsa arttırdığı ( $\uparrow$ ) anlaşılmaktadır.

### 3.1.3. Enjeksiyon nokta sayısının (NIP) etkisi

Kompozit kalitesi için kullanılan fiberlerin boyutu ve oranı ile birlikte enjeksiyon noktasının yeri ve sayısı, kalıp tasarımında hayati bir rol oynamaktadır [28]. Enjeksiyon noktalarının sayısı arttıkça fiberlerin tam ıslanması için gereken enjeksiyon basıncı azalır. Örneğin, dört enjeksiyon noktası konfigürasyonunda tam ıslatma elde etmek için 3.4 bar'lık bir enjeksiyon basıncı gerekirken, tek bir nokta konfigürasyonu için bu değer 11.4 bar'dır [29]. Enjeksiyon basınçlarının azaltılması hem güvenlik hem de ekipman açısından arzu edilen bir durumdur. Bu nedenle birden fazla enjeksiyon noktasının kullanılması avantajlıdır [29]. Bu çalışmada da enjeksiyon noktasının birden ikiye çıkmasıyla, enjeksiyon süresinin azaldığı cam-dokumalar içindeki hava boşluklarının hızlıca uzaklaştırılıp iyi ıslanma sağladığı gözlenmiştir. Dolayısıyla Tablo 4 ve Şekil 6(b)'de görüldüğü gibi enjeksiyon nokta sayısının (NIP) artması ( $\uparrow$ ), çekme modülü ( $E_t$ ) ve çekme deformasyonunu ( $\varepsilon_t$ ) arttırmıştır ( $\uparrow$ ).

### 3.1.4. Enjeksiyon basıncının (IP) etkisi

Genel itibariyle RTM ve VARTM gibi tam-kapalı veya yarı-kapalı reçine enjeksiyon proseslerinde enjeksiyon basıncının artması ile laminat içinde hava boşlukları da artmaya başlamaktadır. Bu durumda ise kompozit parça mukavemeti de orantılı olarak düşmektedir. Bazı literatür çalışmalarında, RTM prosesinde hava boşluklarını minimum seviyede tutan ideal enjeksiyon basıncı 3.43 bar olarak tespit edilmiştir [30, 31]. Bu çalışmada ise Tablo 2'den de anlaşılacağı gibi ideal enjeksiyon basıncının 2.39 bar olduğu söylenebilir. Tablo 4'deki regresyon denkleminde görüldüğü gibi enjeksiyon basıncı, çekme deformasyonu ( $\varepsilon_t$ ) üzerinde negatif (-) yönde etkilidir. Her ne kadar regresyon denkleminde yansımaya da Tablo 3 ve Şekil 6(c)'ye göre enjeksiyon basıncının (IP) artması ( $\uparrow$ ), bütün mekanik özellikleri zayıf düzeyde de olsa düşürdüğü ( $\downarrow$ ) görülmektedir.

### 3.1.5. Levha kalınlığının (ST) etkisi

Elyaf takviyeli kompozitlerin mukavemetinin artan numune kesiti veya boyutu ile azalma eğiliminde olduğu iyi bilinmektedir ve buna "kesit veya boyut etkisi" denilmektedir [32, 33]. RTM prosesiyle ilgili yapılan çalışmalarda da, imal edilen kompozit levha kalınlığı arttıkça parça mukavemetinin azaldığı görülmüştür [34]. Ayrıca levha kalınlığının artması, kompozit yapıya ekstra ağırlık eklediği gibi ara yüzey kusurlarında da artışa ve delaminasyona yol açabilmektedir [35]. Literatürdeki çalışmalarda; kompozit eğilme mukavemetinin, kullanılan reçine tipinin yanında nihai laminat kalınlığına bağlı olduğu [36], levha kalınlığı azaldıkça eğilme mukavemeti ve modülünün arttığı [37], hatta daha ince katmanların laminatın mekanik performansını arttırdığı tespit edilmiştir [38]. Bu çalışmada da Tablo 3-4 ve Şekil 6(d-e)'de görüldüğü gibi, levha kalınlığının (ST) artması ( $\uparrow$ ) anlamlı düzeyde ( $P < 0.01$ ) özellikle eğilme mukavemeti ( $\sigma_{fu}$ ) ve eğilme modülünü ( $E_f$ ) düşürmüştür ( $\downarrow$ ).

