



Çift-yönlü dokuma kumaş takviyeli kompozit levhalarda mekanik özelliklerin anizotropiye bağlı değişimi ve optimum laminasyon tasarımı önerisi

Variation in mechanical properties with anisotropy and proposal for optimal design of lamination in bidirectional woven fabric reinforced composite sheets

Raif Sakin^{1,2*}

¹Balıkesir Üniversitesi Edremit Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, rsakin@balikesir.edu.tr

²Balıkesir Üniversitesi, Kompozit Araştırma Eğitim-Simülasyon Uygulama ve Araştırma Merkezi

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6009-9573>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 12 Nisan 2024
Revizyon 10 Temmuz 2024
Kabul 11 Temmuz 2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

kompozit levha, laminasyon tasarımı, istifleme sırası, mekanik özellikler, anizotropi

ÖZ

Bu çalışmanın ilk amacı, çift-yönlü dokuma kumaş takviyeli kompozit levhalarda mekanik özelliklerin anizotropiye bağlı değişimini incelemektir. Diğer amaç ise kompozit levha üretiminde mekanik özelliklere ve anizotropiye dayalı optimum laminasyon tasarımını (istifleme sırası) belirlemede kullanılabilecek grafiksel bir yöntemi açıklamaktır. Bu amaçlar için gerekli levhaların imalatında reçine transfer kalıplama yönteminden yararlanılmıştır. Matris ve fiber malzeme olarak sırasıyla, düşük viskoziteli ticari bir polyeester reçine ile dört farklı alansal yoğunluğa sahip çift-yönlü düz cam-dokuma kumaşlar kullanılmıştır. Her bir levhada kullanılan fiber ağırlığı 750 g ve levhanın merkezinden geçen orta-düzleme göre simetrik olmak şartıyla on farklı laminasyon tasarımı denenmiştir. İmalat prosesi sonunda kalıptan 50 × 50 cm boyutlarında farklı katman sayısı, farklı kalınlık ve fiber hacimlerine sahip olan kompozit levhalar elde edilmiştir. Levhalardan 0°, 15°, 30° ve 45° yönlerinde standartlara uygun numuneler kesilerek, bunların çekme ve eğilme gibi mekanik özellikleri test edilmiştir. Ayrıca, her bir levhanın laminasyon tasarımı ve fiber oryantasyonuna bağlı olarak mekanik anizotropi faktörleri hesaplanmıştır. Toplam 365 adet numune test edilmiş ve veriler SPSS-24 yazılımıyla istatistik olarak analiz edilmiştir. Mekanik özelliklerin tahmini için fiber hacmi, katman sayısı, levha kalınlığı ve fiber oryantasyonu gibi değişkenlere bağlı olarak regresyon denklemleri elde edilmiştir. Bütün çekme, eğilme mukavemeti ve modül verileri MS-Excel'e taşınarak radar (spider) grafikleri çizilmiş ve bu grafikler okunarak optimum laminasyon tasarımları önerilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 April 2024
Received in revised form 10 July 2024
Accepted 11 July 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

composite sheet, laminate design, stacking sequences, mechanical properties, anisotropy

Doi: [10.24012/dumf.1467637](https://doi.org/10.24012/dumf.1467637)

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

The first aim of this study is to investigate the variation in the mechanical properties with the anisotropy of bidirectional woven fabric-reinforced composite sheets. The other aim is to describe a graphical method that can be used to determine the optimum lamination design (stacking sequences) based on the mechanical properties and anisotropy in composite sheet production. The resin transfer molding method was used to manufacture the plates required for these purposes. Composite sheets were fabricated using low-viscosity commercial polyester resin as the matrix and bidirectional woven glass fabrics with four different areal densities as the fibers. It was tested ten different lamination designs, which were symmetric about the mid-plane, and the total fiber weight of the sheets was 750 g. Composite sheets of dimensions 50 × 50 cm with different numbers of layers, thicknesses, and fiber volumes were produced at the end of the process. Standard specimens were cut from the sheets in the 0°, 15°, 30°, and 45° directions, and their mechanical properties, such as tensile and flexural properties, were tested. In addition, the mechanical anisotropy factors were calculated for each sheet, depending on the lamination design and fiber orientation. SPSS-24 software was used to statistically analyze the data from a total of 365 specimens. Regression equations were obtained to predict the mechanical properties based on variables such as fiber volume, number of layers, sheet thickness, and fiber orientation. All tensile, flexural, and modulus data were transferred to MS Excel, and spider graphs were drawn. The optimum lamination designs were suggested by reading these graphs.

Giriş

Üretim teknolojisinde kullanılan elyaf (fiber) takviyeli polimer (FRP) kompozitler ve kullanım alanları gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. FRP'ler uygulama yerine bağlı olarak birçok önemli özelliğe sahip olmaları nedeniyle savunma, havacılık ve otomotiv sanayi başta olmak üzere, deniz, kara araçları ile inşaat ve enerji sektörlerinde de oldukça yaygın kullanılmaktadır [1-3]. Düşük özgül ağırlıkları nedeniyle tüm FRP kompozitlerin en önemli avantajı, metal ve alaşımları dahil bilinen geleneksel bir çok malzemeye göre daha hafif, daha yüksek mukavemet/ağırlık ve modül/ağırlık oranlarına sahip olmalarıdır [4]. FRP'ler bahsedilen yüksek mekanik özellikleri yanında, kontrol edilebilir elektrik iletkenliği, düşük termal genleşme katsayısı, iyi yorulma direnci ve karmaşık şekilli malzemelerin üretimi için uygunluk gibi birçok mükemmel özelliğe de sahiptir. Bu üstün özellikleri sayesinde FRP'ler birçok uygulamada metallerin yanı sıra ahşap, plastik veya alüminyum gibi bilinen malzemelerin de alternatifi haline gelmiştir. FRP'lerin temelini oluşturan bileşenlerden karbon, kevlar, bor ve cam gibi elyaflar, hafif, ısıya dayanıklı ve mukavemeti yüksek malzemelerdir. Mukavemet özellikleri karbon ve kevlara kıyasla daha düşük olsa da, cam elyafı daha az kırılğan ve daha ekonomiktir. Cam elyafının dokunmasıyla elde edilen tek veya çift yönlü kumaşlarla takviyeli polimer kompozitler (GFRP) ise maliyet dahil bahsedilen fiziksel ve mekanik özelliklerin iyi bir kombinasyonunu oluşturur. Bu nedenle GFRP'ler özellikle gıda ve kimyasal ürün depolama tankları, silolar, ulaştırma (otomotiv, tren, tekne, yat, uçak, vb.), elektrik-elektronik ve alt-üst yapı (köprü, bina, profil, boru, vb.) sektörlerinin vazgeçilmezi haline gelmiştir [5-8]. Ancak bütün bu olumlu özelliklerine rağmen, genel olarak FRP'ler anizotropik ve heterojen yapılarından dolayı mekanik özellikleri fiber oryantasyonu ve laminasyon tasarımına bağlı olarak ciddi oranda azalma göstermektedir [9]. Bu olumsuzluğun en aza indirilmesi için GFRP laminatların tasarım çeşitliliğinden faydalanılır. Örneğin, bir laminatta birden fazla katman ve elyaf yapısı kullanılabilir. Elyaflar herhangi bir yöndeki yüke dayanacak şekilde yerleştirilebilir veya son ürün farklı oryantasyonlarda kesilerek amaca uygun olarak kullanılabilir. Böylece izotropik malzemelerde olduğu gibi "her yönde eşit mukavemet yerine GFRP'lerde istenilen yönde mukavemet" elde edilerek olumsuzluk azaltılabilir. Literatürde elyaf ve dokuma cinsi, istifleme sırası, katman sayısı ve fiber oryantasyonunun kompozit levhaların mekanik özelliklerine olan etkileri üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır [10-14]. Buna rağmen tasarım parametreleri ve elde edilen optimum değerler çok sınırlıdır [15]. Çok sayıda tasarım değişkeninin dahil olmasından dolayı, çeşitli kısıtlamalara sahip kompozit laminatların istifleme dizisi veya tabaka sayısı tasarımı için "etkili, verimli, amaca uygun ve basit optimizasyon algoritmaları oluşturmak" halen önemini koruyan konulardan biridir [16]. Bu konuda çok sayıda kombinasyondan oluşan gerçek test sonuçlarına dayalı deneysel ve istatistiksel çalışmalar oldukça zahmetli, pahalı ve zaman alıcı olması nedeniyle sayıca azdır. Bu nedenle literatürde genellikle gerçek test kombinasyonlarını azaltmaya, ideal kombinasyonları bulmaya veya doğrulamaya yönelik istatistiksel (simülasyon) deney

