



**TERMOPLASTİK KEÇE KATMANIN KARBON
KUMAŞ-CAM KUMAŞ/ EPOKSİ KOMPOZİTLERDE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ve DİNAMİK
DAVRANIŞLARINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Yavuz Selim TARİH

**Danışman: Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU
İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Adem YAR**

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2022

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TERMOPLASTİK KEÇE KATMANIN KARBON KUMAŞ-CAM KUMAŞ/ EPOKSİ
KOMPOZİTLERDE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ve DİNAMİK
DAVRANIŞLARINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Investigation of The Effects of Thermoplastic Veil Layer on Mechanical Properties and
Dynamic Behavior in Carbon Fabric-Glass Fabric/Epoxy Composites

DOKTORA TEZİ

Yavuz Selim TARİH

Danışman: Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU
İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Adem YAR

Erzurum
Aralık, 2022

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**TERMOPLASTİK KEÇE KATMANIN KARBON KUMAŞ-CAM KUMAŞ/ EPOKSİ
KOMPOZİTLERDE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ve DİNAMİK DAVRANIŞLARINA
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Prof.Dr.Ömer GÜNDOĞDU danışmanlığında, Yavuz Selim TARİH tarafından hazırlanan bu çalışma, 23/12/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Teorisi ve Dinamiği Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu** (.../...) ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof.Dr.Hamit AKBULUT <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof.Dr.Ömer GÜNDOĞDU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof.Dr.Mustafa YAMAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç.Dr.Rıza POLAT <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç.Dr.İhsan KIRIK <i>Bingöl Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç.Dr.Özgür ÖZGÜN <i>Bingöl Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
İkinci Tez Danışmanı	Doç.Dr.Adem YAR <i>Bingöl Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: 1-FBA-2021-9447 (*Atatürk Üniversitesi*)

2-BAP-MMF.2021.002 (*Bingöl Üniversitesi*)

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof.Dr.Ömer GÜNDOĞDU danışmanlığında sunulan “Termoplastik Keçe Katmanın Karbon Kumaş-Cam Kumaş/ Epoksi Kompozitlerde Mekanik Özelliklerine ve Dinamik Davranışlarına Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	5	30
Kuramsal Temeller	28	30
Materyal ve Metot	20	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	2	20
Sonuçlar ve Öneriler	7	20
Tezin Geneli	12	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Yavuz Selim TARİH	Prof.Dr.Ömer GÜNDOĞDU
28.12.2022	28.12.2022
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

Not: Bu form, Tezin son şekline uygun olarak bilgisayar ortamında doldurulmalı, çıktısı imzalanıp Tezin sonuna eklenmelidir.

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, değerli bilgi ve katkıları ile yöneten, tezimin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen hocam Sayın Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU'ya ve ortak danışmanım Sayın Doç.Dr. Adem YAR'a en derin saygı ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım esnasında fikri ve teknik olmak üzere, öneri ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Dr. Öğrt. Üyesi Volkan ACAR'a, üretimlerde teknik destek olarak katkısından dolayı Sayın Arş. Gör. Burak HÜLAGÜ'ya, Konya Teknik Üniversitesi'nde gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testlerindeki yardımlarından ötürü Sayın Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN ve Sayın Arş. Gör. Taner ÇOŞKUN'a teşekkür ederim. Ayrıca; hem üretim aşamasında hemde test aşamasında fedakârca yardımlarını esirgemeyen Makine Mühendisi Burak DURAN'a ve Necdet Anıl ODABAŞ'a teşekkür ederim.

Tezin izlenmesinde, değerlendirilmesinde ve iyileştirilmesinde verdikleri destekler için tez izleme komisyonu hocalarım Sayın Prof. Dr. Mustafa YAMAN ve Sayın Doç. Dr. Rıza POLAT'a teşekkür ederim.

Ayrıca; Atatürk Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi (Proje No: FBA-2021-9447) ve Bingöl Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi (Proje No: BAP-MMF.2021.002) tarafından desteklenen bu çalışma için ilgili kurumlara şükranlarımı sunarım.

Bana her zaman maddi ve manevi destek veren sevgili aileme, özellikle eşim Gülsüm TARİH'e teşekkürü bir borç bilirim.

Yavuz Selim TARİH

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TERMOPLASTİK KEÇE KATMANIN KARBON KUMAŞ-CAM KUMAŞ/ EPOKSİ KOMPOZİTLERDE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ve DİNAMİK DAVRANIŞLARINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Yavuz Selim TARİH

Danışman: Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU
İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Adem YAR

Amaç: Tabakalı kompozit yapılar, günümüzde birçok sektörde kullanılmaktadırlar. Dolayısıyla bu yapılara olan talep giderek artmaktadır. Özellikle havacılık alanında tabakalı kompozit yapılar daha yoğun ilgi görmektedir. Bu geniş kullanım alanları, kompozit malzemeleri çalışma ortamları açısından başta mekanik ve dinamik gibi çeşitli yönlerde etkilemektedir. Mekanik ve dinamik yüklere maruz kalan bu yapılarda oluşan zamana bağımlı değişken gerilmeler, titreşimler ve yorulmalar kompozit malzemelerin hem içyapısını hemde dış yapısını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum ise kompozit malzemelerin emniyetli kullanım ömürlerini azaltmaktadır. Elyaf takviyeli tabakalı kompozit yapıların ekonomik kullanım ömürlerini olumsuz yönde etkileyen faktörlerin giderilmemesi ya da minimize edilmemesi önemli bir problemdir. Bu sorun/sorunların giderilmesi için, endüstriyel bazda yaygın kullanım alanına sahip olan elyaf kumaşların arasına beş farklı termoplastik keçe katmanları ilave edilerek yeni kompozit yapıların oluşturulması amaçlanmıştır.

Yöntem: Bu çalışma kapsamında, elyaf kumaş olarak karbon ve cam elyaf, termoplastik keçe katmanı olarak da Poliamid (PA), Polieter eter keton (PEEK), Polifenilen sülfür (PPS), Polietermit (PEI) ve Poliimid (PI) keçeler kullanılmıştır. Üretimler Vakum Destekli Reçine Transferiyle Kalıplama (VARTM) yöntemiyle yapılarak ilgili ASTM sıtandartlarına göre mekanik (üç nokta eğilme, düşük hızlı darbe ve ILSS) ve dinamik (doğal frekans ve sönüm oranı) testler yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar ile termoplastik keçe katmanlı karbon elyaf/epoksi-cam elyaf/ epoksi kompozitlerde hem keçe katmanlarının hemde farklı elyaf içeriklerinin etkisini belirlemek amacıyla mekanik ve dinamik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bulgular: Bu inceleme sonuçlarındaki termoplastik keçe katmanları, interlamnar kayma mukavemetini, düşük hızlı darbe dayanımını ve titreşim karakteristiğini (doğal frekans ve sönüm oranlarını) iyileştirdiği bulunmuştur. Fakat kullanılan termoplastik keçe katmanları, eğilme dayanımını sonuçları açısından ya etkisiz kalmış ya da dayanımı azalttığı gözlemlenmiştir.

Sonuç: Gelişmiş kompozit malzemelerin hem ekonomik açıdan hem de yapısal olarak daha verimli tasarlanabilmesi için ara katman dahil edilmesi oldukça önemlidir. Kompozit yapı kesme yüklerine maruz kalacaksa PA, PPS, PEI ve PEEK keçeler tercih edilmesi daha uygun olacaktır. Ayrıca çalışma koşulları gereği darbeye her an maruz kalabilecek kompozit yapılar için PA keçe katmanlı kompozit yapılar kullanılması mantıklı bir yaklaşım olacaktır. Dayanıklılık ve etkili kullanım ömrü açısından yapısal kısıtların dikkate alınarak, uygun kumaş türü ve uygun termoplastik keçe türünün doğru seçilmesi oldukça önemlidir.

Anahtar Kelimeler: Cam elyaf, doğal frekans, düşük hızlı darbe, ILSS, karbon elyaf, sönüm oranı, termoplastik keçe, üç nokta eğilme,

Aralık 2022, 84 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF THERMOPLASTIC VEIL LAYER ON MECHANICAL PROPERTIES AND DYNAMIC BEHAVIOR IN CARBON FABRIC-GLASS FABRIC/EPOXY COMPOSITES

Yavuz Selim TARİH

Supervisor: Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU

Co- Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Adem YAR

Purpose: Laminar composite structures are used in a multi-sectoral manner today. Therefore, the demand for these structures is gradually increasing. Especially in the field of aviation, layered composite structures are attracting more intense attention. These wide areas of use affect composite materials in various aspects, especially mechanical and dynamic ones, in terms of working environments. The time-dependent variable stresses, vibrations and fatigue that occur in these structures exposed to mechanical and dynamic loads negatively affect both the internal structure and the external structure of composite materials. This reduces the safe service life of composite materials. It is an important problem that the factors that negatively affect the economic service life of fiber-reinforced layered composite structures are not eliminated or minimized. In order to eliminate these problems, it is aimed to create new composite structures by adding five different thermoplastic veil layers between the fiber fabrics that have a widespread use area on an industrial basis.

Method: In this study, carbon and glass fiber were used as fiber fabrics, Polyamide (PA), Polyether ether ketone (PEEK), polyphenylene sulfide (PPS), Polyetherimide (PEI) and Polyimide (PI) were used as thermoplastic veil layers. The productions were made by Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) method and mechanical (three-point bending, low speed impact and ILSS) and dynamic (natural frequency and damping ratio) tests were carried out according to the relevant ASTM standards. With the experimental results obtained, the mechanical and dynamic properties of thermoplastic veil layers in carbon fiber / epoxy-glass fiber/ epoxy composites were examined comparatively in order to determine the effect of both veil layers and different fiber contents.

Findings: In the results of this review, it was found that thermoplastic veil layers improved interlaminar shear strength, low-speed impact resistance and vibration characteristics (natural frequency and damping ratios). However, the thermoplastic veil layers used were either ineffective in terms of bending strength results or they were observed to reduce the strength.

Results: It is very important to include an intermediate layer so that advanced composite materials can be designed more economically and decisively. If the composite structure will be subjected to cutting loads, it will be more appropriate to prefer PA, PPS, PEI and PEEK veils. In addition, it would be a logical approach to use PA veil layered composite structures for composite structures that may be exposed to impact at any time due to operating conditions. Taking into account the structural constraints in terms of durability and effective service life, it is very important to choose the right type of fabric and the appropriate type of thermoplastic veil correctly.

Keywords: Glass fiber, natural frequency, low-velocity impact, carbon fiber, damping ratio, ILSS, thermoplastic veil, three-point bending,

December 2022, 84 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL ve ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM ve İNTİHAL BEYAN FORMU	ivi
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
GİRİŞ	1
KURAMSAL TEMELLER	4
Kompozit Malzeme Üretiminde Termoplastikler	5
Polieterimid (PEI).....	5
Polifenilen sülfür (PPS)	6
Polyamid (PA)	7
Poliimid (PI)	9
Polieter eter keton (PEEK)	9
Kompozit Malzeme Üretiminde Elyaf lar.....	10
Karbon elyaf lar	11
Cam elyaf lar.....	12
Kompozit Malzeme Üretiminde Matrisler.....	12
Termoset matrisler.....	13
Tabakalı Kompozitler.....	14
Elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemeler	14
Elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemeler dinamik analizler	18
MATERYAL ve METOT.....	22
Materyal	22
Yöntem.....	23
Üretimin yapılması	25
Üretilen plakalardan test numunelerinin elde edilmesi	30
Numunelerin malzeme özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi	32

Titreşim (doğal frekans ve sönüm oranları) testi.....	32
İnterlaminar kayma mukavemeti (ILSS) testleri	35
Üç nokta eğilme testleri	36
Düşük hızlı darbe testleri	38
BULGULAR ve TARTIŞMA	41
Titreşim Testi Sonuçları.....	41
Titreşim Analizleri	44
İnterlaminar Kayma Mukavemeti (ILSS) Analizleri	49
Üç Nokta Eğilme Analizleri	53
Düşük Hızlı Darbe (LVI) Analizleri	56
SONUÇ ve ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	69

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Karbon, Cam ve Epoksi Reçine Malzemelerinin Bazı Özellikleri	22
Tablo 2. Termoplastik Keçe Katmanların Özellikleri	23
Tablo 3. Termoplastik Keçe Katmanlı Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üretim Planı	25
Tablo 4. Değerlendirilen Veri Sayısı.....	41
Tablo 5. Termoplastik Keçe Katmanlı Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Üretim Gurubuna Ait Doğal Frekans ve Sönüm Oranı Değerleri	41
Tablo 6. Termoplastik Keçe Katmanlı Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Üretim Gurubuna Ait Doğal Frekans ve Sönüm Oranı Değerleri.....	42
Tablo 7. Termoplastik Keçe Katmanlı Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Üretim Gurubuna Ait Doğal Frekans ve Sönüm Oranı Değerleri	43
Tablo 8. Termoplastik Keçe Katmanlı Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Üretim Gurubuna Ait Doğal Frekans ve Sönüm Oranı Değerleri	43
Tablo 9. Termoplastik Keçe Katmanlı Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin ILSS Testi Sonuçları	50
Tablo 10. Termoplastik Keçe Katmanlı Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin ILSS Testi Sonuçları.....	511
Tablo 11. Termoplastik Keçe Katmanlı Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları	544
Tablo 12. Termoplastik Keçe Katmanlı Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları	544
Tablo 13. Termoplastik Keçe Katmanlı Karbon ve Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Testi Sonrası Elde Edilen Sonuçlar	566
Tablo 14. Termoplastik Keçe Katmanlı Karbon ve Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Testi Sonrası Elde Edilen Sonuçlar	566

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Ara katmanlı elyaf takviyeli kompozit malzeme	2
Şekil 2. Kompozit üretim süreci için şematik görselleştirme.....	23
Şekil 3. a) Cam kumaşlar, b) karbon kumaşlar ve c) termoplastik keçelerin görselleştirilmesi.....	24
Şekil 4. Üretimde kullanılan karbon ve cam elyaf kumaşlar	26
Şekil 5. Üretimde kullanılan termoplastik keçeler	26
Şekil 6. Kumaş ve keçelerin kesimi yapılan masa	27
Şekil 7. Üretimlerin yapıldığı VARTM cihazı.....	27
Şekil 8. Test numunesi elde etmek amacıyla kullanılan kesim şablonu	28
Şekil 9. Kompozit üretim sürecinin şematik görselleştirilmesi	30
Şekil 10. CNC Router ile test numunesi kesme işlemi	31
Şekil 11. Kesim sonrası elde edilen numunelerin etiketlenerek poşetlenmesi.....	31
Şekil 12. Ankastre-serbest sınır şartlı titreşim test numunesi	32
Şekil 13. Titreşim ölçüm sisteminin şematik gösterimi	33
Şekil 14. Titreşim testi deney düzeneği	34
Şekil 15. Yarı güç noktaları (Fu and He 2001)	34
Şekil 16. ILSS test numunesi	35
Şekil 17. ILSS testinde a) kuvvet uygulanmadan önce numune, b) kuvvet uygulandıktan sonra numune	36
Şekil 18. Üç nokta eğilme testi numunesi	37
Şekil 19. Üç nokta eğilme testinde a) kuvvet uygulanmadan önce numune, b) kuvvet uygulandıktan sonra numune	37
Şekil 20. Düşük hızlı darbe test numunesi	38
Şekil 21. LVI testleri için deneysel kurulum şematik gösterimi	39
Şekil 22. Darbe sonrası numunelerde oluşan hasar	39
Şekil 23. Tüm katlara dâhil edilmiş termoplastik keçelerin cam elyaf tabakalı kompozit yapı için, ankastre-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları	44
Şekil 24. Tarafsız eksen konumuna dâhil edilmiş termoplastik keçelerin cam elyaf tabakalı kompozit yapı için, ankastre-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları	44

Şekil 25. Yüzey konumuna dâhil edilmiş termoplastik keçelerin cam elyaf tabakalı kompozit yapı için, ankastre-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları	44
Şekil 26. Tüm katlara dâhil edilmiş termoplastik keçelerin karbon elyaf tabakalı kompozit yapı için, ankastre-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları	45
Şekil 27. Tarafsız eksen konumuna dâhil edilmiş termoplastik keçelerin karbon elyaf tabakalı kompozit yapı için, ankastre-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları	46
Şekil 28. Yüzey konumuna dâhil edilmiş termoplastik keçelerin karbon elyaf tabakalı kompozit yapı için, ankastre-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları	46
Şekil 29. Tüm katlara dâhil edilmiş termoplastik keçelerin cam elyaf tabakalı kompozit yapı için, serbest-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları	47
Şekil 30. Tarafsız eksen konumuna dâhil edilmiş termoplastik keçelerin cam elyaf tabakalı kompozit yapı için, serbest-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları	47
Şekil 31. Yüzey konumuna dâhil edilmiş termoplastik keçelerin cam elyaf tabakalı kompozit yapı için, serbest-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları	47
Şekil 32. Tüm katlara dâhil edilmiş termoplastik keçelerin karbon elyaf tabakalı kompozit yapı için, serbest-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları	48
Şekil 33. Tarafsız eksen konumuna dâhil edilmiş termoplastik keçelerin karbon elyaf tabakalı kompozit yapı için, serbest-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları	48
Şekil 34. Yüzey konumuna dâhil edilmiş termoplastik keçelerin karbon elyaf tabakalı kompozit yapı için, serbest-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları	48
Şekil 35. Termoplastik keçe katmanlı cam elyaf takviyeli kompozitlerin ILSS testi sonuçlarının grafiği.....	511
Şekil 36. Termoplastik keçe katmanlı karbon elyaf takviyeli kompozitlerin ILSS testi sonuçlarının grafiği.....	522

Şekil 37. Termoplastik keçe katmanlı cam elyaf takviyeli kompozitlerin üç nokta eğilme testi sonuçlarının grafiği.....	555
Şekil 38. Termoplastik keçe katmanlı karbon elyaf takviyeli kompozitlerin üç nokta eğilme testi sonuçlarının grafiği	555
Şekil 39. Termoplastik keçelerine uygulanan darbe sonrası oluşan kuvvet/zaman eğrileri...	577
Şekil 40. Termoplastik keçe katmanlı karbon elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan temas kuvveti	577
Şekil 41. Termoplastik keçe katmanlı cam elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan temas kuvveti	588
Şekil 42. Termoplastik keçe katmanlı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan toplam implus	599
Şekil 43. Termoplastik keçe katmanlı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan toplam deplansman.....	599
Şekil 44. Termoplastik keçe katmanlı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan tepe kuvveti	60
Şekil 45. Termoplastik keçe katmanlı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan etkileşim zamanı	60
Şekil 46. Termoplastik keçe katmanlı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan temas rijitliği	61
Şekil 47. Termoplastik keçe katmanlı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan eğilme rijitliği	61
Şekil 48. Termoplastik keçe katmanlı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan absorbe edilen ve iade edilen enerji	622