### 3.1.6. Ortam sıcaklığının (AT) etkisi

Reçine transferiyle kalıplama (RTM), vakum destekli reçine infüzyonu (vakum torbalama, VARTM) yöntemi gibi kalıplama ve otoklav gibi kütleme işlemlerinde kalıp ve ortam sıcaklığının artması reçine viskozitesini düşürüp akışkanlığı kolaylaştırır. Kalıba ısı uygulaması veya ortam sıcaklığının artması reçine akışı ve elyafın ıslanmasını kolaylaştırdığı gibi laminatın doldurulma süresi de azalır [20, 39, 40]. Yaklaşık 40-60 °C arasındaki sıcaklık olumlu etki göstererek laminat içindeki hava boşluklarını azaltır, fiberlerin iyi ıslanmasını sağlar, nihai ürünün fiber hacmini arttırıp kalınlığını da azaltarak mekanik özellikleri iyileştirir [20, 40]. Doymamış polyeester ve epoksi reçinelerin kullanıldığı uygulamalarda optimal ortam sıcaklığı sırasıyla 24 °C ve 31 °C, kalıp

doldurma sıcaklığı ise her iki reçine için de 40-60 °C'dir [41, 42]. Bu çalışmada da benzer şekilde AT ile ST'nin ikili korelasyon analizi yapıldığında, çekmede -0.214\*\* eğilme de ise -0.205\*\* katsayıları elde edilmiş ve ortam sıcaklığının artması ile levha kalınlığının düştüğü görülmüştür. Levha kalınlığının düşmesi ise mukavemet ve modül gibi mekanik özellikleri arttırdığı gibi eğilme deformasyonunu da arttırmaktadır. Bu nedenle ortam sıcaklığının (AT) artması (↑), regresyon denkleminde girecek seviyede eğilme deformasyonunu anlamlı düzeyde ( $P<0.01$ ) arttırmıştır (↑).

Bu analizlerdeki en dikkat çekici durum ise fiber hacminin (VF) etkisinin dikkate alınmamasıdır. Normalde fiber hacim oranının artması kompozitlerin mekanik özelliklerini pozitif yönde etkilediği bilinmektedir [43, 44]. Ancak, bu çalışmadaki analizler çoklu regresyon ve ortalamaların çoklu karşılaştırılması, yani birbirini etkileyen parametrelerin de analizi esasına dayanmaktadır. Fiber hacmi ile levha kalınlığı arasındaki ilişkiyi anlamak için regresyon analizi yapıldığında; çekmede  $ST=5.82-0.069VF$ , eğilmede  $ST=5.92-0.074VF$  şeklinde yüksek düzeyde anlamlı ( $P<0.01$ ) denklemler elde edilir. Dolayısıyla fiber hacminin artması levha kalınlığını düşürdüğü gibi istatistiksel analizlerde levha kalınlığı fiber hacminden daha etkili bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Sonuç olarak RTM yöntemiyle kompozit levha üretimindeki bazı proses parametreleri, fiber-matris malzemelerinin farklı özellikleri ve çalışma ortamına bağlı birçok değişkenin varlığı nihai ürünün temel mekanik özellikleri üzerinde çoklu seviyede etkili olmaktadır. Bu durumda kompozit levhalardaki olumlu/olumsuz değişkenlerin bu çalışmada olduğu gibi istatistiksel olarak karakterize edilmesi en mantıklı yoldur [32]. Çalışma sonunda, Şekil 5(a) ve (b)'de görüldüğü gibi ortalama çekme mukavemeti 337 MPa ve ortalama eğilme mukavemeti 446 MPa olarak elde edilen 1-nolu levha en ideal levha olarak tercih edilebilir.

## Kısaltmalar

Kısaltma	İngilizce	Türkçe
RTM	Resin transfer molding	Reçine transferiyle kalıplama
VARTM	Vacuum assisted resin transfer molding	Vakum destekli reçine infüzyonu (vakum torbalama)
FRP	Fiber reinforced polymer composite	Elyaf takviyeli polimer kompozit
GFRP	Glass fiber reinforced polymer composite materials	Cam elyaf takviyeli polimer kompozit malzeme
CFRP	Carbon fiber reinforced polymer composite materials	Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit malzeme
WR	Woven roving	Dokuma fitil
IP	Injection pressure	Enjeksiyon basıncı
NIP	Number of injection points	Enjeksiyon noktası sayısı
CP	Curing pressure	Kürleme basıncı
AT	Ambient temperature	Ortam sıcaklığı
FO	Fiber orientation	Fiber oryantasyonu
ST	Sheet thickness	Levha kalınlığı
VF	Fiber volume fraction	Fiber hacim oranı