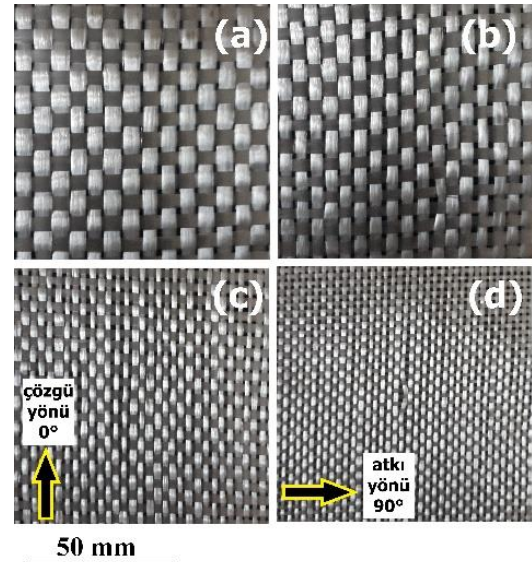
tasarımları yapılmaktadır [11]. Bu kapsamda; epoksi veya polyester matrisli çift yönlü cam, karbon, kevlar, bor elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerine ilişkin laminat tasarım optimizasyonları Taguchi, yanıt yüzey (RSM) ve genetik algoritma gibi yöntemler kullanılarak yapılmıştır [1,17-25].

Bu çalışmada ise literatürden farklı olarak, istatistiksel analiz ve optimizasyonda kombinasyonları azaltmak için herhangi bir modele uymak veya bir deney tasarımı kullanmak yerine gerçek test verileri kullanılmıştır. Test verileri anlaşılabilir basit grafiklere dökülmüş ve bu grafiklerin okunmasıyla, en olumlu veya olumsuz laminasyon tasarımlarının anlaşılabilirliği bir yöntem sunulmuştur. Ayrıca elde edilen 365 adet test verisi SPSS-24 yazılımıyla analiz edilerek; fiber hacmi, katman sayısı, levha kalınlığı ve fiber oryantasyonu gibi değişkenlere bağlı olarak mekanik özelliklerin tahmini için kullanılacak lineer regresyon denklemleri elde edilmiştir.

Malzeme ve Metot

Kompozit levha üretimi

Bu çalışmada, GFRP kompozit laminatların üretimi için fiber olarak 800, 500, 400, 300 ve 200 g/m² alansal yoğunluğa sahip E-camı dokuma fitil elyaflar ve matris olarak ise yoğunluğu $\rho=1.094 \text{ g/cm}^3$ olan ortoftalik polyester reçine kullanılmıştır. Fiberler, Şekil 1'de görülen ve Şişecam Cam Elyaf A.Ş. tarafından üretilen sürekli cam elyafından (WR) dokunmuş çift eksenli kumaşlardır. Matris ise Poliya Poliester Sanayi ve Tic. A. Ş. tarafından üretilen Polipol™ 336 polyester reçinesidir. Sertleştirici ve hızlandırıcı olarak kullanılan katalizörler ise metil etil keton peroksit (MEKP) ve kobalt (CoNa) naftenat'tır. Cam elyaf, polyester ve diğer bileşenlerin temel mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



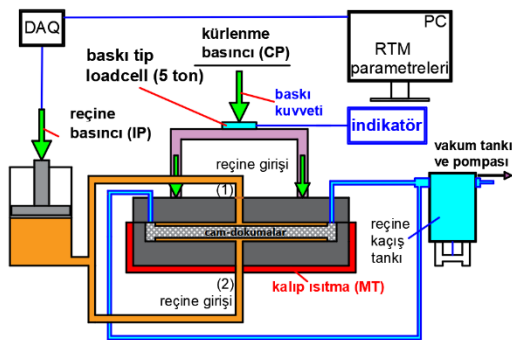
Şekil 1. Cam-dokuma kumaş tipleri; (a) 800, (b) 500, (c) 300 ve (d) 200 g/m²

Kompozit levhaların üretimi için Şekil 2'de şematığı görülen reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi kullanılmıştır. Enjeksiyon sonunda metal kalıba üstten ortalama 134 kPa'lık kütleme basıncı (CP) uygulanmıştır. Daha sonra levhalar, ortalama 45 °C'ye kadar ısıtılmış sıcak

kalıp içinde ve sabit basınç altında 22–48 saat aralığında kürelemeye tabii tutulmuştur. On farklı istifleme sırasına sahip cam-dokuma kumaşlar, 5, 6, 7, 8 veya 10 katmanlı olarak tasarlanıp kalıp boşluğuna yerleştirilmiştir. Proses sonunda farklı kalınlık (2.49–3.18 mm) ve elyaf hacimlerine (%38.46–48.01) sahip 50 × 50 cm boyutlarında 10 adet kompozit levha elde edilmiştir.