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

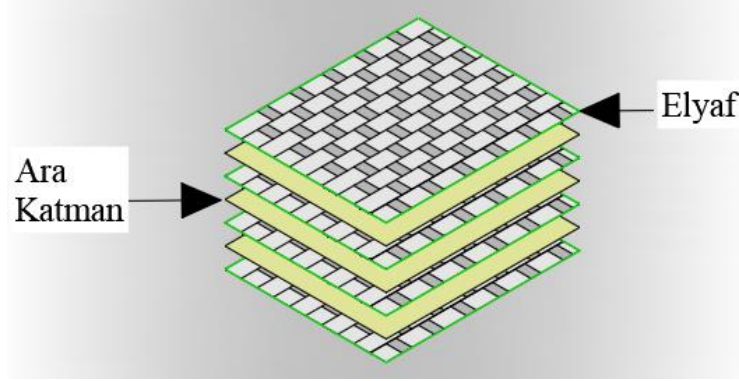
ω	: Frekans
ξ	: Sönüm oranı
σ_e	: Eğilme dayanımı
μm	: Mikron
ω_n	: Doğal frekans
ARALL	: Aramid elyaf takviyeli alüminyum laminat
ASTM	: Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
b	: Genişlik
C	: Cam
CARALL	: Karbon elyaf takviyeli alüminyum laminat
CE	: Cam elyaf
CETK	: Cam elyaf takviyeli kompozit
CETP	: Cam elyaf takviyeli plakalar
E_e	: Eğilme dayanımı
EML	: Elyaf metal laminat
ETP	: Elyaf takviyeli polimer
ETTK	: Elyaf takviyeli tabakalı kompozit
GLARE	: Cam elyaf takviyeli alüminyum laminat
h	: Yükseklik
L	: Uzunluk
P	: Maksimum kuvvet (Eğilme)
UV	: Ultraviyole ışığı
VARTM	: Vakum destekli reçine transfer kalıplama

GİRİŞ

Kompozit malzemelerin tarihi insanlık tarihi kadar eskidir. Öyleki binlerce yıl geçmişe dayanmaktadır. İnsanoğlu yaşamın bir gereği olarak günlük ihtiyaçlarını karşılamak veya hayatta kalabilmek ve katıldığı savaşlarda kazanmak için daha iyi özelliklere sahip yeni malzemeler elde etmeye gayret göstermiştir. Bu amaçla birden çok malzemeyi ya karıştırmış ya da birleştirmiştir (Aydin, 2019). Daha dayanıklı binaların inşaatı için çamur içine saman karıştırması ve savaşlarda kullandıkları ok başları için farklı iki metali ergiterek birleştirmesi buna örnek gösterilebilir (Sahin, 2000). İmal edilen bu yeni malzemenin, kendisini oluşturan bileşenlerden daha iyi yapısal özelliklere sahip olması beklenir. Dolayısıyla, makroskobik seviyede bir araya getirilen ve birbiri içinde çözülmeyen iki ya da daha fazla bileşenin bir takım çalışma karakteristiği sonucu üretilen, mükemmel mekanik, dinamik ve fiziksel özelliklere sahip multifonksiyonel malzemelere kompozit malzemeler denmektedir. Kompozit malzemeler, takviyesiz (monolitik) malzemelerle mümkün olmayan yüksek dayanım, yüksek rijitlik, estetik görünüm, düşük ağırlık, iyi korozyon direnci, yüksek yorulma dayanımı, mükemmel aşınma direnci, yüksek sıcaklık kapasitesi ve iyi ısı iletkenliği gibi güçlü özelliklerinden dolayı başta makine mühendisliği olmak üzere birçok disiplinde ve yeni teknolojik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır (Besergil, 2016). Kompozit malzemelerin birçok türü günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. Fakat elyaf takviyeli tabakalı kompozitler (ETTK) mühendislik uygulamalarında daha çok tercih edilmektedir. Çünkü elyaf takviyeli kompozitler yumuşak ve sünek matris içine elastikliği yüksek, gevrek ve daha dayanıklı elyaflarlar ilave edilerek üretilirler. Bu durum ETTK'ları mekanik (daha iyi çekme dayanımı, yorulma dayanımı, özgül modül ve özgül dayanım) ve dinamik (daha iyi sönümleme ve titreşim karakteristiği) özellikleri bakımından iyileştirir (Sahin, 2000).

Elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemelerin monolitik malzemelerden birçok yönden üstün olması ve teknolojinin süratle gelişmesi kompozit malzeme araştırmalarını bilimsel ve endüstriyel bazda hızlandırmıştır. Özellikle son yıllarda bu yapıların, yüksek dayanım ve istenilen hafifliğe sahip olması onları daha da geliştirmeye yönelik çabaları artırmıştır. Bilimsel ve endüstriyel araştırmalar incelendiğinde, daha yüksek yapısal özellikler elde etmek için takviye elemanlarını ve/veya matris yapısını geliştirme yoluna gittikleri gözlemlenmektedir. Bu kapsamda, daha iyi mekanik ve dinamik özelliklere sahip kompozit malzeme elde etmek için ara katman olarak farklı elyaflar arasına farklı keçe katmanları dâhil

edilerek ara katmanlı kompozit malzemelerin kullanımı gündeme gelmiştir. Kompozit yapıya ara katman ilave etmekteki temel amaç, kullanılan elyafların zayıf yanlarını ara katman ile güçlendirip bu ara katmanın avantajlarını yeni oluşturulan kompozite aktarmaktır. İçeriğinde hem elyaf hemde ara katman barındıran bu tür kompozit yapılara ara katmanlı elyaf takviyeli kompozit malzemeler denmektedir. Oluşturulan bu yeni kompozitte yaygın olarak karbon elyaf (KE) ve cam elyaf (CE) kullanılmaktadır. Bahsedilen bu yapı Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Ara katmanlı elyaf takviyeli kompozit malzeme

Ara katmanlı elyaf takviyeli kompozit malzemeler; uzay, havacılık, savunma sanayi, raylı sistemler, spor aletleri, alternatif enerji sistemleri, deniz üstü ve deniz altı araç ve ekipmanları, otomotiv ve inşaat gibi birçok sanayi ve endüstri alanlarında kullanımına uygundur. Geniş bir kullanım alanı için uygun olan bu malzemeler, çalışma ortamları gereği mekanik ve dinamik yüklere maruz kaldıkları için hizmet ömürleri olumsuz etkilenmektedir. Bu durum, oluşturulan bu yeni yapıların emniyetli kullanımı açısından giderilmesi gereken ciddi bir problemdir.

Bu tez çalışmasındaki temel amaç, hizmet ömürleri bu tür yüklere maruz kalabilecek ara katmanlı elyaf takviyeli kompozit yapılarda kumaş ve ara katman türünün mekanik ve dinamik davranışlar üzerine olan etkisinin deneysel olarak analizlerinin yapılmasıdır. Tez çalışması kapsamında ara katman olarak beş farklı termoplastik keçe kullanılmıştır. Bunlar; PEI (polieterimid) keçe, PPS (polifenilen sülfür) keçe, PI (poliimid) keçe, PA (poliamid) keçe ve PEEK (polietereterketon) keçe şeklindedir. Takviye elemanı olarak ise; karbon elyaf (KE) ve cam elyaf (CE) kullanılmıştır. İncelenilen literatür araştırmalarında, farklı ara katman ve elyaf türü kullanılarak üretilmiş kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ile ilgili çalışmalara rastlanılmıştır. Bu çalışmaların çoğu termoplastik keçe katmanlı cam elyaf takviyeli ve/veya karbon elyaf takviyeli olup ekseriyetle kırılma tokluğu üzerine çalışıldığı görülmüştür. Fakat birden fazla termoplastik keçe katmanı kullanılarak ve yine birden fazla mekanik analiz yapılarak araştırma yapıldığına rastlanılmamıştır. Dolayısıyla bu çalışma ile birden fazla termoplastik keçe (beş farklı keçe) ve iki farklı elyaf (karbon ve cam) kullanılarak, dinamik ve

mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kompozit plakalar VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding) yöntemiyle üretilmiştir. Üretim sonrası elde edilen plakalardan, ilgili ASTM standartlarına göre test numuneleri (titreşim, üç nokta eğilme, düşük hızlı darbe, interlaminar kayma mukavemeti ve yoğunluk) “CNC Router” kullanılarak kesilmiştir.



KURAMSAL TEMELLER

Malzemeler, tamamen doğal veya insan yapımı yapıların temel unsurlarıdır. Teknolojik ilerleme, mevcut malzeme özelliklerinin sürekli iyileştirilmesinin yanı sıra yapısal malzeme sınıflarının ve türlerinin genişletilmesi ile ilişkilidir. Genellikle yapısal verimlilik ve performansın iyileştirilmesi nedeniyle yeni malzemeler ortaya çıkar. Kompozit malzemeler, 20. yüzyılın ortalarında, modern teknoloji için yeni ufuklar açan umut verici bir mühendislik malzemeleri sınıfı ortaya çıktı. Genel olarak, farklı özelliklere ve bileşenler arasında farklı sınırlara sahip iki veya daha fazla bileşenden oluşan malzemeye kompozit malzeme denilebilir. Dahası, tek tek bileşenlerle elde edilemeyen özelliklere sahip bir malzeme üretmek için birkaç bileşeni birleştirme fikri, insan tarafından binlerce yıldır kullanılmaktadır. Göze çarpan bir diğer gelişme ise, malzeme bilimi ve mühendislik girdilerinin, bir öğenin tasarlanmasından devreye alınmasına, kullanım ömrü boyunca denetime ve arıza analizine kadar her seviyedeki üretim ve tasarım girdileriyle entegrasyonu olmuştur (Bunsell et al., 2021). Bu, yaşamın her alanında hafif ancak güçlü ve sağlam yapılara olan talebin artmasına neden oldu. Bu durum modern kompozitlerin hızla gelişmesini sağlamıştır. Modern kompozit malzemelerin geliştirme süreci son 80 yıl boyunca aşamalı bir şekilde devam etmektedir. Cam elyaf takviyeli malzemeler ilk aşamayı oluşturmaktadır. 1940'larda cam elyaflar hafif ve daha düşük mukavemetli bir polimerle birleştirilerek daha güçlü yeni bir malzeme üretildi. Burada polimer matris olarak, cam elyaflar ise takviye olarak kabul edildi. Oluşan bu yeni yapıda polimer, lifleri düşük gerilme seviyelerinde kırılmaya karşı korurken, lifler ise polimerden lif / matris ara yüzeyinden aktarılan gerilmenin çoğunu omuzlayarak kırılğan polimerlerin mukavemetini artırır. 1942'ye gelindiğinde ise ilk cam elyaf takviyeli plakalar (CETP) üretildi. Hafif ve güçlü olan CETP, metal muadillerine göre korozyona daha dayanıklı ve bakımları kolaydı. CETP teknolojileri 1950'lerde birçok mühendislik alanına hızla uygulandı, ancak askeri uzay programlarından gelen yeni talepler genel bir kompozit malzeme kavramına yol açtı. Bu da ikinci aşama olan, yüksek performanslı kompozit malzemeleri doğurdu. Örneğin, uzay araçları, CETP'den daha hafif ve daha güçlü bileşenler gerektirir. 1960'lı yıllarda üstün mekanik özellikleri, işleme yetenekleri ve daha düşük maliyetleri nedeniyle karbon elyaf ortaya çıktı. Karbon elyaf, 1970'lerden itibaren spor ürünlerinde yaygın olarak kullanıldı ve grafit tenis raketleri ve golf sopaları ahşap ve çelik malzemelerin yerini aldı. 1990'larda hem akademik hem de endüstriyel araştırmacılar, hibrit kompozitler, nanokompozitler ve biyokompozitler (yeşil kompozitler) gibi yeni nesil kompozitlerin keşfi ile üçüncü aşamaya geçtiler (Li, 2022).

Günümüzde gelinen nihai aşamada ise, bilimsel ve endüstriyel seviyede araştırmalar devam etmektedir.

Kompozit Malzeme Üretiminde Termoplastikler

Teknolojik gelişmeler, malzeme alanındaki ilerlemeler ile doğru orantılı olduğu bir gerçektir. Yani hangi alanda olursa olsun, ilerleme malzemelere bağlıdır. Bu bağlamda kompozit malzemelerin gelişim tarihine 1960'ların başlangıcı diyebiliriz. Bu tarihin başlangıcından beri, daha sert ve daha güçlü ancak daha hafif olan malzemelere havacılık, enerji, makine ve inşaat gibi çeşitli alanlarda giderek artan bir talep olmuştur. Asıl amaç daha iyi genel bir performans elde etmek olduğu için malzemelerden beklentiler de o yönde artmıştır (Chawla, 2012). Elyaf takviyeli polimer matris kompozitler (ETPK), yüksek mukavemet/ağırlık oranları ve mükemmel yapısal performansları nedeniyle çeşitli uygulamalar için geleneksel metallerin yerini alabilmektedir. Fakat ETPK'ların tabaka yapısı, düzlem dışı özellikleri tipik olarak kırılma, çatlamaya duyarlı matris yapısına sahiptir. Bu durum; sıkıştırma, yorulma ve düzlem dışı yükleme koşulları altında matris kırılması, fiber kopması, tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) gibi yıkıcı arıza riskleri bu kompozit yapıların mekanik ve dinamik performansını olumsuz etkiler. Bu durum, ETPK'ların daha yaygın uygulama ve kullanım koşullarını sınırlar. Dolayısıyla çeşitli yükleme koşulları altında gelişmiş mekanik ve dinamik performansa sahip kompozit yapıları üretebilmek için uygun laminar takviye tekniklerinin geliştirilmesi gereklidir. Bu bağlamda beş farklı termoplastik keçe (PEI, PPS, PA, PI ve PEEK) katmanı kullanarak daha gelişmiş mekanik ve dinamik performansa sahip kompozit yapılar imal edilerek tez çalışmasının amacına ulaşılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan termoplastik keçeler hakkında detaylı bilgi aşağıda sunulmuştur.

Polieterimid (PEI)

Polimer zincirinde hem eter bağlantıları hem de imid grupları bulunan amorf bir termoplastiktir. İlk olarak General Electric tarafından Ultem® ticari adı altında tanıtılmıştır. PEI'lar eriyerek işlenebilir ve bu sırada performans avantajlarının çoğunu koruyabilirler. Sonuç olarak, PEI termoform edilebilir, ekstrüzyon üfleme ve enjeksiyonla kalıplanabilir ve / veya ekstrüde edilebilir, ancak bu işlemler için yüksek işleme sıcaklıkları gereklidir. PEI, uzun süreli ısı direnci, boyutsal kararlılık ve yüksek sıcaklıklarda fiziksel ve mekanik özelliklerin mükemmel kararlılığı ile bilinir. 200°C'ye kadar öngörülebilir sertliğe ve mukavemete sahiptir. Ayrıca doğal alev direncine sahiptir ve tutuşması zordur. PEI, ısı direnci, solvent direnci ve alev direnci nedeniyle tıbbi ve kimyasal cihazlarda kullanılır. Ayrıca elektrikli / elektronik uygulamalarda ve otomotiv ve havacılık uygulamalarında kullanılır (Larson, 2015).

PEI nin özellikleri;

- Yüksek sürekli çalışma sıcaklığı (200°C),
- Yüksek mukavemet,
- Yüksek sertlik,
- Geniş bir sıcaklık aralığında yüksek sürünme direnci,
- Yüksek boyutsal kararlılık,
- Çok iyi hidroliz direnci (tekrar eden buharlı sterilizasyona uygun),
- İyi elektrik yalıtımı,
- İyi radyasyon direnci,
- Klor ve kostik/asidik temizlik maddelerine karşı iyi kimyasal direnç sağlar (Ensinger, 2022, Aralık 4).

Polifenilen sülfür (PPS)

Benzersiz bir özellik dengesine sahip özel bir mühendislik termoplastığıdır. Olağanüstü kimyasal direncin yanı sıra yüksek sıcaklıklarda yüksek sertlik ve mukavemet sağlar. Yarı kristalli bir termoplastiktir. Tüm yarı kristalli termoplastikler gibi, katı formunda hem amorf hem de kristal bileşenlere sahiptir. PPS olağanüstü kimyasal dirence, termal kararlılığa, boyutsal kararlılığa ve yangına dayanıklılığa sahiptir. Organik çözücülere ve inorganik tuzlara ve bazlara karşı duyarsız, gıdalarla temasa uygun korozyona dayanıklı bir kaplama olarak olağanüstü performans sağlar. Phillips Petroleum, ilk ticari PPS sınıflarını 1968'de Ryton ticari adı altında tanıttı. Çok yüksek bir viskoziteye sahipti ve başlangıçta sıkıştırılarak kalıplanabilen doğrusal bir polimerdi. Şu anda kömür kazanları, çeşitli ambalajlar için filtre kumaş yapımı, kâğıt yapım keçeleri, elektrik yalıtımı, özel membranlar ve contalar için kullanılmaktadır (Larson, 2015).

PPS plastiklerin sunduğu özellikler:

- Yüksek saflık özellikleri
- Yüksek kristallik
- İyi elektrik yalıtımı
- Yüksek mekanik dayanım
- Mükemmel yüksek sıcaklık direnci
- Çok yüksek kimyasal direnç
- Sürünme direnci
- Çok çeşitli sıcaklık ve nem seviyelerinde boyutsal stabilite özelliklerine sahiptir (Ensinger, 2022, Aralık 4).

Polyamid (PA)

1935 Yılında DuPont kimyacısı Wallace Carothers tarafından icat edilen PA, bir polimer ailesidir. Ailenin genel adı "nylon."dur. Bu polimerler, amid bağları yoluyla birbirine bağlanan monomer zincirleri içerir, dolayısıyla "poliamid " adını alır. En yaygın türler nylon 6 ve nylon 6/6'dır. Ancak nylon 11, nylon 12, nylon 5/10 ve nylon 6/12 dâhil olmak üzere daha özel türler de vardır. Nylonun bazı benzersiz özellikleri vardır. İlk olarak, yarı kristalli bir malzemedir ve çoğu yarı kristalli malzeme gibi mükemmel kimyasal dirence sahiptir. İkincisi, nispeten yüksek bir erime noktasına sahiptir ve bu nedenle yüksek son kullanım sıcaklıklarına dayanabilir. Üçüncüsü, doğası gereği çok fazla kayganlığa ve aşınma ve yıpranmaya karşı mükemmel dirence sahiptir. Dördüncüsü, nylon nemi atmosferden veya doğrudan suyla temastan emer, bu da fiziksel özelliklerini (daha sert ve daha esnek hale getirir) ve ayrıca genel boyutlarını etkiler. Nylon ayrıca iyi mekanik özelliklere, uzamaya, gerilme altında benzersiz bir akma davranışına ve makul sertliğe sahiptir.