**Kaynaklar**

- [1] Gao G., ve Li Y., Mechanical properties of woven glass fiber-reinforced polymer composites, **Emerging Materials Research**, 5, 2, 201-208, (2016).
- [2] Rajak D.K., Pagar D.D., Kumar R., ve Pruncu C.I., Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials, **Journal of Materials Research and Technology**, 8, 6, 6354-6374, (2019).
- [3] Rajak D.K., Pagar D.D., Menezes P.L., ve Linul E., Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications, **Polymers**, 11, 10, 1667-1704, (2019).
- [4] Diniță A., Ripeanu R.G., Ilincă C.N., Cursaru D., Matei D., Naim R.I., Tănase M., ve Portoacă A.I., Advancements in Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Comprehensive Analysis, **Polymers**, 16, 1, 2-50, (2023).
- [5] Karim M.A., Abdullah M.Z., Deifalla A.F., Azab M., ve Waqar A., An assessment of the processing parameters and application of fibre-reinforced polymers (FRPs) in the petroleum and natural gas industries: A review, **Results in Engineering**, 18, 101091, 1-20, (2023).
- [6] Zhang W., ve Evans K.E., Numerical prediction of the mechanical properties of anisotropic composite materials, **Computers & structures**, 29, 3, 413-422, (1988).
- [7] Seshaiyah T., ve Reddy V.K., Effect of fiber orientation on the mechanical behavior of e-glass fibre reinforced epoxy composite materials, **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development**, 8, 8, 379-396, (2018).
- [8] Kumar N., ve Singh A., Study the effect of fiber orientation on mechanical properties of bidirectional basalt fiber reinforced epoxy composites, **Materials Today: Proceedings**, 39, 1581-1587, (2021).
- [9] Sayam A., Rahman A.M., Rahman M.S., Smriti S.A., Ahmed F., Rabbi M.F., Hossain M., ve Faruque M.O., A review on carbon fiber-reinforced hierarchical composites: mechanical performance, manufacturing process, structural applications and allied challenges, **Carbon Letters**, 32, 5, 1173-1205, (2022).
- [10] Fu Y., ve Yao X., A review on manufacturing defects and their detection of fiber reinforced resin matrix composites, **Composites Part C: Open Access**, 8, 100276, 1-24, (2022).
- [11] Mishra R.K., Petru M., Behera B.K., ve Behera P.K., 3D woven textile structural polymer composites: effect of resin processing parameters on mechanical performance, **Composite Interfaces**, 31, 1, 1-28, (2022).
- [12] Örcen G., Turan K., ve Bingöl S., Mechanical properties of composite plates at different conditions, **European Journal of Technique**, 10, 1, 13-24, (2020).
- [13] Karbhari V., Slotte S., Steenkamer D., ve Wilkins D., Effect of material, process, and equipment variables on the performance of resin transfer moulded parts, **Composites Manufacturing**, 3, 3, 143-152, (1992).
- [14] Kim J.-H., Kwon D.-J., Shin P.-S., Beak Y.-M., Park H.-S., DeVries K.L., ve Park J.-M., Interfacial properties and permeability of three patterned glass fiber/epoxy composites by VARTM, **Composites Part B: Engineering**, 148, 61-67, (2018).
- [15] <https://plasto.com.tr/wp-content/uploads/2023/05/POLIPOL-336-RTM-Tipi-Polyester-Recine-tds.pdf>, (25.04.2024).
- [16] Subaşı A., Reaktif termoplastik reçine ile sürekli elyaf takviyeli kompozit üretilmesi ve alev geciktiricilerin etkilerinin tespiti, Y.Lisans Tezi, İstanbul

- Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği ABD, İstanbul, (2017).
- [17] Kaynak C., ve Kas Y.O., Effects of injection pressure in resin transfer moulding (RTM) of woven carbon fibre/epoxy composites, **Polymers and Polymer Composites**, 14, 1, 55-64, (2006).
- [18] Han S.H., Cho E.J., Lee H.C., Jeong K., ve Kim S.S., Study on high-speed RTM to reduce the impregnation time of carbon/epoxy composites, **Composite Structures**, 119, 50-58, (2015).
- [19] Chang C.-Y., Hourng L.-W., ve Chou T.-Y., Effect of Process Variables on the Quality of Compression Resin Transfer Molding, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, 25, 10, 1027-1037, (2006).
- [20] Hickey C., The influence of variation in process parameters on the manufacturing of advanced fibre composites, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of Auckland, (2014).
- [21] Lee C.L., ve Wei K.H., Effect of material and process variables on the performance of resin-transfer-molded epoxy fabric composites, **Journal of Applied Polymer Science**, 77, 10, 2149-2155, (2000).
- [22] Olodu D.D., ve Ihenyen O., Fibre Volume Fraction and Impact Strength Analysis of Reinforced Polyester Composites, **European Mechanical Science**, 5, 2, 80-85, (2021).
- [23] EN-ISO-527-4, Plastics - Determination of tensile properties - Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites, CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland, 2021.
- [24] ASTM-D7264/D7264M, Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Pennsylvania 19428-2959, USA, 2007.
- [25] George D., ve Mallery P., SPSS for windows step by step: A simple study guide and reference, 17th ed., New York: Allyn & Bacon, (2010).
- [26] Landis J.R., ve Koch G.G., The measurement of observer agreement for categorical data, **Biometrics**, 159-174, (1977).
- [27] Olivero K.A., Barraza H.J., O'Rear E.A., ve Altan M.C., Effect of injection rate and post-fill cure pressure on properties of resin transfer molded disks, **Journal of Composite Materials**, 36, 16, 2011-2028, (2002).
- [28] Salokhe S., Rahmati M., ve Masoodi R., Numerical modelling of the flow in a swelling preform during LCM mould filling, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, 40, 13-14, 490-504, (2021).
- [29] Jeswani A., ve Roux J., Numerical modelling of design parameters for manufacturing polyester/glass composites by resin injection pultrusion, **Polymers and Polymer Composites**, 14, 7, 651-670, (2006).
- [30] Vengalrao K., Kumar K.P., Shanker D.V.R., Srinivasababu N., ve Yadav A.K.K., An Investigation on the Quality of the Laminates Produced by VARTM Process and Process parameters, **Materials Today: Proceedings**, 4, 8, 9196-9202, (2017).
- [31] Kopparthi P.K., Kundavarapu V.R., Dasari V.R., ve Pathakokila B.R., Determination of flow front velocity and optimal injection pressures for better impregnation of E-glass with polyester in resin transfer mold, **INCAS Bulletin**, 11, 3, 87-98, (2019).
- [32] Wisnom M.R., The effect of specimen size on the bending strength of unidirectional carbon fibre-epoxy, **Composite Structures**, 18, 1, 47-63, (1991).
- [33] Fortin-Simpson J., Effect of Thickness and Ply Orientation on the Flexural Bending Behaviour of Thick Composite Laminates, MSc Theses, The Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University, (2019).

- [34] Wang Y., ve Soutis C., Modelling the effect of tufted yarns in composite T-joints, **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering and Computational Mechanics**, 169, 4, 158-170, (2016).
- [35] Naresh K., Alia R.A., Cantwell W.J., Umer R., ve Khan K.A., Influence of face sheet thickness on flexural strength characteristics of carbon/epoxy/Nomex honeycomb sandwich panels, **Journal of Sandwich Structures & Materials**, 25, 5, 537-554, (2023).
- [36] Babukiran B., ve Harish G., Influence of resin and thickness of laminate on flexural properties of laminated composites, **International Journal of Engineering Science and Innovative Technology**, 3, 1, (2014).
- [37] Kumar M.S., Krishna S.G., ve Rajanna S., Study on effect of thickness and fibre orientation on a tensile and flexural properties of a hybrid composite, **Int J Eng Res Appl**, 4, 8, 56-66, (2014).
- [38] Liu H., Ma X., Jiang L., Sang L., Hou W., Zhang Z., ve Wu H., Effect of ply thickness on tensile and bending performances of carbon fiber reinforced thermoplastic unidirectional laminate, **Polymer Composites**, 44, 3, 1889-1901, (2023).
- [39] Da Gama M., ve Soares C.M., Defects tracking in Out-of-Autoclave composite materials, MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Porto, (2017).
- [40] Kedari V.R., Farah B.I., ve Hsiao K.-T., Effects of vacuum pressure, inlet pressure, and mold temperature on the void content, volume fraction of polyester/e-glass fiber composites manufactured with VARTM process, **Journal of composite materials**, 45, 26, 2727-2742, (2011).
- [41] Cairns D.S., Shramstad J.D., ve Mandell J.F. Evaluation of hand lay-up and resin transfer molding in composite wind turbine blade manufacturing, **Proceedings, 20th 2001 ASME Wind Energy Symposium.**, American Institute of Aeronautics & Astronautics, Reno, NV, USA, (2001).
- [42] Yu H.-W., ve Young W.-B., Optimal design of process parameters for resin transfer molding, **Journal of Composite Materials**, 31, 11, 1113-1140, (1997).
- [43] Oleiwi J.K., Al-Hassani E.S., ve Abd Mohammed A., Experimental Investigation and Mathematical Modeling of Tensile Properties of Unsaturated Polyester Reinforced by Woven Glass Fibers, **Eng. & Tech. Journal**, 32, 3, 653-666, (2014).
- [44] Jariwala H., Jain P., ve Maisuriya V., Experimental and statistical analysis of strength of glass fiber reinforced polymer composite for different fiber architecture, **Polymer Composites**, 42, 3, 1407-1419, (2021).