Tablo 1. Laminat bileşenleri ve mekanik özellikleri [11]

Matris	Fiber
Eğilme dayanımı=113 MPa	Yoğunluk, $\rho=2.54 \text{ g/cm}^3$
Eğilme modülü=3.11 GPa	Tipik çap=12-17 μm
Çekme dayanımı=64 MPa	Çekme dayanımı=2.4 GPa
Elastisite modülü=2.8 GPa	Elastisite modülü $\approx 72.4 \text{ GPa}$
Eğmede max. deformasyon=%4.3	Nihai uzama=%2.97
Çekmede nihai uzama=%2.8	Poisson oranı=0.22
Poisson oranı=0.36	

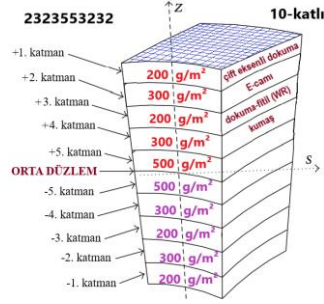


Şekil 2. Reçine transfer kalıplama yönteminin şematığı

Tablo 2’de kompozit levhalar için seçilen laminasyon tasarımları ve bazı malzeme değişkenleri görülmektedir. Burada; SN: sıra numarası, SS: istifleme kodu, NL: katman sayısı (adet), VF: fiber hacim oranı (%), ST_{ort} : ortalama levha kalınlığı (mm), sd: standart sapma, ST_{min} ve ST_{max} ise sırasıyla minimum ve maksimum levha kalınlığıdır. Levha sıra numaraları, cam-dokumaların istifleme kodu ve katman sayısına göre küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır. Örneğin 1-nolu levhadaki 38883 kodu, cam dokuma kumaşların sırasıyla 300/800/800/800/300 g/m^2 şeklinde istiflendiği ve 5 katmanlı bir laminat elde edildiği anlamına gelir. Şekil 3’de ise elde edilen simetrik bir levhanın laminat tasarımına ait enine kesit şematığı görülmektedir. İlgili Şekil, 9 sıra numaralı, 2323553232 kodlu ve 10-katmanlı laminat tasarımını ifade etmektedir. Her bir levhada kullanılan fiber ağırlığı 750 gram olarak sabit ve şematik resimde görüldüğü gibi levhanın merkezinden geçen orta-düzleme göre simetrik laminasyon tasarımları elde edilmiştir.

Tablo 2. Laminasyon tasarımları ve malzeme değişkenleri

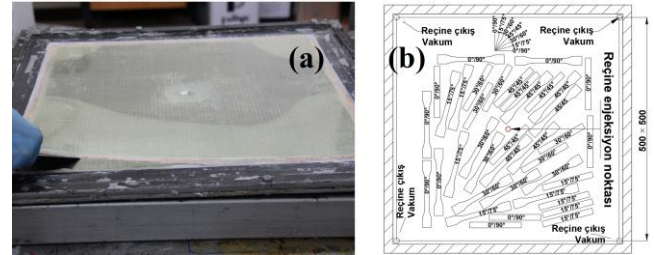
SN	SS kodu	NL	VF	ST_{min}	ST_{max}	$ST_{ort} \pm sd$
1	38883	5	42.05	2.74	3.02	2.85 ± 0.12
2	83838	5	40.84	2.79	3.03	2.94 ± 0.10
3	258852	6	48.01	2.49	2.51	2.50 ± 0.01
4	852258	6	42.62	2.62	2.97	2.80 ± 0.14
5	3538353	7	40.31	2.76	3.17	2.98 ± 0.18
6	5338335	7	42.21	2.64	2.99	2.83 ± 0.11
7	55322355	8	40.51	2.87	2.99	2.96 ± 0.05
8	83222238	8	39.59	2.97	3.10	3.03 ± 0.06
9	2323553232	10	38.46	3.04	3.18	3.11 ± 0.06
10	5323223235	10	40.88	2.80	3.10	2.93 ± 0.12



Şekil 3. Örnek bir levhanın istifleme dizilimi

Mekanik özellikler için çekme ve eğilme testleri

Bu çalışmada üretilen kompozit levhalar, küreleme süresi sonunda Şekil 4(a)’da görüldüğü gibi kalıptan çıkarılmıştır. Kürlenmiş levhalardan Şekil 4(b)’de görüldüğü gibi 0°, 15°, 30° ve 45° yönlerinde, EN-ISO-527-4 standardına uygun dog-bone geometrisinde çekme numuneleri (20×150 mm) ve ASTM-D7264/D7264M standardına uygun eğilme numuneleri (13×115 mm) kesilmiştir [26-27]. Elde edilen numuneler çekme ve üç-noktadan eğilme testlerine tabii tutularak; maksimum çekme mukavemeti (σ_{tu}), elastisite modülü (E_f), maksimum eğilme mukavemeti (σ_{fu}) ve eğilme modülü (E_f) gibi mekanik özellikler elde edilmiştir. Şekil 5 ve 6’da sırasıyla hasara uğrayan bazı çekme ve eğilme numuneleri görülmektedir.



Şekil 4. a) levhanın kalıptan alınışı, b) numune kesim yönleri



Şekil 5. Çekme testi sonucu hasara uğrayan numuneler



Şekil 6. Eğilme testi sonucu hasara uğrayan numuneler

Çift-yönlü dokuma elyaf takviyeli kompozit levhalar için mekanik anizotropi faktörü (AF)

Çift-yönlü dokumalarda çözgü (0°) ve atkı (90°) yönlerinin (Şekil 1) mekanik özellikleri arasında belirgin bir fark yoktur. Ancak bu dokumalarda çekme ve eğilme gibi mekanik özelliklerin en zayıf olduğu fiber oryantasyonu daima $\pm 45^\circ$ ’lik yöndür. Bu nedenle çift-yönlü dokuma kumaşlarda maksimum mekanik anizotropi faktörü Denklem (1)’deki gibi modüle bağlı olarak veya Denklem (2)’deki gibi mukavemete bağlı olarak hesaplanabilir [11-12,28].

$$AF_{\text{mod}} = E_{0/90} / E_{\pm 45} \quad (1)$$

$$AF_{\text{muk}} = \sigma_{0/90} / \sigma_{\pm 45} \quad (2)$$

Burada; $E_{0/90}$ ve $\sigma_{0/90}$: sırasıyla en yüksek yöndeki ($0^\circ/90^\circ$) modül ve mukavemet, $E_{\pm 45}$ ve $\sigma_{\pm 45}$: sırasıyla en zayıf yöndeki ($\pm 45^\circ$) modül ve mukavemettir. Bu çalışmada çift-yönlü cam-dokuma kumaşlar için mekanik anizotropi faktörleri, çekme ve eğilme testlerinden elde edilen dört farklı mekanik test verisine bağlı olarak hesaplanmıştır. Maksimum anizotropi faktörleri; çekme mukavemeti için AFT_{s45} , çekme modülü için AFT_{m45} , eğilme mukavemeti için AFF_{s45} ve eğilme modülü için AFF_{m45} kısaltmalarıyla ifade edilmiştir. Tasarımcı, hangi anizotropi faktörlerini (AF) esas alacağını kompozit levhanın kullanım amacına göre karar vermelidir [29].