Yaygın olarak kullanılan bazı PA türleri;

- *Poliamid 6/6 (Nylon 6/6, PA 6/6) yarı kristalli PA*, en popüler mühendislik termoplastiklerinden biridir. Genellikle yüksek mukavemet, yüksek sertlik ve ısı altında iyi stabilite gerektiğinde kullanılır. Otomotiv endüstrisinde fanlar, rondelalar, diş teli ve muhafazalar gibi başlık altı uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Cam takviye ile radyatör uç kapakları ve emme manifoldları için de kullanılır.
- *Poliamid 6 (Nylon 6, PA 6)*, PA 6 / 6'dan biraz farklı bir kimyasal yapıya sahip yarı kristalli bir PA'dır. PA 6, PA 6 / 6'ninkinden biraz daha düşük bir erime sıcaklığına sahiptir, bu nedenle daha düşük ısı direncine sahiptir. PA6 lifleri, yüksek mukavemetinin yanı sıra parlaklık ve esnekliğe sahiptir. Enjeksiyon kalıplama ile üretilen cam takviyeli PA 6 parçaları, cam takviyeli PA 6/6'dan yapılan parçalardan daha yüksek bir yüzey parlaklığına sahiptir. Bu nedenle, birçok elektrikli el aleti ve ofis mobilyası parçası cam takviyeli PA 6'dan (veya cam takviyeli PA 6 / PA 6/6 alaşımından) yapılır. PA 6'nın kullanımı diş fırçası kıllarından dişlilere, bağlantı parçalarına ve yataklara kadar uzanır. Aynı zamanda cerrahi dikişler, hem klasik hem de akustik müzik aletleri için teller ve lastik kordonlar olarak da kullanılır.
- *Poliamid 6/10 (Nylon 6/10, PA 6/10)* diğer nylonlara kıyasla düşük nem emilimine sahip yarı kristal bir PA'dır. Bu yüzden ıslandığında özelliklerini daha iyi korur. Çoğu nylon formuna benzer şekilde, PA6/10 dokunulduğunda pürüzsüzdür ve mattan parlaklığa kadar değişecek şekilde üretilir. Nylon 6/10, kumaş lifleri ve fırça

kılları yapmak için ince filaman liflerine ekstrüde edilebilir veya diğer sertleştirilmiş plastik parçalara benzer şekilde önceden belirlenmiş bir şekle dökülebilir.

- Poliamid 6/12 (Naylon 6/12, PA 6/12) başka bir düşük nem emici naylondur. Kimyası nedeniyle nem emildiğinde daha az boyutsal bir değişime uğrar. PA 6, PA 6/6 veya PA 6/10'dan daha düşük kalıp büzülmesine ve PA 6/10'dan daha iyi ısı direncine sahiptir. Genellikle bir kaplama malzemesi olarak kullanılır.
- Poliamid 11 (Naylon 11, PA 11) bir başka düşük nemli naylon olan PA 11, organik bir malzemeden elde edildiği için benzersizdir. Mükemmel bir özellik dengesine sahiptir ve aynı zamanda oldukça esnektir. Genellikle hidrolik hortumlarda, vakum, yakıt, buhar, hava ve fren hatları için borularda kullanılır.
- Poliamid 12 (Naylon 12, PA 12) diğer türler ile kıyaslandığında en düşük nem emilimine sahiptir ve PA 11'den daha serttir. PA 12, kuru koşullarda tüm naylonların en sert ve en esnek olanıdır. Suya doyurulduğunda diğer naylon türlerinden daha sert ve katıdır. Islak veya kuru olsun, aşınmaya karşı en büyük dirence sahiptir. Kurduğunda düşük sıcaklıklarda yüksek darbeye dayanıklıdır, ancak naylon 6 ve 6,6 ıslanıldığında daha iyi darbe direncine sahiptir.

Naylon kimyası ayrıca özel katkı maddelerinin ve değiştiricilerin kullanımını kolaylaştırır. Cam ve karbon elyafları genellikle takviye edici maddeler olarak kullanılır. Cam ve karbon takviyeli naylon, mukavemet, sertlik, dayanıklılık ve kimyasal kombinasyonu nedeniyle elektrikli el aletleri gibi araç ve gereçlerin muhafazaları için tercih edilen malzeme haline gelmiştir. Dahası naylon; otomotiv, havacılık ve uzay teknolojisi, deniz üstü ve deniz altı araç ve gereçleri gibi hemen hemen her endüstride yüksek performanslı uygulamalarda kullanılır. Tüm plastiklerin atası olan naylon, dünyanın en yaygın kullanılan mühendislik malzemelerinden biri olmaya devam ediyor (Larson, 2015).

Poliamid plastiğin sunduğu bazı özellikler:

- Yüksek aşınma direnci,
- Yüksek termal stabilite,
- Çok iyi dayanım,
- Yüksek mekanik sönümlleme özellikleri,
- İyi kayma özellikleri,
- İyi kimyasal direnç gibi özelliklere sahiptir (Ensinger, 2022, Aralık 4).

Poliimid (PI)

PI termoset veya termoplastik olabilir. İlk termoplastik versiyonlar tamamen eriyerek işlenemezdi. Yapılan iyileştirmeler ile enjeksiyonla kalıplanabilen ve/veya ekstrüde edilebilen geliştirilmiş versiyonlarına dönüştürüldü. Bu gelişmiş versiyonlarına genellikle termoplastik poliimidler (TPI) denmektedir. PI, son derece güçlü, ısıya ve kimyasala dayanıklı bir polimerdir ve ayrıca aşınmaya ve radyasyona karşı dayanıklıdır. Bir termoset formunda, PI genellikle bir rulo veya tabakadan film şeklinde kullanılır. Güçlü özellikleri nedeniyle son derece ince yapılabilirler ve dahası hafif ve esnektirler. Genellikle esnek kablolar için, dizüstü bilgisayarlarda, cep telefonlarında ve diğer elektronik uygulamalarda kullanılırlar. Termoplastik olarak PI, film veya katı halde kullanılabilir. TPI, mevcut en ısıya dayanıklı termoplastiklerden biridir. Kimyasal ve aşınma direnci ile birlikte mükemmel fiziksel özelliklere sahiptir. TPI ayrıca doğal bir alev geciktiricidir. TPI uygulamaları arasında; otomotiv ve arazi aracı şanzımanları için baskı rondelaları ve conta halkaları, yüksek hızlı fotokopi makineleri için ısı yalıtıcıları jet motoru bileşenleri, spline kaplinler, ısıya dayanıklı dişliler, kanatlar, aşınma şeritleri, valf yuvaları, mafsal yatakları ve yatak tutucuları bulunur. Güçleri ve diğer özellikleri, onları şasi ve desteklerden kaputun altında bulunan bazı parçalara kadar otomobillerde kullanım için ideal kılar (Larson, 2015).

PI plastiklerin sunduğu özellikler:

- Erimeyen yüksek sıcaklık poliimidi
- Uzun süreli termal dayanım 300°C (kısa süreli 400 °C'ye kadar)
- 470°C'ye kadar yüksek ısı dayanımı
- -270°C'ye kadar iyi kriyojenik özellikleri
- 260°C üzeri yüksek sıcaklıklarda dahi yüksek dayanım, katsayı ve sertlik
- Mükemmel ısı ve elektrik yalıtımı
- Vakum koşullarında yüksek saflık seviyesi, düşük gaz çıkışı
- İyi işlenebilirlik
- Kendinden alev geciktirici özelliklerine sahiptir (Ensinger, 2022, Aralık 4).

Polieter eter keton (PEEK)

Polimer zincirinde keton grupları içeren bir malzeme ailesidir. Bu zincirlerdeki bağlantılar doğrusal (alifatik), halka şeklinde (aromatik) veya kombinasyon halinde (yarı aromatik) olabilir. Aromatik poliketonlar en yaygın kullanılanlardır. PEEK, olağanüstü yüksek sıcaklık özelliklerine sahip başka bir benzersiz ailedir. PEEK ailesinde polieter keton, polietereterketon, polieter keton ve polieter keton eter keton dahil olmak üzere çok sayıda

malzeme vardır. Aile içinde ince farklılıklar olsa da, bu malzemelerin tümü, yüksek mukavemet ve tokluğa, yüksek kimyasal dirence ve yüksek sıcaklık direncine sahip yarı kristal mühendislik termoplastikleridir (Larson, 2015). PEEK malzeme (kimyada polietereeterketon olarak bilinir), mükemmel kimyasal uyumluluk sunan eşsiz bir yarı kristal mühendislik termoplastiğidir. Yüksek sıcaklık plastiği PEEK polimerinden üretilen parçalar aynı zamanda 260°C'ye kadar sıcaklıklarda çalışabilir ve erime noktası 341°C civarındadır. PEEK plastik genellikle sıcak su veya buhar ortamlarında kullanılmakta olup esneme ve çekme dayanımı gibi fiziksel özelliklerini büyük ölçüde korur. Polietereeterketon genellikle yüksek fiyat eğilimindeki mühendislik termoplastiklerinden biri olarak görülmektedir. Ancak, PEEK malzemelerin daha hafif, daha güçlü ve zorlu ortamlarda daha uzun süre dayanan parçalar üretme imkânı sunması maliyetine rağmen tercih edilir kılmıştır.

PEEK plastiklerin sunduğu özellikler:

- Uzun süreli sıcaklık dayanımı: 260°C
- Kısa süreli sıcaklık dayanımı: 300°C
- Camsı geçiş sıcaklığı: 150°C
- Erime noktası: 341°C
- Yük altında deformasyon sıcaklığı: 162°C

gibi özelliklere sahiptir (Ensinger, 2022, Aralık 4).

Kompozit Malzeme Üretiminde Elyaf

Elyaf takviyeli kompozitleri, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla kurucu malzemeden (lifler, reçineler, dolgu maddeleri ve katkı maddeleri) yapılır. Bu bileşenler, tamamen karışmadan ve hatta mikroyapısal özelliklerini kaybetmeden tamamlanmış kompozit ürünlerdeki kimliklerini korurlar. Tamamlanmış ürün (kompozit), bileşenlerine göre üstün termomekanik performans sergiler. Örneğin, lifler sıkıştırmada zayıftır ve kesmeyi bir elyaftan diğerine aktarmazken, sertleştikten sonra bağlayıcı (polimer reçinesi) (yaygın olarak matris olarak bilinir) kesme transfer kabiliyetini ve basınç dayanımını sağlar; Birlikte cam, karbon veya diğer liflerden yapılmış bir kompozit oluştururlar veya epoksi veya poliüretan gibi polimerik reçineli kumaşlar. Kompozitler, mukavemet ve sertlik sağlayan farklı liflerle (cam, karbon, aramid veya bitki bazlı) özel olarak üretilirken, polimer matrisi lifler arasında kuvvet transferi sağlar. Ayrıca matris, lifi çevresel bozulmadan korur ve bir ürünün yüksek hacimli olarak verimli bir şekilde üretilmesine yardımcı olur.

Polimer kompozitler belirli bir lif ile tanımlanır. Örneğin, cam veya karbon fiberli kompozitlere sırasıyla cam elyaf takviyeli (CETK) kompozitleri veya karbon elyaf takviyeli

kompozitler (KETK) denir. Ayrıca kompozit üreticileri ve kullanıcıları bu ürünleri elyaf takviyeli kompozitler (ETK), cam takviyeli plastikler (CTP) ve polimer matrisli kompozitler (PMK) olarak adlandırılmaktadır. Doğada bulunan çeşitli kompozit örnekleri sayesinde, modern sentetik kompozit saha uygulaması ancak 1940'ların sonlarında kaliteli cam takviyelerinin ve oda sıcaklığında kürlenmiş reçinelerin ortaya çıkmasıyla başladı. Leo Hendrik Baekeland, 1900'lerin başında sentetik reçinelerle modern kompozitler icat etmesine rağmen, kompozitler ancak II. Dünya Savaşı'ndan sonra çok çeşitli uygulamalarda başarıyla kullanılmıştır. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra ABD'li üreticiler camelyaf ve polyester reçine kompozit levhalar üretmeye başladılar ve otomotiv endüstrisi ilk kompozit araç gövdelerini 1950'lerin başlarında piyasaya sürdüler. Polimer kompozitleri tercih etmenin bariz nedenleri, korozyon direnci ve manyetik şeffaflığı, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve şekillendirme kolaylığıdır. Modern kompozitler esas olarak cam, karbon ve/veya aramid takviyelerinden yapılır. Ek olarak, elyaf ve reçine arasındaki bağlanma özellikleri, üretim süreci iyileştirmesi ve maliyet düşürme gibi yapısal performansı iyileştirmek için kompozitlerde çeşitli katkı maddeleri ve dolgu maddeleri kullanılır (GangaRao & Prachasaree, 2021).

Karbon elyaflar

Karbon elyaflar, nispeten yüksek sertlik/ağırlık oranı nedeniyle havacılık ve ileri kompozit uygulamalar için en yaygın şekilde kullanılan malzemedir. Karbon elyaflar yüksek sıcaklık, yorulma, korozyon dayanımı ve kimyasal direnç gibi birçok güçlü özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, karbon elyafların mekanik özellikleri, üretim sürecinde kullanılan öncüllere bağlı olarak geniş ölçüde değişmiştir. Tipik olarak, karbon elyaf ağırlıkça karbonun en az % 90'ını içerir (daha fazlası grafit elyafı oluşturur). En yaygın öncüler poliakrilonitril (PAN), petrol veya kömür katranı, fenolik lifler, selülozik lifler vb. Karbon elyaflar, filament ipliklere bükülmüş sentetik polimerlerden (PAN gibi) üretilir. Karbon elyaflar, kimyasal ve mekanik işlemlerle ısıtma ve gerdirme işlemi ile tamamlanır. Tipik olarak, karbon elyaf filamenti 5-10 µm çapa sahiptir.

Karbon elyafların avantajları; (1) ağırlığına oranla yüksek mukavemeti ve sertliği (2) yüksek yorulma, tokluk ve kopma direnci, (3) yüksek boyutsal kararlılık, (4) düşük aşınma, (5) düşük ısıl genleşme katsayısı, (6) iyi titreşim sönümleme ve (7) yüksek korozyon direnci ve kimyasal inertliktir (kimyasal olarak aktif olmama). Karbon elyafların dezavantajlarından bazıları yüksek maliyet ve kırılabilirlik, elektriksel iletkenlik ve elektromanyetik özellikleri içerir; bu dezavantajlar bazı uygulamalarda potansiyel kullanımlarını sınırlayabilir.

Cam elyaflar

Cam elyafları, ETP kompozitleri için en yaygın elyaf türüdür. Genel olarak, cam elyafları diğer elyaflardan (karbon ve aramid elyaflardan) daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, cam elyafı, polimer kompozitlerdeki karbon elyaftan takviye olarak maliyet açısından çok daha düşüktür ve önemli ölçüde daha az kırılmandır. Cam elyafları, silika kumu, kireçtaşı, florspar, kaolin kili, dolomit, kolemanit ve diğer minerallerin kombinasyonlarıyla eritilmiş bir bileşen olan sıvıdan yapılır. Erimiş cam, burç içinden tipik bir 5–25µm çapa kadar ekstrüde edilir.

Cam elyafların en önemli özellikleri korozyon direnci, düşük maliyet ve yüksek mukavemetine sahip olmalarıdır, ancak şiddetli higrotermal (yani, yük ve nem altında mukavemet kaybı) ortamlarda nispeten düşük sertlik, yorulma dayanıklılığı ve bozulma eğilimleri ileri uygulamalarda cam elyaf kullanılmasını sınırlar. Cam elyaflar, S tipi (yapısal tip), E tipi (elektrik tipi) ve C tipi (kimyasal direnç tipi) şeklinde üç çeşit üretilirler. S tipi, diğer tiplere göre daha yüksek mukavemetlidir. E tipi, düşük alkali içeriği, düşük maliyetli, korozyona karşı düşük duyarlılık ve yüksek mekanik özelliklerine sahiptir. C tipi ise, yüksek korozyon ve kimyasal direnç gösteren elyaf türüdür.

Kompozit Malzeme Üretiminde Matrisler

Matrisin birçok işlevi vardır. Lifleri bir arada tutar, böylece yükü ara yüzeyden takviye liflerine ve kompozite aktarır. Yüklerin bir kısmını, özellikle enine gerilimi, intralaminar kayma gerilmesini ve yatak gerilmesini taşır. Bu nedenle matris seçimini lif ağırlıklı özelliklerden daha fazla etkilerler. Sıcaklık aralığı, kimyasal direnç, aşınma direnci ve ayrışma kabiliyeti gibi matrisin özellikleri, kompozitin hizmet koşullarını belirler.

Matris malzemeleri polimerler, metaller veya seramikler olabilir. Polimer matrisler, düşük takım maliyetleri, düşük sermaye yatırımı ve üretim maliyetleri ile çok karmaşık parçaların imalatında kolaylık sağlaması nedeniyle en yaygın olanlarıdır. Birçok ticari kompozit uygulamaları başlangıçta güçlendirilmemiş plastikler kullanılarak tasarlanmıştır. Parça entegrasyonu, düşük maliyetli takımlar ve estetik tasarım için sınırsız özgürlük avantajları sayesinde, güçlendirilmemiş plastikler birçok yapısal olmayan uygulamada öncekilerin yerini aldı. Fakat sürekli yükleme altında sürünme (bir malzemenin sabit bir yük veya gerilme altında uğradığı plastik deformasyonun zamana bağlı değişimi) problemlerinden muzdariptirler. Bu problemin çözümü plastiklerin takviyesi ile olmuştur. Plastiklerin elyaf veya elyaf sistemlerle takviye edilmesi sürünme problemini neredeyse ortadan kaldırarak polimer matrisli kompozitleri yapısal uygulamalar için uygun hale getirir. Tasarımcının kontrolü

altındaki mekanik özelliklerin sürekli ve neredeyse sınırsız değişimi, izotropik malzeme sistemlerinde bulunmayan optimizasyon fırsatları sunar. İşlevsel gereksinimler, uygulamanın gerektirdiği işlevsel ve yapısal özellikleri dengeleyerek bir matris seçimine rehberlik eder. Polimer matrisin korozyon direnci ve yanıcılığı gibi matris ağırlıklı parametrelere seçim sürecinde özel önem verilmektedir. Enine sertlik ve mukavemet gibi bazı özelliklere matris hakimdir ve liflerin etkisi azdır. Ayrıca, her reçine her işleme tekniği ile işlenemez. Matrisin seçimi, kullanılan işleme tekniğini belirleyebilir. Özetle, tasarımcı, uygulamanın işlevsel gereksinimlerini karşılayan birkaç aday matris sistemi seçtiğinde, sistemin mekanik, korozyon, yanıcılık ve işleme yeteneklerini mümkün olan en düşük maliyetle optimize etmeye odaklanabilir (Barbero, 2018). Tüm bu faktörler göz önünde bulundurularak, kullanılacak termoplastik keçeler ile elyaflar için uygun olması nedeniyle tez çalışmamızda, bir termoset ailesinden olan *epoksi reçine sistemi* seçilmiştir.

Termoset matrisler

Termoset reçineler, elyaf takviyesinin mükemmel şekilde emprenye edilmesini ve yüksek işlem hızlarını sağlayan düşük viskoziteye sahiptir. Ayrıca, işleme kolaylığı ve geniş performans yelpazesi nedeniyle kompozit sistemlerde kullanılan en yaygın reçine sistemleridir. Raf ömrü, karıştırılmamış reçine sisteminin bozulmadan depolanabileceği zamandır. Kap ömrü veya jel süresi, viskozite artık işlemenin mümkün olmadığı bir noktaya gelmeden önce karışık reçinenin işlenebileceği zamandır. Jel süresi, reçineler için ASTM D2471 ve karbon / epoksi prepreg için ASTM D3532 ile belirlenebilir.