İstatistik analizler

Mekanik özellikler (anizotropi faktörleri dahil) ile fiber hacmi (VF), katman sayısı (NL), levha kalınlığı (ST) ve fiber oryantasyonu (FO) gibi değişkenler arasındaki ilişkilerin anlaşılabilmesi için önce Pearson korelasyon analizleri yapılmıştır. Daha sonra, mekanik özelliklerin belirtilen değişkenlere bağlı tahmini için Stepwise metodu ile çoklu regresyon analizleri yapılmıştır. Çekme testleri için 190, eğilme testleri için 175 adet olmak üzere toplam 365 adet veri analiz edilmiş olup adı geçen istatistiksel analizler SPSS-24 yazılımı ile yapılmıştır.

Sonuçlar ve tartışma

Mekanik özellikler ile değişkenler arasındaki ilişkiler

Korelasyon analizi sonucunda elde edilen ve mekanik özellikler ile değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları (r) Tablo 3’te görülmektedir. Buradaki katsayı iki veri arasındaki ilişki düzeyini şu şekilde gösterir: $r < 0.20$ ve sıfıra yakın değerler “çok zayıf ilişkiyi”, $r = 0.20 - 0.40$ 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 [30]. Bahsedilen r katsayısı dışında (*) ve (**) simgeleri, ikili ilişkileri sırasıyla $P < 0.05$ ve $P < 0.01$ düzeyinde anlamlandırır. Yıldız simgesi olmayan değişkenler ise neredeyse “anlamsız” veya “çok zayıf düzeyde etkili” olarak tanımlanabilir. Korelasyon katsayıları önündeki işaretler ise etki yönlerini (- veya +) ifade etmektedir. Buna göre; sırasıyla mekanik özellikleri negatif yönde ve anlamlı düzeyde (** $P < 0.01$) etkileyen değişkenlerin fiber oryantasyonu (FO) ve levha kalınlığı

(ST) kalınlığı olduğu anlaşılmaktadır. Anizotropiyi yüksek düzeyde negatif olarak ve anlamlı yönde (** $P < 0.01$) etkileyen faktör ise doğal olarak fiber oryantasyonudur. İlâveten Tablo 3’de istifleme sırası (SS) ile anizotropi faktörlerinin diğer değişkenlerle olan ikili ilişki düzeyleri anlaşılabilir.

Tablo 3. Korelasyon katsayıları

Çekme	SS	VF	NL	ST	FO
σ_{tu}	-0.046	0.114	-0.054	-0.309**	-0.868**
E_t	-0.180*	0.185*	-0.203**	-0.379**	-0.876**
AFTs	-0.098	0.114	-0.088	0.193	0.945**
AFTm	0.165	-0.124	0.210	0.369*	0.869**
SS	1	-0.522**	0.971**	0.466**	0.000
Eğilme	SS	VF	NL	ST	FO
σ_{fu}	-0.119	0.121	-0.137	-0.355**	-0.943**
E_f	-0.152*	0.192*	-0.175*	-0.447**	-0.882**
AFFs	0.059	-0.022	0.049	0.220	0.964**
AFFm	0.136	-0.083	0.121	0.290	0.896**
SS	1	-0.522**	0.971**	0.446**	0.000

Pearson korelasyonu ** $P < 0.01$ düzeyinde ve * $P < 0.05$ düzeyinde anlamlıdır (2-yönlü). SS: laminasyon tasarımı, VF (%): fiber hacmi, NL: katman sayısı, ST (mm): levha kalınlığı, FO ($^\circ$): fiber oryantasyonu.

Mekanik özelliklerin tahmini

Mekanik özellikler üzerinde en etkili değişkenlere bağlı olarak lineer regresyon denklemleri elde edilmiş ve Tablo 4’de verilmiştir. Bazı sınır şartlara bağla olmakla birlikte bu denklemler, test verilerinin saçılımını uygun bir doğrulukta (R^2) formülize etmektedir. Dolayısıyla elde edilen lineer denklemler, mekanik özelliklerin tahmininde rahatlıkla kullanılabilir. Ayrıca her ne kadar Tablo 3’deki korelasyonlarda bazı mekanik özellikleri birden fazla etkileyen (*) veya (**) simgeli değişken olduğu görülse de esasen çoklu regresyon analizinde hepsinin aynı anda lineer regresyon denkleminde girecek kadar etkili olmadığı anlaşılabilir. Örneğin ilk bakışta Tablo 3’deki ikili ilişkilere göre; E_t ’nin NL, ST ve FO değişkenlerinden negatif yönde, zayıf (*) veya yüksek düzeyde etkilendiği (**) görülmektedir. Buna rağmen, çoklu regresyon analizine göre anlamlı olup Tablo 4’deki denklemde yerini alan etkili değişkenlerin FO ve NL olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Regresyon analizi sonuçları

Regresyon denklemleri *	R^2	df
$\sigma_{tu} = 404.1 - 4.45 \times FO - 53.52 \times ST$	0.771	2, 189
$E_t = 17970 - 228.5 \times FO - 548.7 \times NL$	0.813	2, 189
$\sigma_{fu} = 609.7 - 6.94 \times FO - 53.69 \times ST - 7.68 \times NL$	0.926	3, 174
$E_f = 27950 - 238.5 \times FO - 3415 \times ST - 346.5 \times NL$	0.903	3, 167

*Regresyon denklemleri $P < 0.01$ düzeyinde anlamlıdır. Bazı uç değerler elenmiştir. Sınır şartlar: $0 \leq FO \leq 45$, $5 \leq NL \leq 10$, $2.49 \leq ST \leq 3.18$

Laminasyon tasarımı olarak test edilen on farklı istifleme sırası (SS) 1–10 arasında numaralandırılarak istatistik analizlere dahil edilmesine rağmen ilk bakışta, mekanik özellikler üzerinde çok da etkili olmadığı ($P \geq 0.05$) görülmüştür. Ancak Tablo 3’e dikkat edilirse hem çekme hem de eğilme testlerindeki verilerin korelasyon analizine göre NL ile SS arasında “yüksek düzeyde” ilişki (** $P < 0.01$) vardır. Buradan hareketle bu değişkenlere özel regresyon analizi yapıldığında çekme testi için Denklem (3), eğilme testi için ise Denklem (4) elde edilir. Bu denklemlerden elde edilen NL değeri ise Tablo 4’deki regresyon denklemlerinde yerine konulabilir. Böylece 1 ile 10

arasında numaralanmış laminasyon tasarımlarının mekanik özelliklere etkisi ortaya konulabilir.