En yaygın termoset reçineler, vinil ester, poliestерler, fenolik ve epoksidir. *Vinil esterler* arızaya karşı daha yüksek bir uzamaya sahip olabilir, bu da takviyeye daha fazla yük aktarılmasına ve poliestерlere karşı daha iyi korozyon direncine izin verir. *Polyesterler*, farklı uygulamalara ve proses gereksinimlerine uygun geniş bir özellik yelpazesine sahiptir. Orta düzeyde fiziksel özelliklere sahip olma eğilimindedirler, ancak düşük başlangıç maliyetleri ve düşük dönüşüm maliyetleri nedeniyle çok uygun maliyetli olabilirler. *Fenolik reçineler* normalde müşteri veya kod tarafından duman üretimi ve daha uzun süreli alev yayılımının gerekli olduğu uygulamalarda kullanılır. Fenolik reçineler, diğer yaygın termoset reçinelere göre işlem yapmak için daha zordur, bu nedenle işlevsel bir neden normalde seçimlerini yönlendirir (Schwartz, 1983).

Epoksi reçine sistemleri

Epoksi reçineler çok yönlülüğü, yüksek mekanik özellikleri ve yüksek korozyon direnci nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Epoksiler diğer malzemelere göre daha az küçülür

(hacimce %1,2-4), bu da yapıştırıcı olarak kullanıldığında mükemmel yapışma özelliklerini açıklamaya yardımcı olur. Çoğu epoksi, su ve ısıdan diğer polimer matrislerine göre daha az etkilenecek şekilde formüle edilebilir. Epoksi reçineler, kullanılan küratif ve hızlandırıcıların türüne bağlı olarak 5 ila 150 ° C arasındaki herhangi bir sıcaklıkta elde edilebilen basit kürleme işlemleri için de tercih edilir. Epoksilerin ana uygulama alanlarından biri uçak endüstrisidir.

Epoksi matrisler, 175 ° C'ye kadar servis sıcaklıklarında kullanılabilir. Reçinenin ve kompozitin tokluğunu arttırmak için, bazik termoset epoksi reçineleri, termoplastiklerin eklenmesi de dâhil olmak üzere katkı maddeleri ile sertleştirilir. Sertleştirilmiş epoksiler için servis sıcaklıkları kırılğan epoksilerden 125 ° C'ye kadar daha düşüktür. Çalışma sıcaklığı her zaman kırılğan epoksiler için yüksek (247 ° C'ye kadar) ve sertleştirilmiş epoksiler için daha düşük (76 ila 185 ° C arasında) olan cam geçiş (T_g) sıcaklığının altındadır (Schwartz, 1983).

Epoksiler, uçak petek yapıları için yapıştırıcılar ve uçak gövdesi ve füze uygulamaları için laminasyon reçineleri, filament yara yapıları ve takımlar için kullanılır. Plastik ve metal tekne ve otomobillerin yapımı ve onarımı için kalafat bileşikleri olarak çok faydalıdırlar. Bina ve otoyol yapımında kalafat ve dolgu macunu bileşikleri (yüksek kimyasal direnç gerektiğinde) ve beton kaplama bileşikleri olarak kullanılırlar (Lee & Neville, 1967).

Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozit, tabaka ve katmanların istenilen kalınlığa ulaşınca kadar önceden belirlenen oryantasyon (yönelme) açılarına göre üst üste konularak, yapıştırıcı ile bir araya getirilen kompozit yapılardır. Değişik özelliklere sahip çeşitli tabakaların, laminat tekniği ile birbirlerine yapıştırılması sonucu oluşan kompozit malzeme nitelikleri bakımından diğer (taneli veya liflerle donatılı) kompozitlerden farklılık göstermektedir (Ersoy, 2001).

Günümüzde birçok mühendislik uygulamalarında kullanılan bu yapıların oluşturulmasındaki temel amaç, kompozitin maruz kalacağı yüklere uyum sağlaması ve gerekli rijitlik ve dayanımın elde edilmesidir (Sahin, 2000).

Elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemeler

Elyaf takviyeli tabakalı kompozit (ETTK) malzemeler, tabakalı kompozit malzeme ile elyaflarla donatılı kompozit malzeme üretimin karma bir uygulamasıdır. ETTK'larda elyaf donatı, yapı içerisinde farklı yönlerde yer alabilir ve bu sayede kompozite farklı dayanım kazandırır. Tabakalar arasına yerleştirilecek olan elyaflar, reçineyle veya farklı maddeler ve yöntemlerle biraraya getirilmektedir (Ersoy, 2001). Bu yapılar; otomotiv sektöründe kaportalarda, deniz teknelerinde, su tankları ve uçak kanatları gibi birçok endüstri ve sanayi kollarında kullanılmaktadır.

Elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemeler ile üretilen yapılar, çalışma koşulları gereği burulma, eğilme, anlık darbe hasarı, korozyon, alev sıçraması, yorulma, titreşim gibi mekanik ve dinamik yüklere maruz kalabilmekteler. Dolayısıyla kompozit malzemelerin, üretilmeden önce veya üretildikten sonra mekanik (darbe, eğilme, ILSS, yoğunluk) ve dinamik (titreşim karakteristiği) özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

İnterlaminar kesme dayanımı (ILSS) özellikleri

İnterlaminar kayma mukavemeti (ILSS), laminasyon düzlemine paralel kayma mukavemetini ifade eder. Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (ASTM) test standartları D2344 lamine polimerik kompozitlerin ILSS'sini ölçmek için yaygın olarak kullanılır. Elyaf takviyeli polimer (ETP) kompozitlerin interlaminar kayma dayanımı (ILSS) tasarımı sınırlayan bir özelliktir. Genel olarak, bir kompozit malzeme üzerindeki yük, elyaf/matris arayüzey mukavemetinin kritik olduğu ve bir kompozitin tokluğunu ve mukavemetini büyük ölçüde doğrudan etkilediği arayüz üzerinden matristen liflere aktarılır Dirand et al., (1996). Bu nedenle, enine yüke maruz kalan çeşitli yapısal sektörlerde başarılı uygulama için ETP kompozitlerinin ILSS'indeki iyileştirme her zaman önemli bir amaç olmuştur (Singh et al., 2016). ILSS büyük ölçüde matris özelliklerine bağlı olduğundan, ILSS'nin geliştirilmesi için birçok araştırma yapılmıştır. Rahman et al., (2013) ilk başta, çok duvarlı karbon nanotüpleri (NH₂-MWCNT'ler) ağırlıkça % 0.1-0.4 SC-15 epoksi sistemine dâhil ettiler. Daha sonra, e-cam/epoksi kompozitlerine ilave edilen bu MWCNT'lerin interlaminar kayma mukavemetini (ILSS) nasıl etkilediğini incelediler. Çok düşük bir konsantrasyonda MWCNT'lerin dâhil edilmesi, GFRP kompozitlerinin mukavemetinde % 49'luk bir artış sağladığı sonucuna varmışlar. Singh et al., (2016) altı katmanlı düz dokuma CETP/epoksi laminatın içersine ilave ettikleri çeşitli ağırlıkta karbon elyaf dolgu maddeleri ile elde ettikleri kompozit yapının ILSS ve 3 noktalı eğilme performansını araştırdılar. Ağırlıkça değişen doğranmış karbon elyaf katkıları, ağırlıkça %0'dan %1'e yükseldiğinde eğilme mukavemetini artırırken %1 ile %5 arasında ise eğilme mukavemetini azalttığını belirttiler. Ancak ILSS sonuçlarında kıyılmış karbon ilave oranı ağırlıkça%0'dan %5'e yükseltildiğinde ILSS mukavemetinin sürekli arttığını gözlemlediler. Duan et al., (2012) UV kurlama teknolojisi kullanarak, akrilat/cam elyaf kompozitler ürettirler. Amaçları, kompozit malzemeler için kalın laminat kurlama derinliği sorununa bir çözüm sağlamak ve üretim maliyetlerini düşürmektir. UV'ye maruz kalma dozu dâhil olmak üzere işleme parametrelerinin ILSS üzerindeki etkisini değerlendirmek için ara katman kesme dayanımı (ILSS) testleri yaptılar ve sonuç olarak ILSS değerlerinde olumlu artışlar elde ettiler. Caminero et al., (2018) FDM (Fused Deposition Modelling) tekniği ile ürettikleri 3D baskılı sürekli elyaf takviyeli (karbon, cam ve kevlar) kompozitlerin interlaminar

bağlanma performansı, interlaminer kayma mukavemetini (ILSS) elde etmek için kısa kırış kesme testi ile değerlendirmişler. Sonuçta, daha yüksek gözenekliliğe bağlı olarak tabaka kalınlığı arttıkça ILSS'nin azaldığını gözlemlediler. Karbon fiber takviyeli kompozitler, daha yüksek sertlikte olduğu için en iyi interlaminer kesme performansını sergilerken kevlar elyaf takviyeli kompozitler, kapsamlı delaminasyon nedeniyle en düşük interlaminer kesme performansına sahip olduğunu dile getirdiler. Tserpes et al., (2019) higrotermal yaşlanmanın karbon fiber takviyeli epoksi reçine bazlı biyo-kompozitin interlaminer kayma mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmak için, ILSS, yaşlanma testleri ve üç noktalı eğilme testleri deneysel olarak araştırdılar. KETK'lerle aynı su miktarını emilebildiği ve su emiliminin KETK'lerdeki azalmaya kıyasla ILSS'de küçük bir azalmaya neden olduğu sonucuna vardılar. Ayrıca biyo-kompozitin iyi bir yaşlanma davranışına sahip olduğunu gösterdiler. Khalid et al., (2021) değişen (karbon, cam, aramid) elyaf takviyelerine sahip elyaf metal laminatları (EML) imal etmek için alüminyum 7075-T6 levhalar kullanarak; karbon elyaf takviyeli alüminyum laminatlar (CARALL), cam elyaf takviyeli alüminyum laminatlar (GLARE) ve aramid elyaf takviyeli alüminyum laminatlar (ARALL) ürettirler. Çalışmalarının sonucunda, CARALL ILSS'sinin, tüm yer değiştirme oranlarında GLARE'den ve ARALL'dan (karbonun alüminyum metal ile güçlü yapışması nedeniyle) daha yüksek olduğunu belirttiler. Khan & Kim, (2012) laboratuvar ortamında çeşitli malzemeler kullanarak ürettikleri CNF Bucky kâğıtlarını karbon elyaf takviyeli kompozit plakalara ara katman olarak yerleştirdiler. Yaptıkları ILSS testi sonrası, CNF-bucky kâğıt ara yaprakları içeren kompozitlerin ILSS'si yaklaşık %31 artarken, mod-II interlaminer kırılma tokluğu, ara yaprakları olmayan kompozitlere kıyasla yaklaşık %104 arttığını beyan ettiler.

Darbe (Impact) özellikleri

Tabakalı kompozitlerde darbe direnci, çeşitli askeri araçların gövdesine bir mermi çarpması ya da kompozit malzemeden üretilen otomobil tamponuna yoldan gelen bir taş değmesi gibi durumlarda önemlidir. Darbe dayanım mekanizması, tabaka diziliş sırası ve tabakalar arası mukavemet gibi parametrelere ve çarpan nesnenin hızına, kütlesine ve boyutuna bağlıdır. Dolayısıyla kompozit malzemeler darbeye duyarlıdır ve darbe, kompozit malzemenin yüzeyinde küçük bir girinti bırakırken delaminasyon, lif/iplik kırılması gibi büyük iç hasarlar üretir ve bu durum kompozit yapılar için ciddi bir tehdit oluşturur. Günümüze kadar elyaf takviyeli tabakalı kompozit yapıların zayıf yanlarını iyileştirmek için sırasıyla; karbon fiber kırıkları, karbon nanomalzemeler, paslanmaz çelik fiberler termoplastik filimler ve termoplastik keçeler kullanılmıştır (Cheng et al., 2019; Ou et al., 2020; Quan et al., 2020; Quan et al., 2019; Zhou et al., 2017). Bu ara katman elemanları arasında termoplastik keçelerin sert,

sünek, gözenekli ve hafif olması onları karbon elyaf (KE) ve cam elyafları (CE) sertleştirmek için uygun aday haline getirmektedir (Quan et al., 2022). Literatürde az sayıda araştırmalar, termoplastik keçe katmanlı karbon elyaf epoksi (KE/EP) ve cam elyaf epoksi (CE/EP) kompozitlerinin mekanik ve dinamik özelliklerini incelemiştir. Quan et al., (2020) Termoplastik PPS ve PA keçeleri KE/EP yerleştirerek tabakalar arası kırılma tokluğunu incelemiştir. Tek yönlü (UD) prepreglerin ve kıvrımsız karbon elyaf kumaşların (NCF) kırılma tokluğunu önemli derecede (%273) artırdığını bulmuşlar. Beylergil et al., (2018) KE/EP kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için iki farklı alan ağırlığına sahip poliamid-6,6 (PA66) termoplastik keçe kullanmışlar. Deneysel olarak, kırılma tokluğunda (Mod-1) %84, kısa kırıç kesme dayanımında (ILSS) %25 ve Charpy darbe mukavemetinde %15 oranında iyileşme olduğunu bulmuşlar. Ancak daha düşük KE hacim oranı ve artan kalınlık nedeniyle KE/EP kompozitlerinin düzlem içi mekanik özelliklerini azalttığını dile getirmişler. Belen Del Saz ve ark. Del Saz- Orozco et al., (2017) poliamid (PA) ve polietilen tereftalat (PET) termoplastik keçelerin cam elyaf/vinil ester (CE/VE) kompozit tabakalar arasına yerleştirerek kırılma dayanıklılığı üzerine inceleme yapmışlar. PA keçesinin ilavesiyle kritik gerilme enerjisi salım (G_{IC}) oranında artış gözlemlerken PET keçe eklenmesi ile G_{IC} oranındaki artışın önemsiz bir şekilde değiştiğini ifade etmişler. Cicala et al., (2014) çok işlevli elyaf takviyeli kompozitler elde etmek için yeni bir teknik geliştirmişler. Bu teknik, çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT), nano-silika, nano Zink oksit ve karbon siyahı gibi farklı nanoteller içeren birkaç keçe kullanılarak reçinenin sertleştirilmesi üzerine çözünen termoplastik örtüler kullanımına dayanmaktadır.

Eğilme özellikleri

Enine basınç yüklemesinde, basınç yükü lif yönüne normal olarak uygulanır ve gözlemlenen en yaygın arıza modu, lif yönüne paralel, ancak yükleme yönüne eğimli düzlemler boyunca matris kesme hasarıdır. Hasar, elyaf matrisi ile başlar. Enine basınç modülü ve mukavemeti, uzunlamasına basınç modülü ve mukavemetinden önemli ölçüde düşüktür. Enine sıkıştırma modülü, matris modülünden daha yüksektir ve enine çekme modülüne yakındır. Enine basınç dayanımının lif hacim fraksiyonundan neredeyse bağımsız olduğu bulunmuştur (Collings, 1974).

Eğilme durumunda, kuvvetin etksi tarafsız eksen boyunca sıfır olurken kuvvetin etki ettiği yüzeyde gerilmeler bası şeklinde, diğer yüzeyde ise çeki şeklinde meydana gelir (Aydin, 2019). Çatlak saptırma arayüzlerine sahip kırılğan çok katmanlı malzemeler, eğilme ve gerilme yükleri altında farklı özellikler sergiler. Özellikle, eğilme yükü altında, katmanlar gerilmeden sıkıştırma yüzüne doğru sırayla çatlar ve çatlamının başlangıcını takiben gerilme-gerinim

tepkisinde bir dizi kademeli düşüş sağlar. Bu durumda, genel numune boyutlarına göre hesaplanan nominal hasar gerilimi, tek eksenli gerilimde ölçülen hasar geriliminden önemli ölçüde daha yüksektir (Folsom et al., 1994). ETTK'larda istenen mekanik ve dinamik performans eldesi, elyaf yönlendirme açıları, diziliş sırası, elyaf türü ve tabaka kalınlığı gibi birçok parametreye bağlıdır. Çok katmanlı malzemelerin hasar mekaniğinin daha iyi anlaşılmasını geliştirmek için birçok araştırma yapılmıştır. Yang et al., (2003) geliştirdikleri düz dokuma silisyum karbür (SiC) olan Tyranno-SA elyafı birkaç SiC/SiC kompozitinde takviye olarak kullandılar. Mekanik özelliklerini ve kırılma davranışlarını tespit etmek için üç noktalı eğilme testi kullandılar. Tyranno-SA lifi, saf SiC yüzey kimyasına sahip pürüzlü lif yüzeyine sahip olduğundan güçlü lif/matris bağı ve lif kayma direnci göstermiştir. Ara yüzün mekanik özelliklerini değiştirmek için kompozitlere çeşitli pirolitik karbon (PyC) ve SiC/PyC ara katman kaplamaları uyguladılar. Deneysel çalışmaları sonucunda, kompozitlerin mukavemetinin yakın bir PyC tabakası bağımlılığını ortaya çıkardığını ve eğilme dayanımı, PyC tabaka kalınlığının 100 nm'ye yükselmesiyle artarken 200 nm'ye kadar benzer seviyede tutulduğuna dikkat çektiler. Nisini et al., (2017) epoksi reçine esaslı karbon, bazalt ve keten olmak üzere üç tip elyafı güçlendirilmiş kompozit laminatları iki farklı istifleme sırası ile üretmişler. Hasar morfolojisi ve darbe histerezis döngülerini incelemek için çekme, eğilme ve ILSS testlerine, ardından 12.8, 25.6 ve 38.4 J olmak üzere üç farklı enerjiyle düşen ağırlık etkisine (LVI) tabi tuttular. Bazaltın keten tabakaları eğilme ve interlaminar mukavemet için faydalı olduğunu, bazalt tabakaları ile interkalasyonun, keten lifi laminatların eğilme dayanımını azalttığı, sertliklerini arttırdığı, bu da eğilme ve laminarlar arası mukavemet açısından faydalı olduğu bulumuşlar.

Elyaf takviyeli epoksi reçine kompozitleri, düşük ağırlıktaki yüksek mukavemet ve sertlikleri ve iyi korozyon direnci ve yorulma özellikleri nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, epoksi matrisler kırılğan malzemelerdir ve bu da kompozitin beklenmedik şekilde hasar almasına neden olabilir (Beylergil et al., 2017). Mekanik özelliklerini iyileştirmek için epoksi matrisine termoplastik keçeler eklenebilir. Ancak mevcut literatüre bakıldığında termoplastik keçe katmanlı kompozitlerin mekanik ve/veya dinamik özellikleri hakkında yeteri kadar bilgi yer almadığı için bu konu ile ilgili yapılacak ayrıntılı çalışmalara ihtiyaç vardır.

Elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemeler dinamik analizler

Dinamik yüklere maruz kalan tabakalı kompozit yapılar, malzemenin doğal frekanslarda titreşmesine neden olabilecek aşırı titreşimler yaşayabilir. Oluşan bu titreşimler yapıyı frekans rezonansına sürükleyerek kalıcı hasarlara, hatta yapının çökmesine neden olabilir. Ayrıca, sistemde meydana gelen daha fazla titreşim, erken aşınma ve yorulma, yüksek

gürültü seviyeleri ve güvenli olmayan çalışma koşulları oluşturabilir. Dolayısıyla bu problemlerin önlenmesi için, bu malzemelerin titreşim karakteristiklerinin belirlenmesine ihtiyaç vardır (Haldar et al., 2011). Genel olarak titreşim sönümleme, aktif ve pasif titreşim kontrolü olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Aktif sönümleme kontrolü, sensörler ve aktüatörler, güç kaynağı ve titreşimli koşullar altında bir kompensatör aracılığı ile yapılır. Pasif sönümleme kontrolü, sönümleme malzemeleri ve/veya izolasyon malzemeleri ile yapılır. Genellikle yapıların güvenilirliğinin iyileştirilmesinde pasif kontrol kullanılır (Finegan & Gibson, 1999). Polimerler (özellikle termoplastikler) viskoelastik davranışlarından dolayı iyi sönümleme sağlayabilirler (Fu & Chung, 2001). Geçmişte titreşim sönümleme için birçok polimer malzeme kullanılmıştır. Bunlar arasında, politetrafloroetilen (PTFE), poliüretan, bir polipropilen/bütül kauçuk karışım, bir polivinilklorür/klorlu polietilen/epoksitlenmiş doğal kauçuk karışımı, bir poliimid/poliimid karışımı ve naylon-6/polipropilen karışımı yer alır (Chung, 2001).