$$NL = 3.994 + 0.586 \times SS \quad (R^2=0.944) \quad (3)$$

$$NL = 4.005 + 0.582 \times SS \quad (R^2=0.943) \quad (4)$$

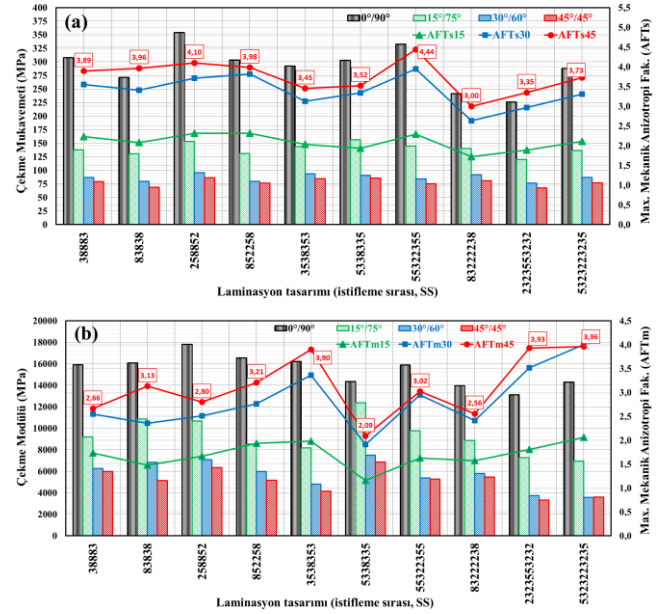
Korelasyon veya regresyon sonuçları tablolarında görülen değişkenlerden ziyade mekanik özellikleri birden fazla değişken aynı anda etkilemektedir. Dolayısıyla, kompozit levhalarda mekanik özellikler ve anizotropiye bağlı laminasyon tasarımına karar vermede, korelasyon ve regresyon sonuçları güçlü ip uçları verse de tam olarak yeterli değildir. Daha güçlü çıkarım yapabilmek için bütün çekme, eğilme mukavemeti ve modül verileri MS-Excel'e taşınmıştır. Öncelikle Şekil 7 (a, b) ve 8 (a, b)'de görüldüğü gibi 0° , 15° , 30° ve 45° 'lik oryantasyonlarda kesilen on farklı laminasyon tasarımındaki levhaların mukavemet, modül ve anizotropi faktörlerini içeren üçlü grafikler elde edilmiştir. Optimum laminasyon tasarımına daha net karar verebilmek için ise radar (spider) grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler okunarak en olumlu veya olumsuz laminasyon tasarımları daha net anlaşılabilir.

Optimum laminasyon tasarımı ve istifleme sırası belirleme

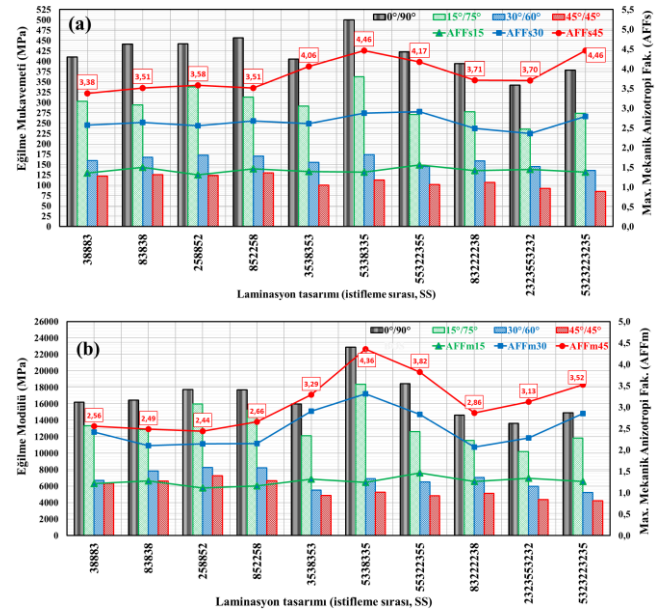
Laminat optimizasyonlarında sadece malzeme değişkenleri değil malzeme üretim parametreleri ile birlikte nihai ürünün yükleme tipi, çevre şartları ve zaman gibi değişkenlerin de dikkate alınması gerekir. Özellikle kritik tasarımların mukavemet hesaplarında laminat istifleme sırası için optimizasyon rutinleri geliştirmek oldukça zordur [31]. Bu tasarımlarda net bir avantajı belirten analiz ve test verileri bulunmadıkça, mukavemet açısından yüksek seviyede anizotrop yapıya sahip laminasyon tasarımlarından kaçınılmalıdır. Bazı çalışmalarda iki-yönlü ($0^\circ/90^\circ$) fiber oryantasyonuna sahip dokuma kumaş takviyeli kompozitlerde fiber oryantasyonu $\pm 45^\circ$ döndürülerek test edildiğinde, ilgili parçanın çekme dayanımının %67–71 oranında düştüğü tespit edilmiştir [32-33]. Özellikle kuvvet (mukavemet) kontrollü tasarımlarda, katman sayısı, dokuma tipi, elyaf cinsi ve oryantasyonları laminatın mekanik anizotropisini en aza veya optimum bir değere indirecek şekilde ve sırada yerleştirilmesiyle oluşturulan SS tasarımları şiddetle tavsiye edilir [31]. Yukarıda bahsedilen zorluklara rağmen ve bütün kriterlerin aynı anda sağlanması mümkün olmamakla birlikte optimum laminasyon tasarımına karar vermede aşağıdaki kriterleri göz önüne almak gerekir:

- Simetrik ve asimetrik istifleme dizileri arasında, fiber hacminden bağımsız olarak, simetrik olan tasarım daha yüksek çekme ve eğilme özelliklerine sahiptir [34]. Dolayısıyla orta eksene göre simetrik bir levha [35],
- Bütün fiber oryantasyonlarında hem minimum anizotropi (\downarrow) hem de maksimum mukavemet (\uparrow) ve modüle (\uparrow) sahip bir levha [11],
- Anizotropiyi düşürdüğü (\downarrow) için daha çok katmanlı (\uparrow) levha [11],
- Kalınlığın artması ($ST\uparrow$), mukavemet ($\sigma_{tu}\downarrow$ ve $\sigma_{fu}\downarrow$) ve modülleri ($E_t\downarrow$ ve $E_f\downarrow$) düşürdüğü için mümkünse daha ince levha ($ST\downarrow$) [36],

- Daha ince levhadan fazla ödün vermeden; mukavemet ve modülleri arttırdığı (\uparrow) için daha yüksek fiber hacmine ($VF\uparrow$) sahip levha,
- Daha az katman sayısı (\downarrow); daha stabil levha kalınlığı, daha az işçilik (\downarrow), zaman (\downarrow) ve maliyet (\downarrow) anlamına da gelebilir. Ayrıca, etki düzeyi zayıf olmasına rağmen bu çalışma kapsamında katman sayısındaki artış (AFTs hariç) anizotropileri arttırdığı (\uparrow) ve mukavemeti düşürdüğü için mümkünse daha az katmanlı (\downarrow) levha [37], tercih sebebi olmalıdır.