Titreşim özellikleri

Elyaf takviyeli polimer (ETP'ler) kompozitler polimer malzemedan ve ara yüzeylerden oluştuğu için metalik ve seramik malzemelere kıyasla daha iyi sönümleme özellikleri sunmaları beklenen bir sonuçtur. Yapısal kompozitler camsı polimerden yapıldığından, güçlendirilmiş elyaf ile destek matrisi arasındaki arayüz ana sönümleme kaynağıdır. Arayüzey yapışması çok yüksekse, arayüz tüm yükü aktarma rolünü oynar ve sönümlemeye fazla katkıda bulunmaz (Chandra et al., 1999). Bununla birlikte, pratik olarak tam yük aktarımı gerçekleşmez ve kompozit, yapısal titreşim sönümlemesine katkıda bulunur. Daha düşük interlaminer kayma mukavemetine sahip bir kompozitin daha iyi spesifik sönümleme kapasitesi sergilediği gösterilmiştir (Gassan & Bledzki, 2000). Bir FRP kompozitinin sönümleme özellikleri, elyafın doğasına, elyaf hacim fraksiyonuna ve oryantasyonuna bağlıdır. Cam ve karbon gibi sert liflerin birleşmesinden dolayı, takviye edilmemiş polimere kıyasla sönümleme derecesinin azaldığı görülmektedir. Cam elyaf takviyeli plastik (CETP) kompozit, karbon fiber takviyeli plastik (KETP) kompozitlerden daha iyi sönümleme sergiler. Yapısal kompozitin sönümlemesi, matrisin yumuşamasına bağlı olarak artan sıcaklıkla artar ve bu da matrisin sönümlemesini artırır. Subramanian et al., (2011) hem uzun cam elyaf takviyeli polipropilen (LFPP) hem de kısa cam elyaf takviyeli polipropilen (SFPP) ve güçlendirilmemiş polipropilen (UFPP) değerlendirdiler. UFPP> SFPP> LFPP sıralaması şeklinde sönümleme özelliğinde bir eğilim gözlemlendiler. Beklendiği gibi, takviye lifinin dâhil edilmesiyle depolama modülü artar, ancak sönümleme azaldığını beyan ettiler. Fakat Haldar et al., (2010) bir SFPP> LFPP> UFPP sıralanışı şeklinde eğilimi bildirdi ve aynısını elyaf matris etkileşim bölgesindeki kayma

gerilmesi konsantrasyonuna bağladı. UFPP, SFPP ve LFPP'nin histerezis alanlarının sırasıyla 110.8, 30.5 ve 25.6 N.mm olduğu ifade ettiler. Sönümleme enerjisi kısmen mikro yapıda (çatlaklar, kesme bandı, boşluk ve mikro çatlaklar) depolanır ve kısmen ısı olarak açığa çıkar. Kısa elyaf takviyeli kompozitin uzun elyaf takviyeli kompozite kıyasla daha yüksek sönümlenmesi, daha fazla fiber uç / fiber matris arayüz alanının varlığı dikkate alınarak açıklanabilir. Sabit hacimli bir takviye fraksiyonu için, lif uçlarının sayısı, uzun liflere kıyasla kısa lif durumunda daha fazladır. Ayrıca Rezaei et al., (2009) karbon fiber takviyeli bir kompozit için artan lif uzunluğu ile kayıp faktöründe bir azalma olduğunu bildirdiler. Lif uzunluğu azaldıkça lif uçlarının sayısı artma eğilimindedir. Bu nedenle, doğranmış elyaf takviyeli polimer kompozitler, titreşim sönümleme uygulamaları için uzun elyaf takviyeli kompozitlerden daha etkili olduğunu dile getirmişler.

Titreşim ve sönümlemenin temelleri üzerine yapılan çalışmalar, uygun sönümleme malzemesi geliştirmek ve ayrıca sistemlerin depolama, nakliye ve/veya çalışma sırasında titreşime dayanmasını sağlamak için kullanılır. Son yıllarda titreşim sönümleme iyileştirilmesi için çeşitli yöntemlerle organik ya da inorganik malzemeler takviyesi ile birçok araştırma yapılmıştır. (Di Landro & Lorenzi, 2009), cam elyaf/polipropilen kompozitlerle polipropilen ve biyobozunur polilaktik asit matrislerindeki kenef/kenevir/keten lifleri ile üretilmiş kompozitlerin kıyaslamışlar. Süreksiz doğal lifler (keten/kenevir/kenaf) aracılığıyla termoplastik matrislerin takviyesi, sertliği, iyi titreşim-akustik sönümleme kapasitesinin arttığını beyan etmişler. Etaati et al., (2014) Kısa kenevir elyaf kompozitlerin statik, dinamik, mekanik ve viskoelastik özellikleri üzerine deneysel bir çalışma yapmışlar ve melaik anhidrit polipropilen ilavesinin melaik anhidrit poli etilen oktan bileşimi ilavesine kıyasla fazlar arası daha düşük sönümleme oranı elde etmişler. Duc et al., (2014) Tek yönlü ve dişi dokuma 2/2 keten elyaf takviyesi ile güçlendirilmiş karbon elyaf ve cam elyaf termoset (epoksi) ve termoplastik (polipropilen (PP), poliaktik asit (PLA) kompozitlerin sönümleme özelliklerini karşılaştırmışlar. Sertlik ve sönümleme arasındaki en iyi uyumu keten elyaf ile güçlendirilmiş PLA ile ele etmişler. Chen et al., (2019) Kısa rami elyaf takviyeli PP kompozitlerin serbest titreşimleri (birinci ve ikinci mod) üzerine deneysel çalışma yapmışlar. Lif içeriğindeki artışın sönümleme özelliklerini de artırdığını bildirmişler. Aydın et al., (2022) yeni teknolojik araçlara uygun hibrit/hibrit olmayan elyaf takviyeli kompozitlerin dinamik analizlerini yaparak karşılaştırmışlardır. Hibrit olmayan üretimlerinde Karbon, Aramid ve Cam kompozit kullanmışlar. Hibrit olarak Aramid-Karbon, Karbon-Cam ve Cam-Aramid kompozit kullanmışlar. Sonuç olarak hibrit olan kompozitlerin hibrit olmayan kompozitlere kıyasla daha iyi doğal titreşim ve sönüm, oranları elde etmişler.

Tez çalışmasının özgünlüğü

Elyaf takviyeli tabakalı kompozit yapılarda laminasyonu kontrol eden laminat arası tokluğu artırmanın etkili yöntemi, termoplastik keçe kullanmaktır. Termoplastik keçe katmanları, sertleştirme maddeleri olarak kullanılan geleneksel katkı maddelerine kıyasla bazı avantajlar sunar. Termoplastik keçelerin dâhil edilmesi, reçine transfer kalıplama (RTM) ve vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) gibi reçine infüzyon süreçlerinde elzem bir faktör olan sistemin viskozitesini değiştirmez. Dolayısıyla gerçekleştirilen projenin özgün değer niteliği taşıdığı düşünülmektedir. Çünkü;

- Bu çalışmada farklı kimyasal yapılara ve alansal ağırlıklara sahip beş farklı termoplastik keçe ile farklı elyaf türleri kullanılacak olup bu keçeler ve elyaflar ile literatürde daha önce karşılaştırmalı mekanik ve dinamik analizlere çok az rastlanılmıştır. Bu durum tez çalışmasını özgün kılmıştır.
- Literatür özetinde de görüldüğü üzere, termoplastik keçe katmanlı cam veya karbon kumaş/epoksi kompozitlerin mekanik analizleri ve dinamik analizleri hakkında kapsamlı bir araştırma yeteri kadar yapılmamıştır. Dolayısıyla bu tez çalışması sayesinde bu yapıların dinamik ve mekanik analizleri deneysel çalışmalarla incelenmesi sayesinde ayrıca özgün değer niteliği kazanmıştır.
- Üretimi ve analizi yapılacak olan termoplastik keçe katmanlı kompozit yapılar piyasada kullanılan geleneksel kompozitlerin yerini güçlü bir şekilde alacağı düşünülmektedir. Bu bağlamda, yeni nesil termoplastik keçe katmanlı cam-karbon kumaş/epoksi kompozitlerinin yapılacak mekanik ve dinamik analizleri ile bahsi geçen endüstri alanlarında ciddi bir farkındalık oluşturacağı münasebetiyle özgün değer niteliğindedir.

MATERYAL ve METOT

Materyal

Bu çalışmada kompozit numuneler karbon ve cam elyaf, epoksi reçine ve beş farklı dokunmamış termoplastik keçe kullanılarak imal edilmiştir. Alan ağırlığı 500 g/m² olan düz dokuma karbon ve cam kumaşlar Carbomid anonim Şirketi'nden (İstanbul/Türkiye), Duratek DTE 1120 Epoksi ve DTS 1151 Sertleştiriciden oluşan reçine sistemi ise Duratek Şirketi'nden tedarik edildi. Kullanılan elyaf ve reçine sistemi Tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1. Karbon, Cam ve Epoksi Reçine Malzemelerinin Bazı Özellikleri (Sahu et al., 2014)

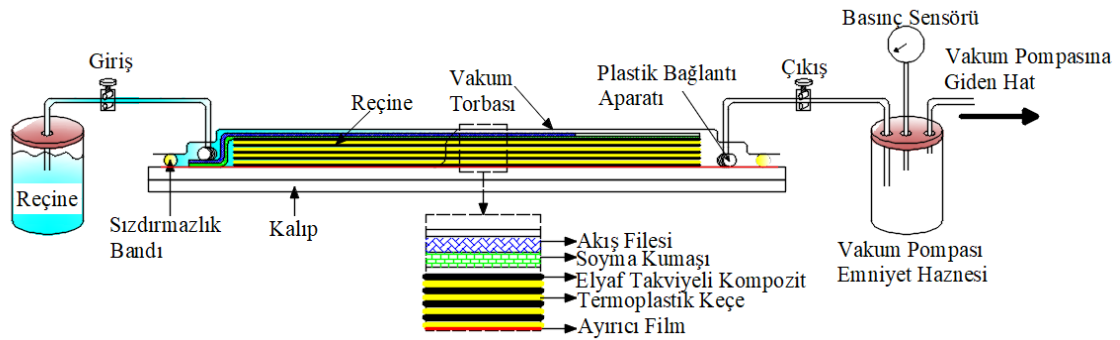
Malzeme özellikleri	Karbon	Cam	Epoksi Reçine (Duratek DTE 1120)
Kuvvet / Ağırlık Oranı (Strength-to Weight)	1013	564	28
Tabaka yoğunluğu (gram/ml) (Density of Laminate) (grams/cc)	1.58	2.66	1.2-1.3
Elastisite Modülü (Young’s Modulus) (GPa)	125-181	30-40	2.5-4
Elyaf Mukavemeti (Tensile Strength) (kN.m/kg)	4127	3450	-
Tabakalı Kompozit Mukavemeti (Laminate Strength) (kN.m/kg)	1600	1500	12-40

Kompozit numunelerde sırasıyla 10 g/m², 20 g/m², 8 g/m², 10 g/m² ve 10 g/m² alan ağırlıklarına sahip PEI, PPS, PI, PA ve PEEK termoplastik keçeler katlar arası laminat olarak kullanılmış ve tüm termoplastik keçeler Technical Fibre Products Ltd. (Cumbria / İngiltere) firmasından tedarik edilmiştir. Tez kapsamında kullanılan termoplastik keçelere ait bazı özellikler Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Termoplastik Keçe Katmanların Özellikleri (Chawla, 2012)

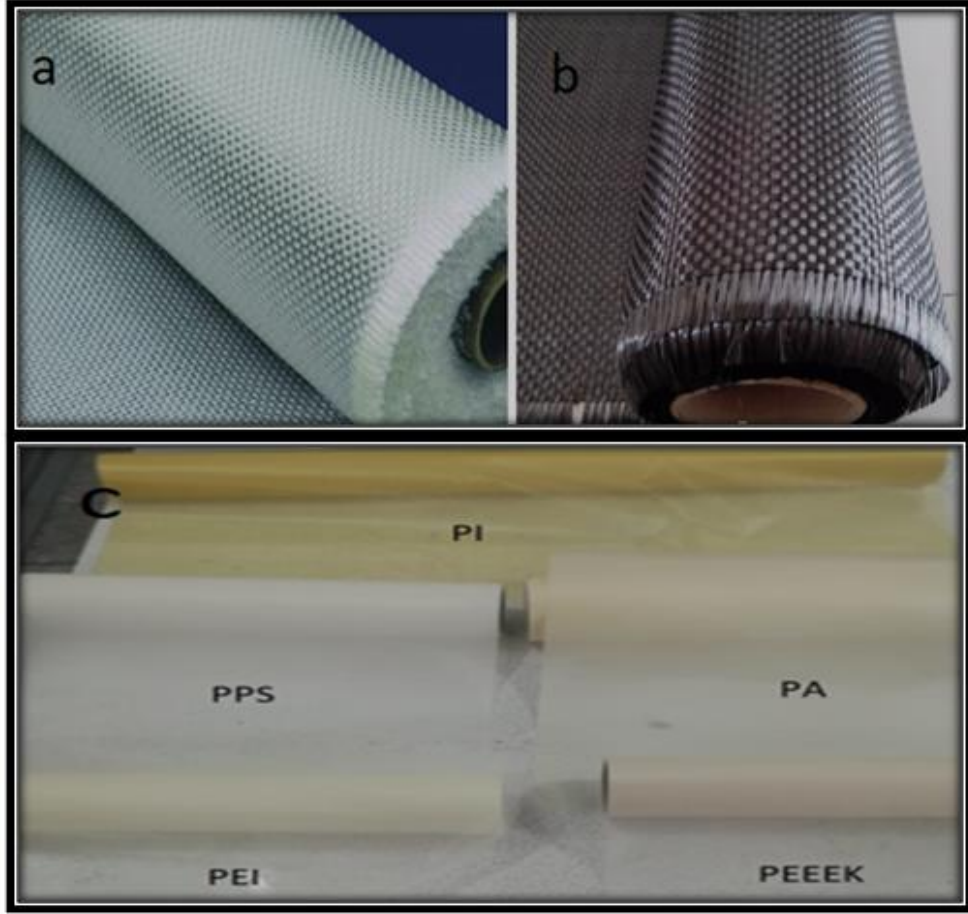
Malzeme özellikleri	Poliamid (PA)	Polieter Eter Keton (PEEK)	Polfenilen Sülfür (PPS)	Polietermit (PEI)	Poliimid (PI)
Çekme dayanımı (MPa)	120	92	70	105	60-85.5
Eğilme modülü (GPa)	35	40	40	35	33.8
Yoğunluk (g / cm³)	1.46	1.30	1.32	1.27	1.2-1.4
Sürekli servis sıcaklığı (°C)	260-425	310	260	170	100
Termal genleşme katsayısı (10-15 °C)	9	4.5-5.5	9.9	5.6	6-7
Su emme (24 saat)	0.3	0.1	0.2	0.25	0.07-0.1

Kompozit numuneler Vakum Destekli Reçine Transferi (VARTM-Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding) yöntemi kullanılarak imal edilmiş (Şekil 1) ve imalat için gerekli tüm ekipmanlar Dost Kimya Firması (İstanbul/Türkiye) tarafından tedarik edilmiştir.

**Şekil 2.** Kompozit üretim süreci için şematik görselleştirme

Yöntem

Bu çalışmada kullanılan karbon /cam kumaşlar ve termoplastik örtüler Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Ayrıca termoplastik keçe katmanlı karbon elyaf/epoksi ve cam elyaf/epoksi takviyeli kompozit plakaların üretimi için yapılan planlama Tablo 3.3'te verilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen termoplastik keçe katmanlı karbon kumaş/epoksi kompozitlerin; eğilme dayanımı, interlaminar kayma mukavemeti (ILLS), darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerine ilaveten titreşim karakteristiğinin belirlenmesi ile de dinamik özellikleri incelenmiştir.