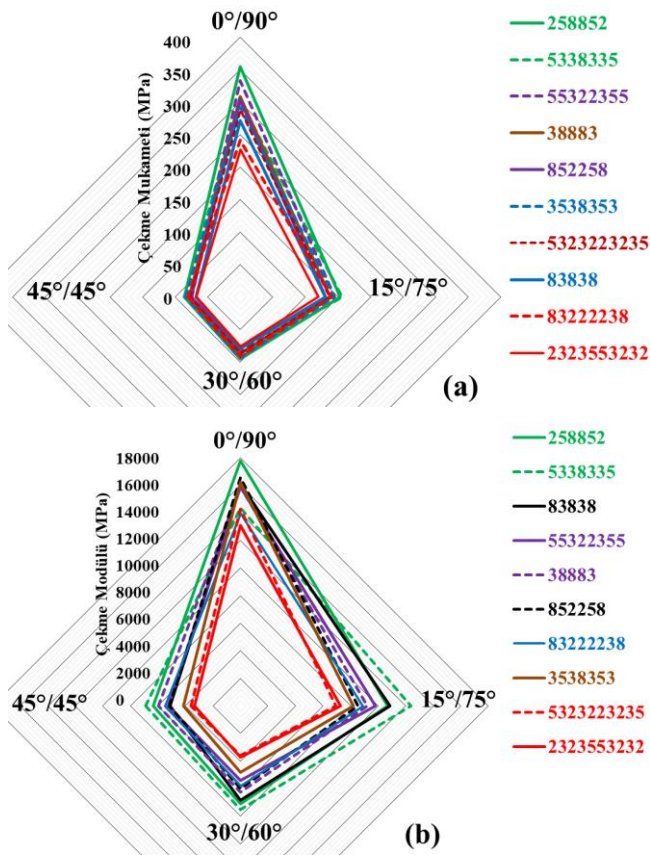
Şekil 7. a) SS- σ_{tu} -AFTs ve b) SS- E_t -AFTm grafikleri



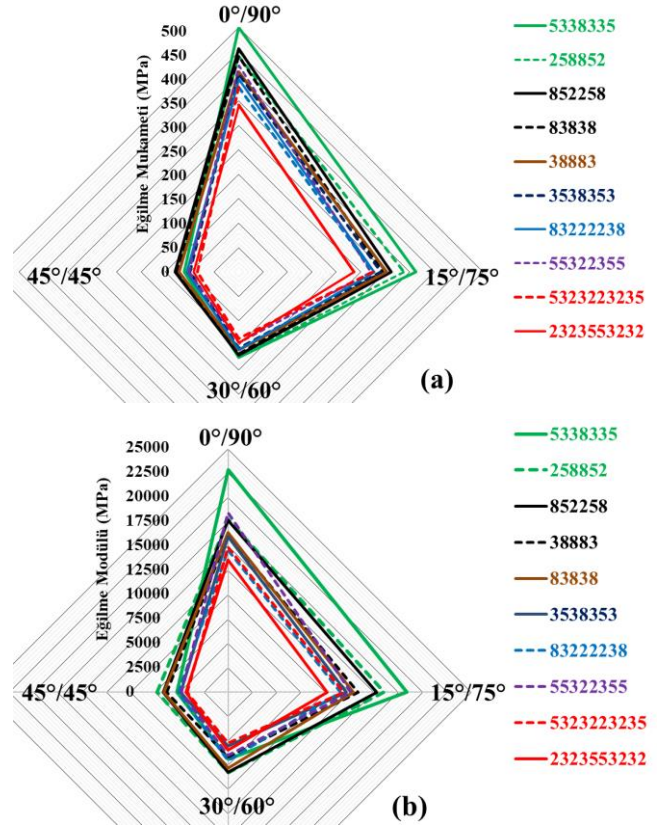
Şekil 8. a) SS- σ_{fu} -AFFs ve b) SS- E_f -AFFm grafikleri

Şekil 7 (a)'ya göre 83222238 kodlu levha minimum AFTs'ye, 258852 kodlu levha ise maksimum σ_{tu} 'ya sahiptir. Şekil 7 (b)'ye göre ise 5338335 kodlu levha minimum AFTm'ye, yine 258852 kodlu levha maksimum E_t 'ye sahiptir. Şekil 8 (a)'ya göre 38883 kodlu levha minimum AFFs'ye, 5338335 kodlu levha maksimum

σ_{fu} 'ya sahiptir. Şekil 8 (b)'ye göre ise yine 38883 kodlu levha minimum AFFm'ye, 5338335 kodlu levha maksimum E_f 'ye sahiptir. Bu kriterlere göre, laminasyon tasarımı seçiminde mekanik anizotropi faktörlerinin minimum veya mukavemet ile modül verilerinin maksimum olduğu laminasyon tasarımının tercih edilmesi gerektiği düşünülebilir. Ancak, "anizotropi düşüklüğü $0^\circ/90^\circ$ yönündeki maksimum mukavemet veya modülün de düşük seviyede olduğu", " $0^\circ/90^\circ$ yönündeki mukavemet veya modülün yüksekliği ise anizotropinin de yüksek olduğu" anlamlarına gelebilir. Dolayısıyla tek kritere bağlı karar vermek mümkün değildir. Bundan dolayı bu çalışmada farklı laminasyon tasarımları arasında, çekme ile eğilme mukavemeti ve modülleri açısından test edilerek amaca en uygun istifleme sırası aranmaktadır. Bu amaca yönelik optimum laminasyon tasarımlarına karar vermede Şekil 8 ve 9'daki radar grafiklerini kullanmak en mantıklı ve basit yöntem olabilir.



Şekil 8. a) σ_{tu} -FO-SS ve b) E_t -FO-SS için radar grafikleri



Şekil 9. a) σ_{fu} -FO-SS ve b) E_f -FO-SS için radar grafikleri

Radar grafiklerinden şu şekilde yararlanılır. Şekil 8 ve 9'da yamuk geometrisindeki grafiğin en dışı yer alan laminasyon en olumlu (optimum) tasarım iken en içteki ise en olumsuz tasarımdır. Buna göre; çekme mukavemeti ve çekme modülü açısından optimum laminasyon 258852 kodlu tasarımdır (Şekil 8 a ve b). Eğilme mukavemeti ve eğilme modülü açısından optimum laminasyon 5338335 kodlu tasarımdır (Şekil 9 a ve b). Test edilen bütün mekanik özelliklere göre, Şekil 8 ve 9'da görüldüğü gibi en olumsuz tasarım ise 10 katlı 2323553232 kodlu tasarım olduğu görülmektedir. Çalışma sonunda, çekme mukavemeti ve modülü esas alındığında 5338335 kodlu tasarım, eğilme mukavemeti ve modülü esas alındığında ise 258852 kodlu tasarım optimum laminasyonlar olarak tercih edilmektedir. Kompozit parçaların kalitesi ve mukavemeti öncelikle içerdiği makro/mikro hava kabarcıklarının yüzdesiyle ilgilidir. Yüksek alansal ağırlığa sahip 500 ve 800 g/m² gibi dokuma tipleri 200 ve 300 g/m²'lik dokumalara göre daha yüksek reçine geçirgenliğine sahiptir [11]. Laminasyon tasarımında reçine geçirgenliği yüksek olan dokumaların düşük olanlara göre daha fazla kullanılması veya uygun yere yerleştirilmesiyle daha homojen reçine akışı ve elyafların daha iyi ıslanması sağlanır. Böylece kompozit levhadaki makro ve mikro hava kabarcıklarının oluşumu en aza inerek mukavemetin artmasına sebep olur [11,38]. Bu çalışmada ideal katman sayısının 6-7 adet olduğu, katman sayısı arttıkça (↑) laminatlardaki reçine geçirgenliğinin azaldığı (↓) söylenebilir. Katman sayısındaki artışla birlikte istifleme sırasında 200-300 g/m² gibi dokuma kumaşların üst ve alt katlara yerleştirilmesi reçine geçirgenliğini olumsuz etkilemiştir. Dolayısıyla reçine geçirgenliğindeki bu azalma levha mukavemetlerinin düşmesine neden olmuştur. Bununla birlikte en küçük gözenekli ve en düşük

reçine geçirgenliğine sahip olan 200 g/m²'lik dokuma kumaşların laminat merkezinde bulunması, çekme mukavemetini azaltırken (↓) ve eğilme mukavemetini (↑) arttırmıştır.

Teşekkür

Katkılarından dolayı makine mühendisi Yakup Daban'a teşekkürler.

Kaynaklar

- [1] S. Basavarajappa, K. V. Arun and J. P. Davim, "Effect of filler materials on dry sliding wear behavior of polymer matrix composites—a Taguchi approach," *J. Miner. Mater. Char. Eng.*, vol. 8, no. 05, pp. 79-391, May. 2009. Doi: 10.4236/jmmce.2009.85034.
- [2] Y. Rostamiyan, H. Youseftabar and R. Azadi, "Experimental study on the effect of nano zirconia on mechanical strength and microstructure of damaged epoxy-nanocomposites," *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 2, Nov. 2018. Doi: 10.1088/2053-1591/aaef67.
- [3] R. Azadi and Y. Rostamiyan, "Experimental and analytical study of buckling strength of new quaternary hybrid nanocomposite using Taguchi method for optimization," *Constr. Build. Mater.*, vol. 88, no. 0, pp. 212-224, May. 2015. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.018.
- [4] Y. Rostamiyan and M. Rezaei, "The effect of nano Zirconium dioxide and drilling on the buckling strength of epoxy based nanocomposites," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 212, no., pp. 523-532, 2018. Doi: 10.1016/j.matchemphys.2018.03.018.
- [5] G. Gao and Y. Li, "Mechanical properties of woven glass fiber-reinforced polymer composites," *Emerging Mater. Res.*, vol. 5, no. 2, pp. 201-208, Dec. 2016. Doi: doi.org/10.1680/jemmr.16.00018.
- [6] D. K. Rajak, D. D. Pagar, P. L. Menezes and E. Linul, "Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications," *Polymers*, vol. 11, no. 10, pp. 1667-1704, Oct. 2019. Doi: doi.org/10.3390/polym11101667.
- [7] A. Diniță, R. G. Ripeanu, C. N. Ilincă, D. Cursaru, D. Matei, R. I. Naim, M. Tănase and A. I. Portoacă, "Advancements in Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Comprehensive Analysis," *Polymers*, vol. 16, no. 1, pp. 2-50, Dec. 2023. Doi: doi.org/10.3390/polym16010002.
- [8] M. A. Karim, M. Z. Abdullah, A. F. Deifalla, M. Azab and A. Waqar, "An assessment of the processing parameters and application of fibre-reinforced polymers (FRPs) in the petroleum and natural gas industries: A review," *Results Eng.*, vol. 18, no. 101091, pp. 1-20, June 2023. Doi: doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101091.
- [9] W. Zhang and K. E. Evans, "Numerical prediction of the mechanical properties of anisotropic composite materials," *Comput. Struct.*, vol. 29, no. 3, pp. 413-422, Feb. 1988. Doi: doi.org/10.1016/0045-7949(88)90394-X.
- [10] J. K. Oleiwi, E. S. Al-Hassani and A. A. Mohammed, "Experimental Investigation and Mathematical Modeling of Tensile Properties of Unsaturated Polyester Reinforced by Woven Glass Fibers," *Eng. Tech. J.*, vol. 32, no. 3 Part (A) Engineering, pp. 653-666, March 2014. Doi: doi.org/10.30684/etj.32.3A.8.
- [11] R. Sakin, "Layup design optimization for e-glass woven roving fabric reinforced polyester composite laminates produced by VARTM," *Fibers Polym.*, vol. 22, no. 2, pp. 509-527, Jan. 2021. Doi: doi.org/10.1007/s12221-021-0087-x.
- [12] R. Sakin, "Effects of glass-mat on mechanical anisotropy in bidirectional e-glass woven roving reinforced composite sheets produced by RTM method," *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 23, no. 8, pp. 967-973, 2017. Doi: 10.5505/pajes.2017.55631.
- [13] A. R. M. Rao and N. Arvind, "Optimal stacking sequence design of laminate composite structures using tabu embedded simulated annealing," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 25, no. 2, pp. 239-268, Jan. 2007. Doi: doi.org/10.12989/sem.2007.25.2.239.
- [14] Y. Mohammed, M. K. Hassan, A. El-Ainin H and A. Hashem, "Effect of stacking sequence and geometric scaling on the brittleness number of glass fiber composite laminate with stress raiser," *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 21, no. 2, pp. 281-288, Aug. 2014. Doi: doi.org/10.1515/secm-2013-0038.
- [15] H. Norouzi and Y. Rostamiyan, "Experimental and numerical study of flatwise compression behavior of carbon fiber composite sandwich panels with new lattice cores," *Constr. Build. Mater.*, vol. 100, no., pp. 22-30, Dec. 2015. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.046.
- [16] Z. Jing, X. Fan and Q. Sun, "Stacking sequence optimization of composite laminates for maximum buckling load using permutation search algorithm," *Compos. Struct.*, vol. 121, no., pp. 225-236, March 2015. Doi: 10.1016/j.compstruct.2014.10.031.
- [17] P. Mandal, D. K. Jesthi, D. Das, A. K. Rout and R. K. Nayak, "Three-body abrasion wear performance of glass/carbon fiber reinforced polymer hybrid composites," *Mater. Today-Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 20777-20784, 2018. Doi: 10.1016/j.matpr.2018.09.046.
- [18] A. Nayak, D. K. Jesthi, B. C. Routara, D. Das and R. K. Nayak, "Tribological properties of glass/carbon hybrid composites through inter-ply arrangement using Response Surface Methodology," *Mater. Today-Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 19828-19835, 2018.
- [19] S. Swarup Mohanty, A. Kumar Rout, D. Kumar Jesthi, B. Chandra Routara and R. Kumar Nayak, "Evaluation of mechanical and wear performance of glass/carbon fiber reinforced polymer hybrid composite," *Mater. Today-Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 19854-19861, 2018. Doi: 10.1016/j.matpr.2018.06.350.
- [20] D. K. Jesthi, P. Mandal, A. K. Rout and R. K. Nayak, "Enhancement of mechanical and specific