Şekil 3. a) Cam kumaşlar, b) karbon kumaşlar ve c) termoplastik keçelerin görselleştirilmesi

Tablo 3. Termoplastik Keçe Katmanlı Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üretim Planı

REFERANS ÜRETİM				
KUMAŞ TÜRÜ	YÖNLENME AÇISI	TABAKA SAYISI	Diziliş	PLAKA ADI
K	0/90	8	K/K/K/K/K/K/K/K	K8
C	0/90	8	C/C/C/C/C/C/C/C	C8
TERMOPLASTİK KEÇELİ ÜRETİM				
KUMAŞ /KEÇE TÜRÜ	YÖNLENME AÇISI	TABAKA SAYISI	Diziliş	PLAKA ADI
K/PA	0/90	8	K/PA/K/PA/K/PA/K/PA/K/PA/K/PA/K	K8/7PA
			K/PA/K/K/K/K/K/K/PA/K	K8/2-1PA
			K/K/K/K/PA/PA/K/K/K/K	K8/2-2PA
K/PEEK	0/90	8	K/PEEK/K/PEEK/K/PEEK/K/PEEK/K/PEEK/K/PEEK/K	K8/7PEEK
			K/PEEK/K/K/K/K/K/K/PEEK/K	K8/2-1PEEK
			K/K/K/K/PEEK/PEEK/K/K/K/K	K8/2-2PEEK
K/PPS	0/90	8	K/PPS/K/PPS/K/PPS/K/PPS/K/PPS/K/PPS/K	K8/7PPS
			K/PPS/K/K/K/K/K/K/PPS/K	K8/2-1PPS
			K/K/K/K/PPS/PPS/K/K/K/K	K8/2-2PPS
K/PEI	0/90	8	K/PEI/K/PEI/K/PEI/K/PEI/K/PEI/K/PEI/K	K8/7PEI
			K/PEI/K/K/K/K/K/K/PEI/K	K8/2-1PEI
			K/K/K/K/PEI/PEI/K/K/K/K	K8/2-2PEI
K/PI	0/90	8	K/PI/K/PI/K/PI/K/PI/K/PI/K/PI/K	K8/7PI
			K/PI/K/K/K/K/K/K/PI/K	K8/2-1PI
			K/K/K/K/PI/PI/K/K/K/K	K8/2-2PI
C/PA	0/90	8	C/PA/C/PA/C/PA/C/PA/C/PA/C/PA/C	C8/7PA
			C/PA/C/C/C/C/C/C/PA/C	C8/2-1PA
			C/C/C/C/PA/PA/C/C/C/C	C8/2-2PA
C/PEEK	0/90	8	C/PEEK/C/PEEK/C/PEEK/C/PEEK/C/PEEK/C/PEEK/C	C8/7PEEK
			C/PEEK/C/C/C/C/C/C/PEEK/C	C8/2-1PEEK
			C/C/C/C/PEEK/PEEK/C/C/C/C	C8/2-2PEEK
C/PPS	0/90	8	C/PPS/C/PPS/C/PPS/C/PPS/C/PPS/C/PPS/C	C8/7PPS
			C/PPS/C/C/C/C/C/C/PPS/C	C8/2-1PPS
			C/C/C/C/PPS/PPS/C/C/C/C	C8/2-2PPS
C/PEI	0/90	8	C/PEI/C/PEI/C/PEI/C/PEI/C/PEI/C/PEI/C	C8/7PEI
			C/PEI/C/C/C/C/C/C/PEI/C	C8/2-1PEI
			C/C/C/C/PEI/PEI/C/C/C/C	C8/2-2PEI
C/PI	0/90	8	C/PI/C/PI/C/PI/C/PI/C/PI/C/PI/C	C8/7PI
			C/PI/C/C/C/C/C/C/PI/C	C8/2-1PI
			C/C/C/C/PI/PI/C/C/C/C	C8/2-2PI

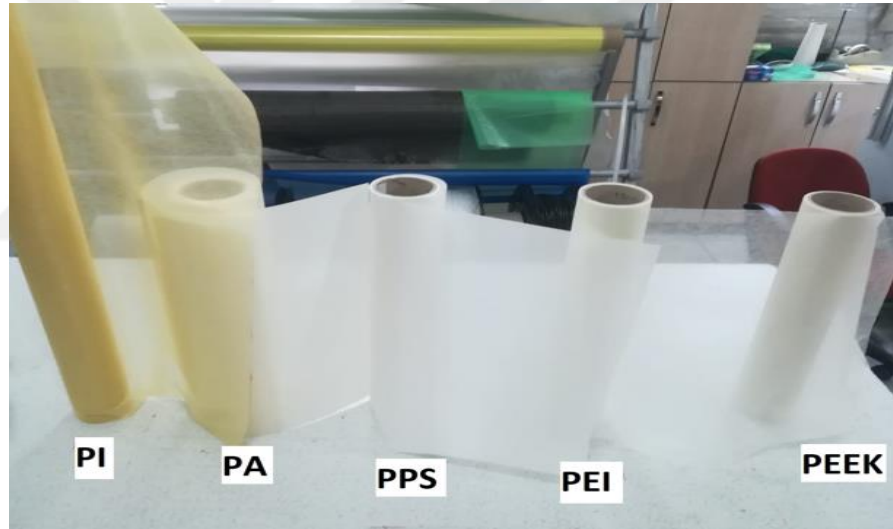
Üretimin yapılması

Termoplastik keçe katmanlı elyaf takviyeli plakaların üretimleri, Vakum Destekli Reçine Transferiyle Kalıplama (VARTM-Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding) cihazı ile yapılmıştır. Bu cihaz; Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mekanik Laboratuvarında bulunmaktadır.

Üretim esnasında kullanılan termoplastik keçeler, karbon elyaf kumaşlar, cam elyaf kumaşlar, VARTM cihazı, sarf malzemeler ve üretimin yapıldığı laboratuvar ile ilgili görsel Şekil 4 – 7’de gösterilmiştir.



Şekil 4. Üretimde kullanılan karbon ve cam elyaf kumaşlar



Şekil 5. Üretimde kullanılan termoplastik keçeler

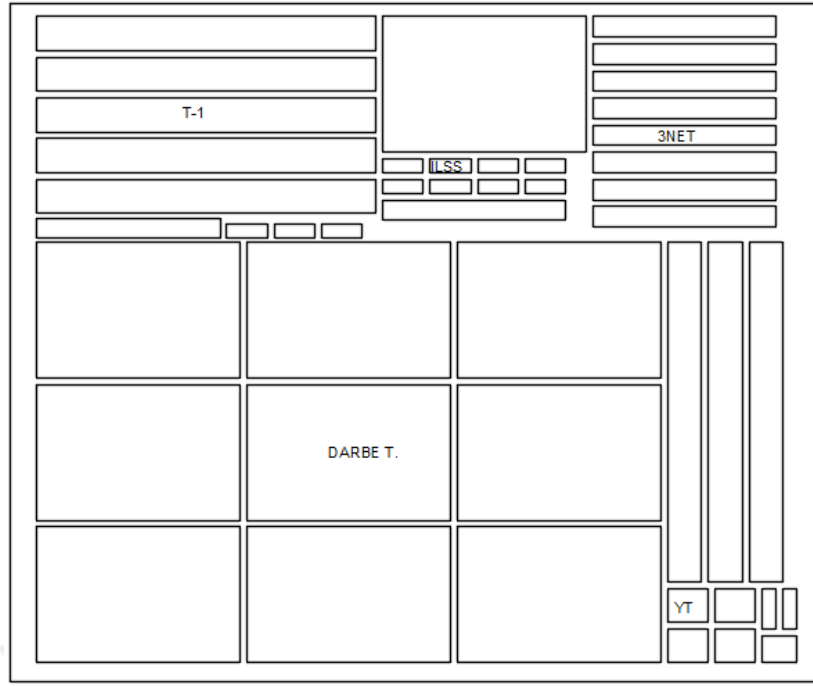


Şekil 6. Kumaş ve keçelerin kesimi yapılan masa



Şekil 7. Üretimlerin yapıldığı VARTM cihazı

Üretim safhasına geçilmeden önce, deneysel çalışma için yapılan testler ile ilgili ASTM standartlarına göre numunelerin asgari ebatlarına göre üretim şablonu hazırlanmıştır. Bu tasarıma göre, 500mm x 600mm ebatlarında plakalar üretilmiştir. Plakalardan kesilerek elde edilecek numunelerin konuşlandırılan yerleri Şekil 8’te verilen kesim şablonunda gösterilmiştir.



Şekil 8. Test numunesi elde etmek amacıyla kullanılan kesim şablonu

Üretim, reçine transferi öncesi, reçine transferi sonrası ve reçine transferi süreci şeklinde üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

1. Aşama- Reçine Transferi Öncesi

- Kullanılacak karbon elyaf, cam elyaf kumaşlar ve termoplastik keçeler, kesim masası üzerinde 500mm x 600mm ebatlarında sekizer tabaka olacak şekilde kesilmiştir.
- Kesilen kumaş ve keçelerin hassas terazi yardımıyla ağırlıkları ölçülmüştür.
- VARTM cihazı üzerinde herhangi bir yabancı madde olmaması için temizlenmiş ve akabinde 600mm x 700mm (üretilcek plakadan yaklaşık %20 daha büyük) ebatlarında ayırıcı filim serilmiştir. Ayrıca vakum esnasında plakanın dalgalanmasını önlemek için bir köşesi makasla kesilmiştir.
- Ayırıcı filmin cihaz üzerinde hem kaymasını önlemek için hem de vakum torbası ile yapışmasını sağlamak için sızdırmazlık bandı ile yapıştırılmıştır.
- Üretim şablonuna göre hangi üretim gerçekleştirilecek ise o üretim ile alakalı elyaf ve keçeler belirlenen istifleme sırasına göre ayırıcı filmin üzerine yerleştirildi.
- Kurlenme sonrası reçine yüzeyi ile kompozit plakanın rahat ayrılması için kumaş/elyaf yüzeyini örtecek (hesaplanan kumaş ebatlarından yaklaşık %10 daha fazla) şekilde soyma kumaşı serilmiştir.

- Reçine transferini kumaş/keçe üzerine aktarımının sağlanması için plakanın kısa kenarı ebatlarında giriş ve çıkışlara T konnektörlü plastik spiral bağlantı aparatları yerleştirilmiştir.
- Reçine infüzyonunun eşit bir şekilde ve rahat infüze olmasını sağlamak için soyma kumaşı üzerine akış filesi (plakanın yaklaşık % 60'ını kapatacak kadar) konumlandırılmıştır.
- Vakum destekli reçine transferi işlemi için plakanın üzeri vakum torbası (plaka boyutlarından yaklaşık %30 daha büyük ebatlarda) ile kapatılmıştır.
- Vakum torbası yerleştirildikten sonra T bağlantı aparatlarının üzerine gelen kısımlara küçük delikler açılarak vakum hortumları takılmıştır.
- Vakum hortumu pompa tarafından 120±20cm ebatlarında olacak şekilde ayarlanmıştır.
- Vakum hortumu reçine transfer tarafından 250±20cm ebatlarında olacak şekilde ayarlanmıştır.
- Her iki tarafa (pompa ve reçine transfer) vanalar yardımıyla vakum hortumu kapatılmış akabinde cihaz çalıştırılmış ve gerekli basınca (minimum 650mmHg) çıkması beklenilmiştir. Kontroller yapıldıktan sonra pompa tarafı vanası açılarak plaka reçine infüzyonu öncesi vakumlanmış (varsa hava kaçakları giderilir) ve ardından yaklaşık 30 dakika vakumlu ortamda bekletilerek reçine transferine hazırlanmıştır.

2. Aşama- Reçine Transferi Sonrası

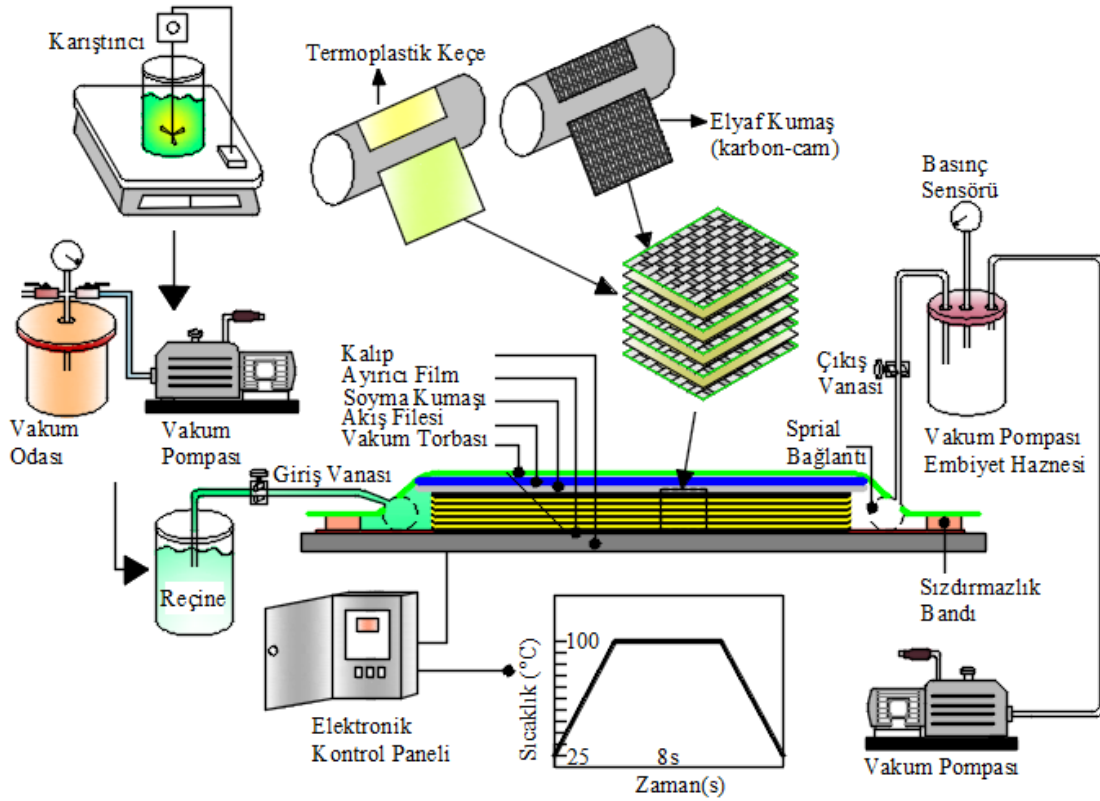
- Üretim için gerekli olan reçine sistemi, ağırlıkları ölçülen kumaş ve keçelere yetecek kadar Sertleştirici/Epoksi, 27/100 ağırlık oranına göre hesaplanarak karışım cam kavanozlara konuldu.
- Cam kavanozdaki karışım ilk olarak el ile karıştırılmış sonrasında epoksi/sertleştirici bileşimi karıştırıcı bir makine yardımıyla 500devir/dakika hızında 5 dakika boyunca karıştırılarak uygun karışım elde edildi.
- Hazırlanan reçine sisteminin içinde barındırdığı gazların giderilmesi için 0.8 atm negatif basınç ile vakumlama (gaz giderme) işlemi 30 dakika boyunca yapılmıştır.

3. Aşama- Reçine Transferi Süreci

- VARTM cihazı yüzey sıcaklığı, oda sıcaklığı koşullarında 100° C'ye yaklaşık yarım saatte gelmektedir. Bu sıcaklık reçine transferi için uygun olan sıcaklıktır.

- Reçine sistemi ve cihaz hazır hale geldikten sonra, reçine transfer tarafındaki vakum hortumu vanası açılarak kumaş/keçe katmanlarının tamamını ıslatacak şekilde transfer edilmiştir.
- Reçine sistemi kumaş keçe tabakalarını tamamen ıslattıktan sonra reçine transfer hortumu sıkıca kapatıldı. Üretim esnasında her bir plaka için reçine emme zamanları kayıt altına alınmıştır. Kalıp içerisindeki gazın giderilmesi için yaklaşık 30dk beklenilmiştir.
- Kürleme işleminde plakalar, vakumlu ortamda 100° C yüzey sıcaklığında 8 saat boyunca bekletilmiştir
- Gerekli bekleme süresi dolduktan sonra cihaz yüzey sıcaklığı 30-40° C aralığında plakaların söküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Plakalar için ikinci bir kürleme işlemi yapılmamıştır.

Yukarıda bahsedilen aşamalar sonucu plakaların üretim gerçekleştirildi. Üretim aşamaları Şekil 9 temsili olarak görselleştirilmiştir.



Şekil 9. Kompozit üretim sürecinin şematik görselleştirilmesi

Üretilen plakalardan test numunelerinin elde edilmesi

Üretimi gerçekleştirilen plakalardan ilgili ASTM sıtandartlarına göre belirlenen test numune boyutlarına göre kesim işlemi yapılmıştır. Tüm numunelerin kesim işlemi CNC Router

cihazı ile yapılmıştır (Şekil 10). Kesim işlemlerinde 3mm çapında kompozit kesmek için tasarlanmış kesici uçlar kullanılmıştır.



Şekil 10. CNC Router ile test numunesi kesme işlemi

Kesim sonrası elde edilen test numuneleri ayrı ayrı poşetlenerek üzerlerine ilgili kompozit türü, numune sayısı ve üretim tarihleri yazılmıştır (Şekil 11).



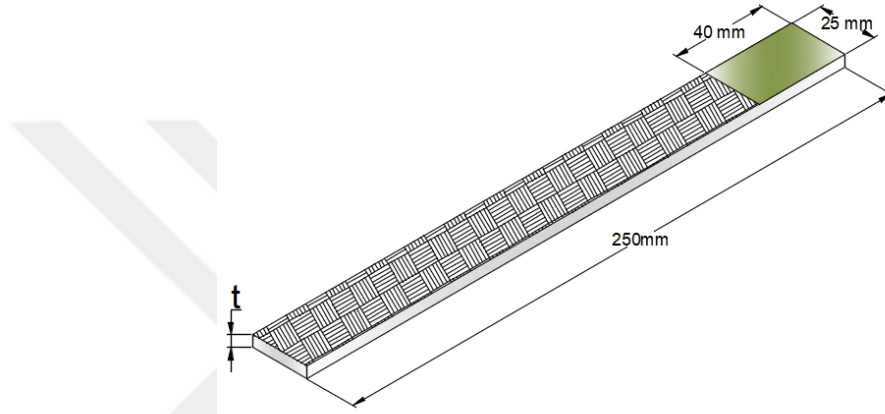
Şekil 11. Kesim sonrası elde edilen numunelerin etiketlenerek poşetlenmesi

Numunelerin malzeme özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi

Üç nokta eğilme testi için ASTM D790, ILSS testi için ASTM D2344, düşük hızlı darbe testi tayini için ASTM D-7136 doğal frekans ve sönüm oranı için ASTM E756-05 standartları referans alınmıştır.

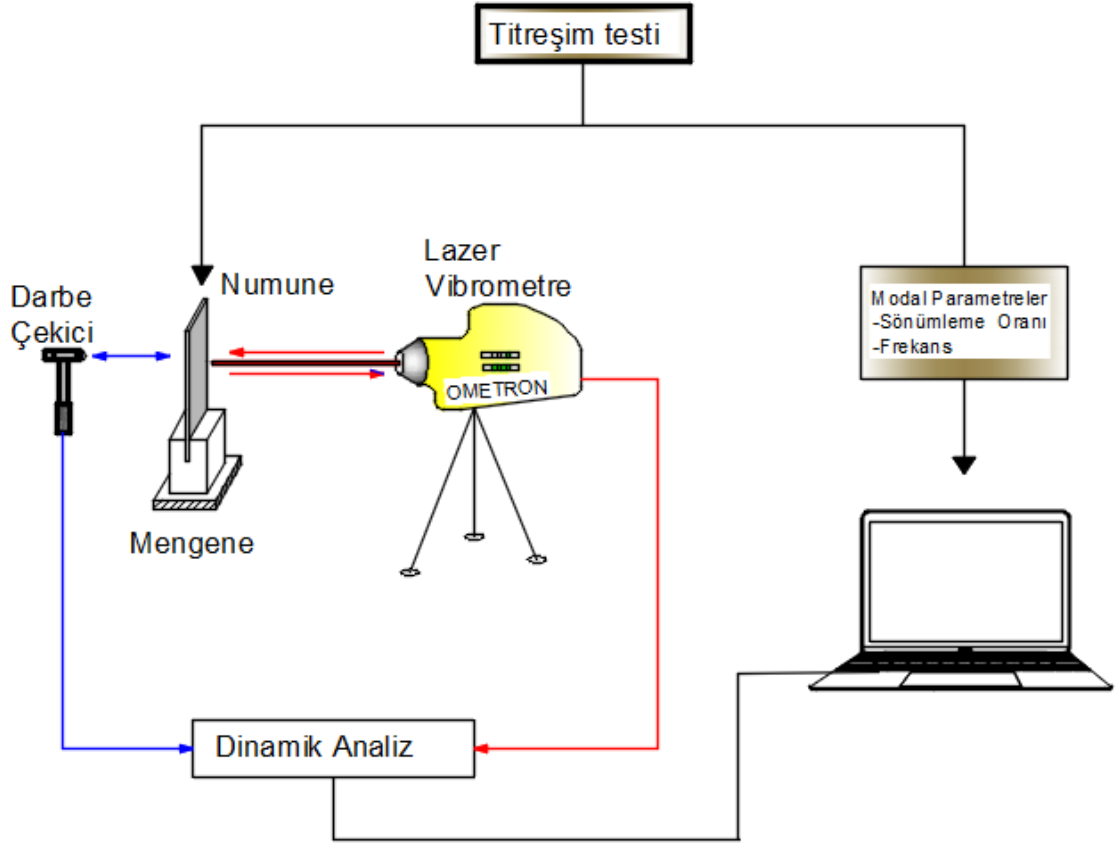
Titreşim (doğal frekans ve sönüm oranları) testi

Titreşim karakteristiğini tespit etmek için ASTM E756-05 standardında belirtilen koşullar dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. İlgili standarda göre numune boyutları 25mm genişlikte ve 250mm uzunluktadır (Şekil 12).