- wear properties of glass/carbon fiber reinforced polymer hybrid composite," *Procedia Manuf.*, vol. 20, no., pp. 536-541, 2018. Doi: doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.080.
- [21] D. K. Jesthi, A. Nayak, B. C. Routara and R. K. Nayak, "Evaluation of Mechanical and Tribological Properties of Glass/Carbon Fiber Reinforced Polymer Hybrid Composite," *Int. J. Eng.*, vol. 31, no. 7, July 2018. Doi: 10.5829/ije.2018.31.07a.12.
- [22] Siddhartha and K. Gupta, "Mechanical and abrasive wear characterization of bidirectional and chopped E-glass fiber reinforced composite materials," *Mater. Design.*, vol. 35, no., pp. 467-479, March 2012. Doi: 10.1016/j.matdes.2011.09.010.
- [23] S. Mullaikodi, K. Shanmugasundaram, V. S. Rao and S. Rengarajan, "Synthesis, characterization and machinability studies on thin hybrid composites with SiC nano particles," *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 6, pp. 065321, March 2019. Doi: doi.org/10.1088/2053-1591/ab0ddc.
- [24] A. Todoroki and M. Sasai, "Stacking sequence optimizations using GA with zoomed response surface on lamination parameters," *Adv. Compos. Mater.*, vol. 11, no. 3, pp. 299-318, July 2002. Doi: 10.1163/156855102762506335.
- [25] A. Todoroki, K. Suenaga and Y. Shimamura, "Stacking sequence optimizations using modified global response surface in lamination parameters," *Adv. Compos. Mater.*, vol. 12, no. 1, pp. 35-55, Apr. 2003. Doi: 10.1163/156855103322320365.
- [26] 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.
- [27] ASTM-D7264/D7264M, *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, Pennsylvania 19428-2959, USA, 2007.
- [28] B. N. Cox and G. Flanagan, *Handbook of analytical methods for textile composites*, NASA Contractor Report 4750, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19970017583/downloads/19970017583.pdf>. 1997.
- [29] Z. Xu and A. Yokoyama, "Influence of the Woven Structure on the Initial Fracture Behavior of Roving Glass Fabric Reinforced Composites," *Open J. Compos. Mater.*, vol. 08, no. 02, pp. 54-67, 2018. Doi: 10.4236/ojcm.2018.82005.
- [30] J. R. Landis and G. G. Koch, "The measurement of observer agreement for categorical data," *Biometrics*, no., pp. 159-174, 1977.
- [31] USA-Department-of-Defense, *Composite Materials Handbook*. Materials, Usage, Design, and Analysis. Vol. 3 of 5. CRC Press, New York, 1997. <http://assist.daps.dla.mil>.
- [32] T. Sessaiah and V. K. Reddy, "Effect of fiber orientation on the mechanical behavior of e-glass fibre reinforced epoxy composite materials," *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev.*, vol. 8, no. 8, pp. 379-396, 2018. Doi: doi.org/10.5505/pajes.2017.55631.
- [33] N. Kumar and A. Singh, "Study the effect of fiber orientation on mechanical properties of bidirectional basalt fiber reinforced epoxy composites," *Mater. Today-Proc.*, vol. 39, no., pp. 1581-1587, 2021. Doi: doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.707.
- [34] M. T. A. Ansari, K. Singh and M. S. Azam. Effect of stacking sequence and fiber volume fraction on the static mechanical properties of woven GFRP Composite. in *Trends in Materials Engineering: Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering*. 2019. Springer Nature Singapore Pte Ltd. pp. 51-58.
- [35] G. Ntourmas, F. Glock, S. Deinert, F. Daoud, G. Schuhmacher, D. Chronopoulos, E. Özcan and J. Ninić, "Stacking sequence optimisation of an aircraft wing skin," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 66, no. 2, pp. 31, Jan. 2023. Doi: doi.org/10.1007/s00158-022-03483-8.
- [36] Y. Hu, G. Han, F. Cheng and X. Hu, "Thickness effect on flexural strengths of laminar carbon fibre composites," *Thin-Walled Struct.*, vol. 186, no., pp. 110690, May 2023. Doi: doi.org/10.1016/j.tws.2023.110690.
- [37] W. Sun, Y. Luo and H. Sun, "Experimental studies on the elastic properties of carbon fiber reinforced polymer composites prefabricated of unidirectional carbon fiber fabrics and a modified rule of mixtures in the parallel direction," *Adv. Compos. Lett.*, vol. 27, no. 1, pp. 34-43, Jan. 2018. Doi: doi.org/10.1177/09636935180270.
- [38] Q. Zuo, C. Wang, L. Lin, Y. Li, B. Wang, B. Miao and G. Pan, "Layup optimization of ramie fabric reinforced composite: woven fabric and lamination parameters," *Ind. Crop. Prod.*, vol. 198, no., pp. 116712, Aug. 2023. Doi: doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116712.