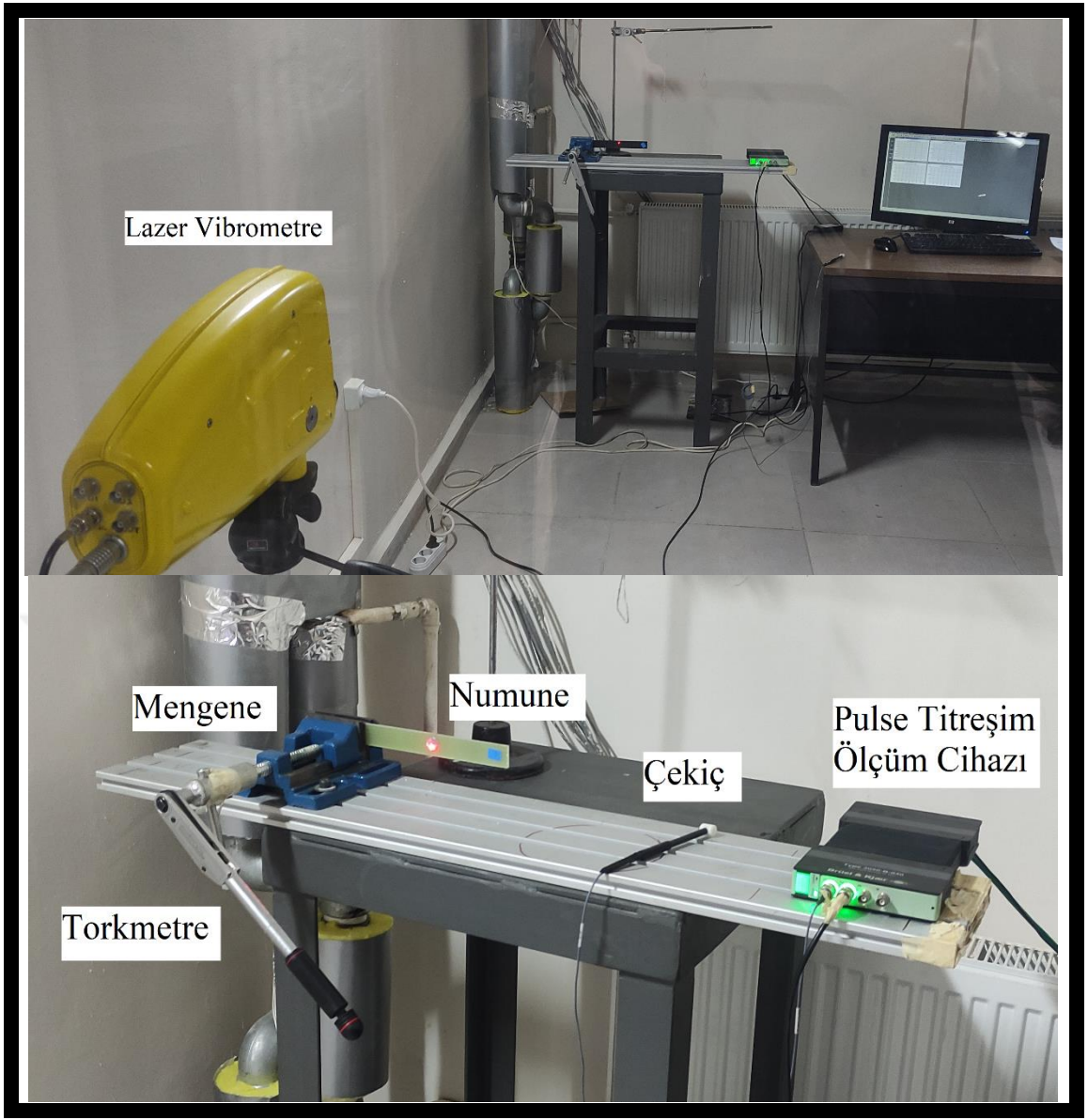


Şekil 12. Ankastre-serbest sınır şartlı titreşim test numunesi

Şekil 13'te şematik olarak gösterilen ve Şekil 14'de laboratuvar ortamında gösterilen titreşim ölçüm sistemi kullanılarak doğal frekans, depolama modülü ve sönümlenme oranı gibi titreşim tepkilerini belirlemek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deney düzeneğinde, bir darbe oluşturmak için darbeli çekiç kullanılır ve bu nedenle kompozit numuneler gerekli frekans alanı içinde uyarılır. Uyarılmış salınımlar sırasında, temassız bir lazer vibrometresi (Ometron VH300/İngiltere) kullanılarak titreşim tepkileri alınır ve ardından numunelerden gelen karşılık sinyaller veri toplama sistemine aktarılır (Bruel &Kjaer Sound and Vibration/Danimarka). Veri toplama sistemi tarafından toplanan sinyaller, doğal frekans ve sönümlenme oranını görselleştirmek ve incelemek için frekans/zaman veya genlik/zaman grafikleri gibi gerekli çıktı formatına göre me'scopeves yazılımı (Vibrant Technology / ABD) kullanılarak işlenir.

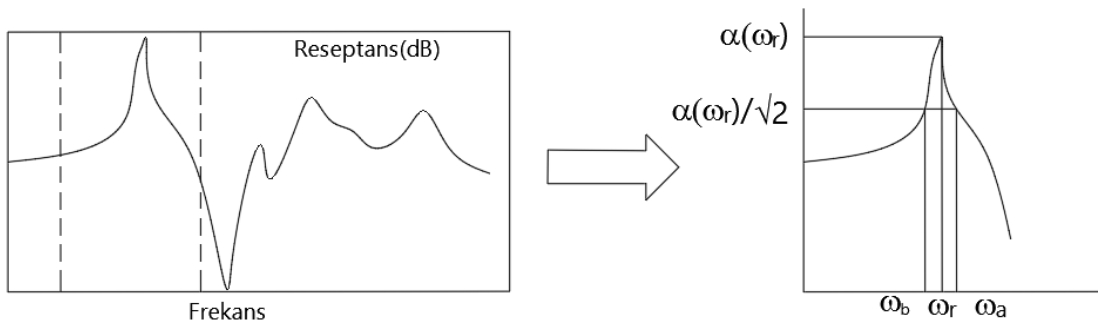


Şekil 13. Titreşim ölçüm sisteminin şematik gösterimi



Şekil 14. Titreşim testi deney düzeneği

Elde edilen veriler ışığında tepe tutma metodu (yarı bant güç metodu - HalfPower Bandwidth Method) ile sönümleme oranı hesaplanmıştır.



Şekil 15. Yarı güç noktaları (Fu & He, 2001)

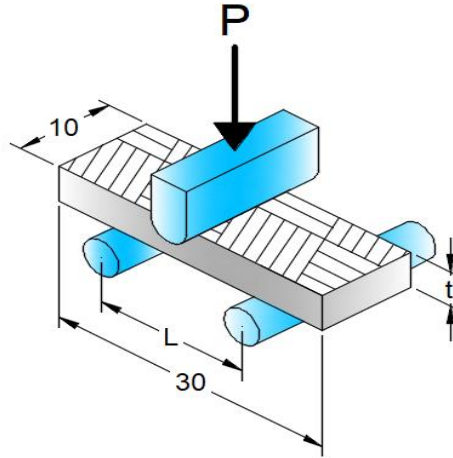
Titreşim halindeki bir yapının kendine özgü bir mod yapısı ve buna bağlı bir sönüm oranı vardır. Titreşim esnasında ölçülen frekansa bağlı değişen ivme sinyali, en basit modal

analiz yolu olan tepe tutma metodu ile analiz edilebilmektedir (Fu & He, 2001). Bu metod ile ivmenin maksimum olduğu doğal frekans eğrisi seçilir ve bu eğrinin tepe noktasının sağ ve sol tarafındaki “yarı güç bantı” noktaları $\alpha (\omega_r)/\sqrt{2}$ olacak şekilde belirlenir. Şekil 15’de yarı güç noktaları gösterilmiştir. Aşağıda verilen Denklem 1 ifadesi ile sönüm oranı (ζ_r) hesaplanılabilir.

$$\zeta_r = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_r} \quad (1)$$

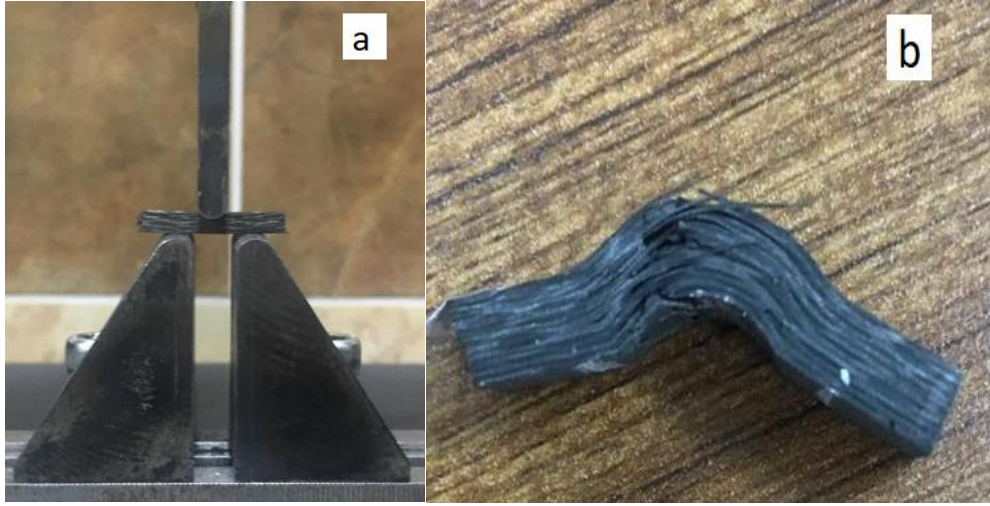
İnterlaminar kayma mukavemeti (ILSS) testleri

Interlaminar kayma mukavemeti (ILSS), laminasyon düzlemine paralel kayma mukavemetini ifade eder. ILSS testleri, 100 kN kapasiteli (Shimadzu® Corp. / Japonya) universal test cihazı ile ASTM D2344’ye göre, kısa kiriş kesme (KKK) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Mekanik Laboratuvarında bulunmaktadır. ILSS test numuneleri ilgili ASTM standartlarına uygun olarak, 30mm uzunluğunda ve 10mm genişliğinde olacak şekilde plakalardan kesilip elde edilmiştir (Şekil 16).



Şekil 16. ILSS test numunesi

Test esnasında, her bir numunenin kalınlığı ölçülmüş ve alt destek mesafeleri (support span) ayrı ayrı hesaplanarak testler gerçekleştirilmiştir. Plakaların üretiminde ne kadar hassasiyet gösterilse de, üretim sonunda farklı kalınlıklarda plakalar elde edilmesi muhakkaktır. Dolayısıyla numune boyutları ASTM standartlarında belirtilen numune uzunluğu = Kalınlık x 6 ve numune genişliği = kalınlık x 2 kriterlerine göre plakalardan kesilerek elde edilmiştir. ILSS testi esnasında Şekil 17.a numuneye kuvvet uygulanmadan önceki halini, Şekil 17.b ise kuvvetin etkisiyle numunenin sehim yapmış halini göstermektedir.



Şekil 17. ILSS testinde a) kuvvet uygulanmadan önce numune, b) kuvvet uygulandıktan sonra numune

İnterlaminar kayma mukavemeti testi sonucunda kısa kiriş mukavemeti, numunenin orta düzleminde uygulanan enine kesme gerilmesi aşağıdaki denklem (2) 'den hesaplanmaktadır.

$$F^{kkk} = 0.75 \frac{P_m}{bt} \quad (2)$$

Burada;

F^{kkk} , kısa kiriş mukavemeti (N/mm²)

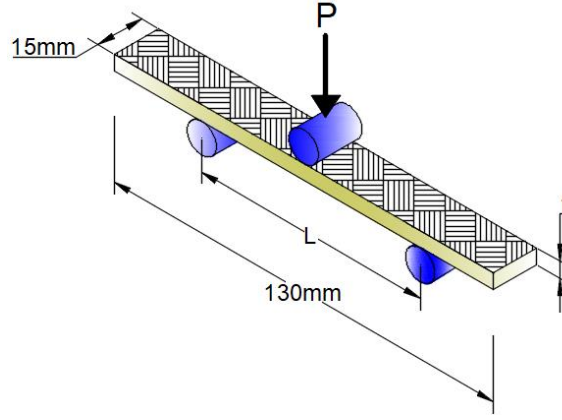
P_m , Maksimum yük (N)

b , numune genişliği (mm)

t , numune kalınlığı (mm)

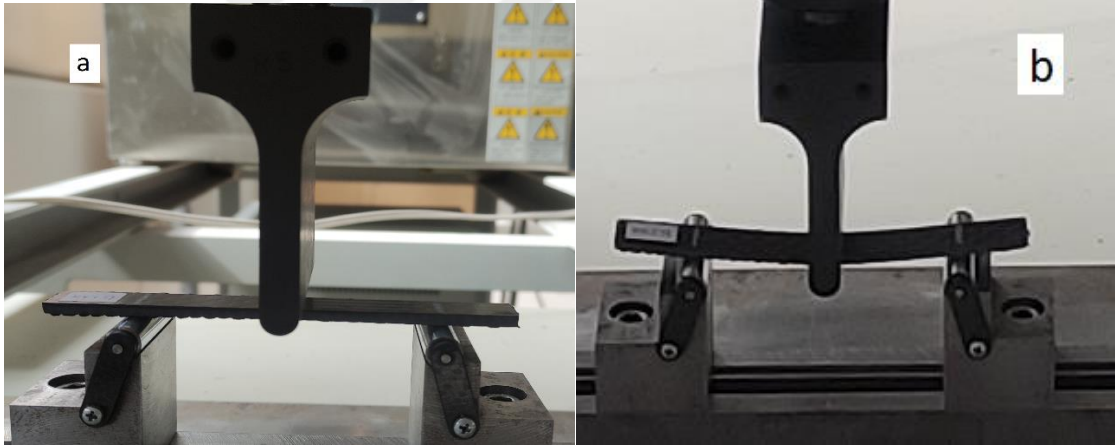
Üç nokta eğilme testleri

Üç nokta eğilme testleri, 100 kN kapasiteli (Shimadzu® Corp. / Japonya) universal test cihazı ile ASTM D-790 standartlarına göre icra edilmiştir. Bu cihaz Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Mekanik Laboratuvarında bulunmaktadır. Üç nokta eğilme test numuneleri, 130mm uzunluğunda ve 15mm genişliğinde olacak şekilde plakalardan kesilip elde edilmiştir (Şekil 18).



Şekil 18. Üç nokta eğilme testi numunesi

Test esnasında, herbir numunenin kalınlığı ölçülmüş ve alt destek mesafeleri (support span) ayrı ayrı hesaplanarak testler gerçekleştirilmiştir. Numunelerin tamamı 8 tabakalı üretildiği için destek mesafeleri standarda uygun olarak kalınlığın 16-48 katı olarak belirlenmiştir. Şekil 18’da “L” sembolü alt destekler arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Üç nokta eğilme testi esnasında Şekil 19.a numuneye kuvvet uygulanmadan önceki halini, Şekil 19.b ise kuvvetin etkisiyle numunenin sehim yapmış halini göstermektedir.



Şekil 19. Üç nokta eğilme testinde a) kuvvet uygulanmadan önce numune, b) kuvvet uygulandıktan sonra numune

Üç nokta eğilme testi sonucunda, ETP kompozit kirişte meydana gelen eğilme dayanımı ($\sigma_{eğ}$) ve eğilme modülü ($E_{eğ}$) sırasıyla denklem (3) ve denklem (4) ile elde edilir.

$$\sigma_{eğ} = \frac{3PL}{2bt^2} \quad (3)$$

$$E_{eğ} = \frac{L^3 m}{4bt^3} \quad (4)$$

Denklemlerde verilen semboller;

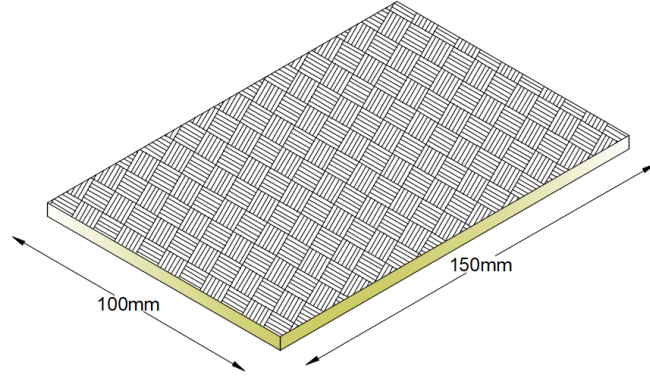
$\sigma_{eğ}$, eğilme dayanımını (N/mm²)

$E_{eğ}$, eğilme elastisite modülünü (N/mm²)

P, maksimum yükleme kuvvetini
b, test numunelerinin genişliği (mm)
L, destekler arası mesafeyi (mm)
m, Yük sehim eğrisinin başlangıçtaki düzgün doğrudan itibaren eğriye çizilen teğetin eğimi (N/mm^2)
t, test numuneleri kalınlığını (mm) belirtmektedir.

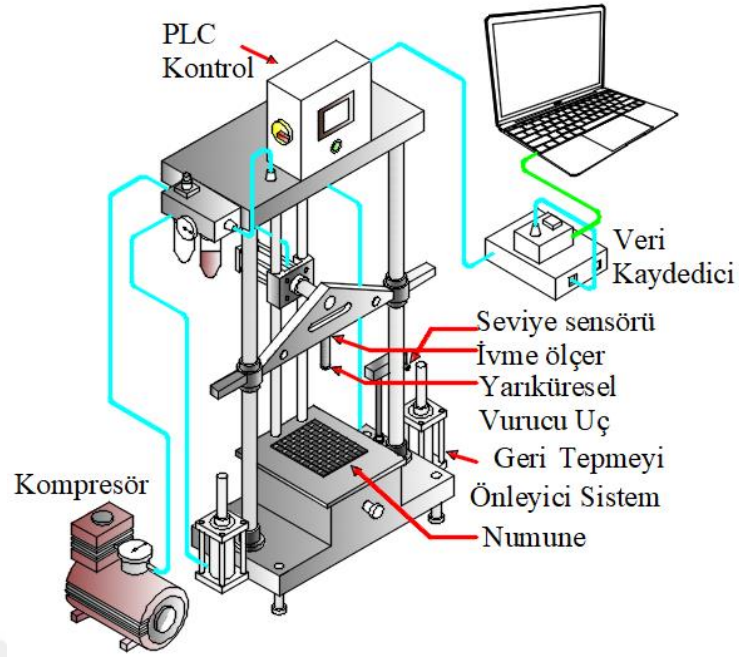
Düşük hızlı darbe testleri

Düşük hızlı darbe testleri (LVI), ASTM D-7136 standardına uygun bir şekilde Konya'da Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mekanik Laboratuvarında bulunan sanayi tipi darbe cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Darbe test numuneleri ilgili ASTM standartlarına göre 100mm x 150mm ebatlarında, plakalardan kesilerek elde edilmiştir (Şekil 20).



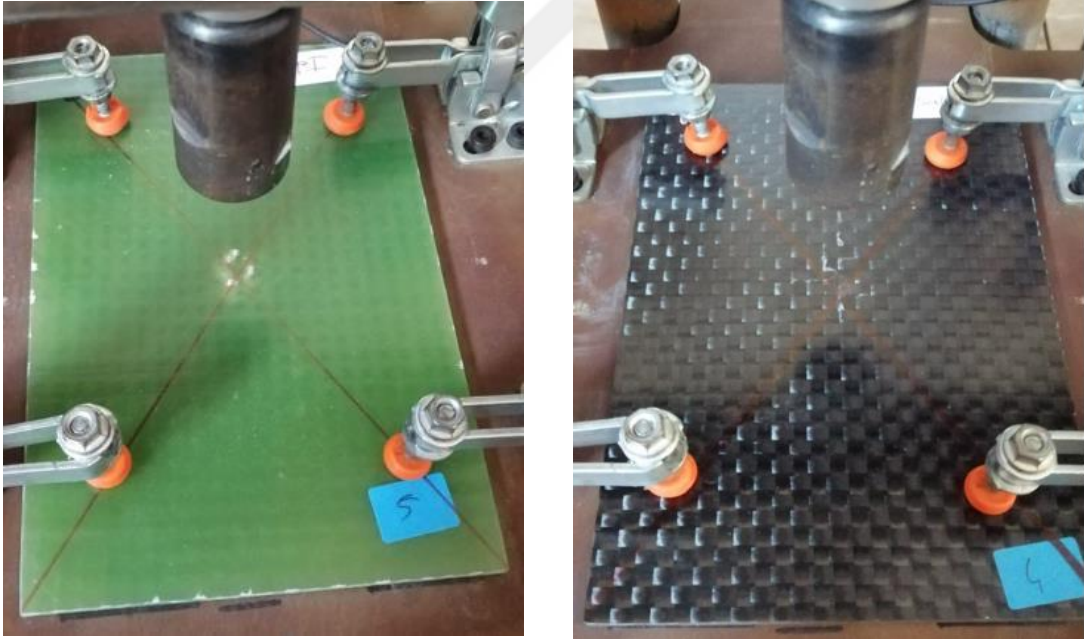
Şekil 20. Düşük hızlı darbe test numunesi

Termoplastik örtülerle serpiştirilmiş cam elyaf/epoksi ve karbon elyaf/epoksi kompozitlerinin LVI tepkilerini belirlemek için Şekil 21'de gösterilen ağırlık düşürme testleri için deneysel bir kurulum kullanılmıştır.



Şekil 21. LVI testleri için deneysel kurulum şematik gösterimi

Deneysel çalışmalarda, 45,87 cm yükseklikten yarım küre uçlu 5,6 kg'lık bir çarpma tertibatı serbest bırakılmış ve böylece kompozit numunelerin merkezine 25,2 J enerjiye eşdeğer 3 m/s hıza sahip darbe yükleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 22)



Şekil 22. Darbe sonrası numunelerde oluşan hasar

Çarpma yükleri sırasında enerjinin belirli bir kısmı numuneler tarafından emilir ve artık enerji çarpıcıya geri aktarılarak tekrar potansiyel enerji kazanmasına neden olur. Bu işlem, tüm enerji numuneler tarafından emilene kadar devam eder, bu da çoklu etkilerin gerçekleştirilmesini ve LVI yanıtlarının doğru bir şekilde tespit edilememesini sağlar. Bu nedenle, deney düzeneğinde çoklu darbeleri önlemek için geri tepme önleme sistemi kullanılır.

Geri tepme önleyici sistemde, ilk darbeden sonra seviye sensörü sayesinde pnömatik pistonlar hemen açılır ve böylece tekrarlanan darbeler önlenir. Öte yandan, ivmeölçer, veri kaydedici ve yazılımdan oluşan bir veri toplama sistemi kullanılarak kuvvet-zaman eğrileri elde edilir ve daha sonra elde edilen eğri verileri, temas sertliği, bükülme sertliği, emilen enerji, geri tepme enerjisi, tepe yer değiştirmesi, tepe kuvveti gibi LVI yanıtlarını elde etmek için bir Excel alt yordamı kullanılarak işlenir. Tüm konfigürasyonlar için en az 5 numune üzerinde ağırlık düşürme testleri yapıldı ve sonuçların güvenilir ve tekrarlanabilir olup olmadığını belirlemek için standart sapmalar hesaplandı.



BULGULAR ve TARTIŞMA

Titreşim Testi Sonuçları

Titreşim karakteristiği belirleme testleri, ankastre serbest ve serbest-serbest sınır koşullarında ASTM E756-05 standardına uygun yapılmıştır. Üretilen her bir plakadan altışar adet deney numunesi kullanılmıştır. Her bir test numunesinden üç veri grubu alınmıştır. Bu veri gruplarının herbiri için en az üç tekrarlı çekiç darbesi vurulmuştur. Her bir veri grubunda birinci doğal frekansları ve bu frekanslara karşılık gelen sönüm oranları değeri elde edilmiştir. Dolayısıyla, 34 plakadan elde edilen altışar adet test numunesine en az üçer veri grubu için ikişer defa çekiç ile vurulmuştur. Yani ankastre-serbest ve serbest-serbest sınır şartı için toplamda 2448 kez çekiçle tetikleme işlemi icra edilmiştir. Titreşim testi için toplam veri eldesi Tablo 4’de gösterilmiştir.

Tablo 4. Değerlendirilen Veri Sayısı

Plaka Sayısı	Numune Sayısı	Veri Gurubu	Sınır Koşulu	Tekrar Sayısı	Çekiç Darbesi	Toplam
(17 cam 17 karbon)	(6 cam 6 karbon)	(doğal frekan sönüm oranı)	(A-S S-S)			
34	6	3	2	2	2	2448

Titreşim karakteristiğini belirlemek için yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen titreşim (doğal frekans ve sönüm oranları) sonuçları Tablo 5-8’de verilmiştir.

Tablo 5. Termoplastik Keçe Katmanlı Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Üretim Gurubuna Ait Doğal Frekans ve Sönüm Oranı Değerleri (Ankastre-Serbest)

Numune Adı	Kumaş Türü	Tabaka Yerleşimi	Yönlenme Açısı	1. Doğal Frekans	Sönüm Oranı
C8	Cam	8	0/90	33	0,639
C8/7 PI	PI Keçe	8/7	0/90	37,8	0,776
C8/7 PPS	PPS Keçe	8/7	0/90	39,7	0,779
C8/7 PEEK	PEEK Keçe	8/7	0/90	38,6	0,636
C8/7 PA	PA Keçe	8/7	0/90	45,8	0,798
C8/7 PEI	PEI Keçe	8/7	0/90	41,5	0,671
C8/2-2 PI	PI Keçe	8/2 Merkez	0/90	36,2	1,121
C8/2-2 PPS	PPS Keçe	8/2 Merkez	0/90	37,1	0,667

Tablo 5. (devamı)

C8/2-2 PEEK	PEEK Keçe	8/2 Merkez	0/90	33,9	0,68
C8/2-2 PA	PA Keçe	8/2 Merkez	0/90	36,4	0,84
C8/2-2 PEI	PEI Keçe	8/2 Merkez	0/90	34,8	1,014
C8/2-1 PI	PI Keçe	8/2 Yüzey	0/90	37,5	0,971
C8/2-1 PPS	PPS Keçe	8/2 Yüzey	0/90	36,1	0,78
C8/2-1 PEEK	PEEK Keçe	8/2 Yüzey	0/90	36,1	0,916
C8/2-1 PA	PA Keçe	8/2 Yüzey	0/90	35,9	0,919
C8/2-1 PEI	PEI Keçe	8/2 Yüzey	0/90	33,5	0,613

Tablo 6. Termoplastik Keçe Katmanlı Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Üretim Gurubuna Ait Doğal Frekans ve Sönüm Oranı Değerleri (Ankastre-Serbest)

Numune Adı	Kumaş Türü	Tabaka Yerleşimi	Yönlenme Açısı	1. Doğal Frekans	Sönüm Oranı
K8	Karbon	8	0/90	54,6	0,574
K8/7 PI	PI Keçe	8/7	0/90	58,2	0,547
K8/7 PPS	PPS Keçe	8/7	0/90	67	0,448
K8/7 PEEK	PEEK Keçe	8/7	0/90	59,7	0,541
K8/7 PA	PA Keçe	8/7	0/90	70,4	0,476
K8/7 PEI	PEI Keçe	8/7	0/90	62,3	0,396
K8/2-2 PI	PI Keçe	8/2 Merkez	0/90	59,7	0,512
K8/2-2 PPS	PPS Keçe	8/2 Merkez	0/90	63,2	0,481
K8/2-2 PEEK	PEEK Keçe	8/2 Merkez	0/90	58,5	0,606
K8/2-2 PA	PA Keçe	8/2 Merkez	0/90	61,9	0,501
K8/2-2 PEI	PEI Keçe	8/2 Merkez	0/90	61,7	0,441
K8/2-1 PI	PI Keçe	8/2 Yüzey	0/90	63,2	0,558
K8/2-1 PPS	PPS Keçe	8/2 Yüzey	0/90	64,1	0,427
K8/2-1 PEEK	PEEK Keçe	8/2 Yüzey	0/90	64,2	0,772
K8/2-1 PA	PA Keçe	8/2 Yüzey	0/90	59,9	0,581
K8/2-1 PEI	PEI Keçe	8/2 Yüzey	0/90	63,1	0,439

Tablo 7. Termoplastik Keçe Katmanlı Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Üretim Gurubuna Ait Doğal Frekans ve Sönüm Oranı Değerleri (Serbest-Serbest)

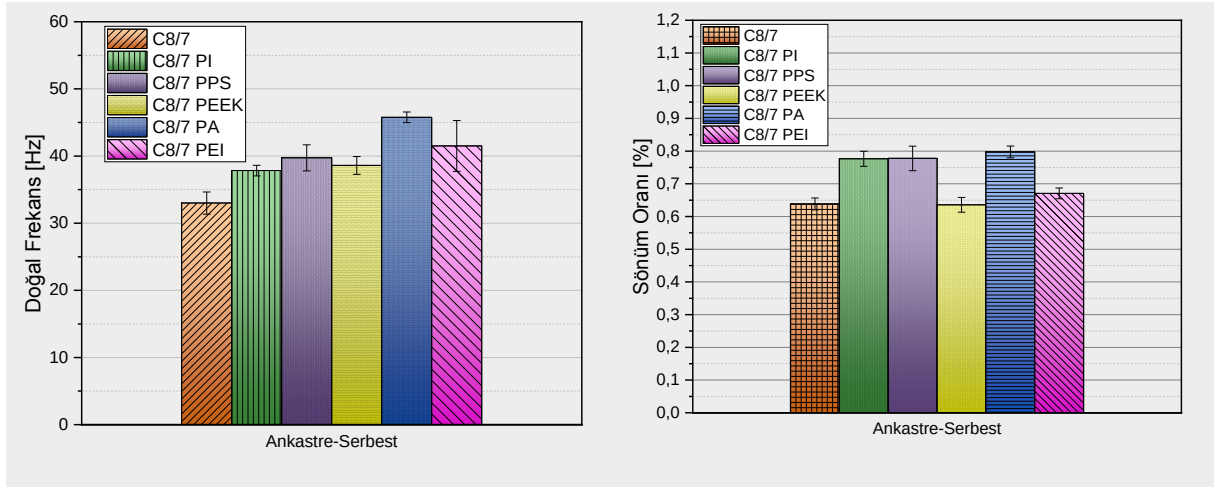
Numune Adı	Kumaş Türü	Tabaka Yerleşimi	Yönlenme Açısı	1. Doğal Frekans	Sönüm Oranı
C8	Cam	8	0/90	200,8	0,295
C8/7 PI	PI Keçe	8/7	0/90	214,6	0,267
C8/7 PPS	PPS Keçe	8/7	0/90	241,4	0,293
C8/7 PEEK	PEEK Keçe	8/7	0/90	219,7	0,285
C8/7 PA	PA Keçe	8/7	0/90	257,4	0,263
C8/7 PEI	PEI Keçe	8/7	0/90	212	0,263
C8/2-2 PI	PI Keçe	8/2 Merkez	0/90	206,5	0,257
C8/2-2 PPS	PPS Keçe	8/2 Merkez	0/90	213,9	0,264
C8/2-2 PEEK	PEEK Keçe	8/2 Merkez	0/90	205,4	0,302
C8/2-2 PA	PA Keçe	8/2 Merkez	0/90	217,1	0,268
C8/2-2 PEI	PEI Keçe	8/2 Merkez	0/90	202,5	0,267
C8/2-1 PI	PI Keçe	8/2 Yüzey	0/90	202,8	0,266
C8/2-1 PPS	PPS Keçe	8/2 Yüzey	0/90	201,9	0,281
C8/2-1 PEEK	PEEK Keçe	8/2 Yüzey	0/90	204	0,261
C8/2-1 PA	PA Keçe	8/2 Yüzey	0/90	199,8	0,282
C8/2-1 PEI	PEI Keçe	8/2 Yüzey	0/90	199,6	0,306

Tablo 8. Termoplastik Keçe Katmanlı Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Üretim Gurubuna Ait Doğal Frekans ve Sönüm Oranı Değerleri (Serbest-Serbest)

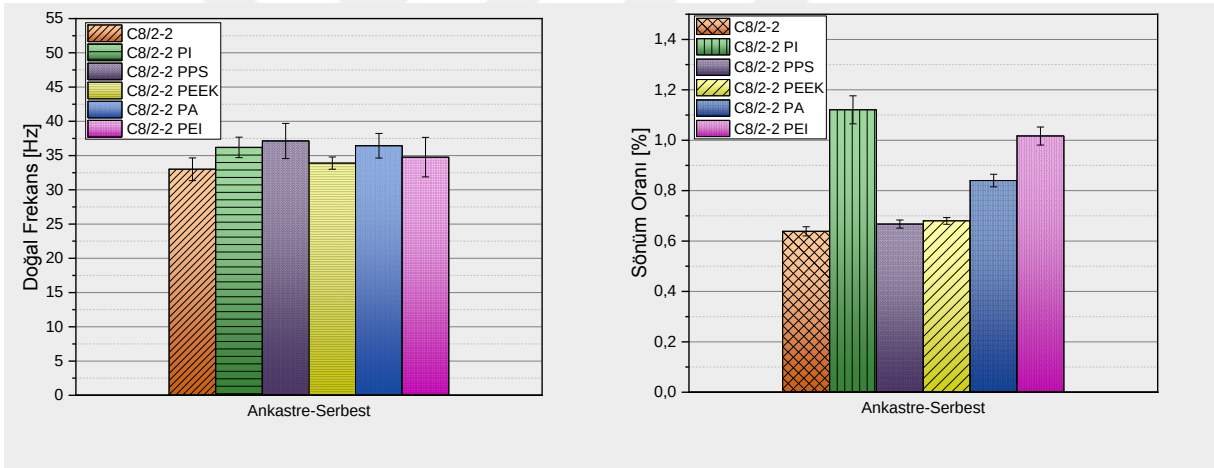
Numune Adı	Kumaş Türü	Tabaka Yerleşimi	Yönlenme Açısı	1. Doğal Frekans	Sönüm Oranı
K8	Karbon	8	0/90	351,2	0,124
K8/7 PI	PI Keçe	8/7	0/90	380	0,698
K8/7 PPS	PPS Keçe	8/7	0/90	428	0,582
K8/7 PEEK	PEEK Keçe	8/7	0/90	394,4	0,476
K8/7 PA	PA Keçe	8/7	0/90	465,6	0,456
K8/7 PEI	PEI Keçe	8/7	0/90	407,2	0,487
K8/2-2 PI	PI Keçe	8/2 Merkez	0/90	380	0,117
K8/2-2 PPS	PPS Keçe	8/2 Merkez	0/90	404,8	0,411
K8/2-2 PEEK	PEEK Keçe	8/2 Merkez	0/90	384,9	0,104
K8/2-2 PA	PA Keçe	8/2 Merkez	0/90	408,8	0,25
K8/2-2 PEI	PEI Keçe	8/2 Merkez	0/90	388,4	0,117
K8/2-1 PI	PI Keçe	8/2 Yüzey	0/90	372,8	0,122
K8/2-1 PPS	PPS Keçe	8/2 Yüzey	0/90	375,6	0,133
K8/2-1 PEEK	PEEK Keçe	8/2 Yüzey	0/90	371,1	0,139
K8/2-1 PA	PA Keçe	8/2 Yüzey	0/90	364,3	0,133
K8/2-1 PEI	PEI Keçe	8/2 Yüzey	0/90	363,3	0,119

Titreşim Analizleri

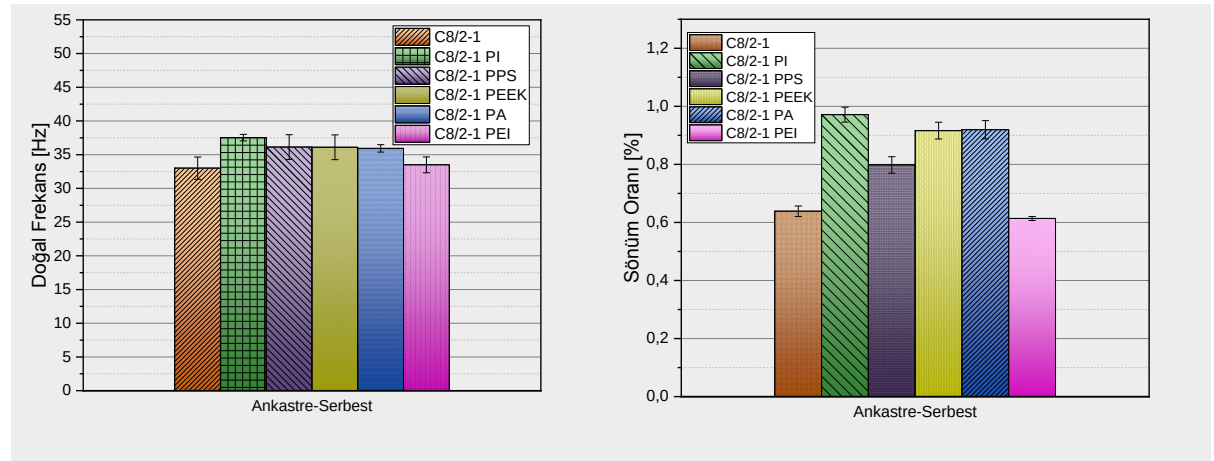
Titreşim karakteristiğini belirlemek için yapılan testlerinden elde edilen test sonuçlarının ortalama değerleri alınarak aşağıdaki grafikler (Şekil 23-34) çizilmiştir.



Şekil 23. Tümü katlara dâhil edilmiş termoplastik keçelerin cam elyaf tabakalı kompozit yapı için, ankastre-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları



Şekil 24. Tarafsız eksen konumuna dâhil edilmiş termoplastik keçelerin cam elyaf tabakalı kompozit yapı için, ankastre-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları



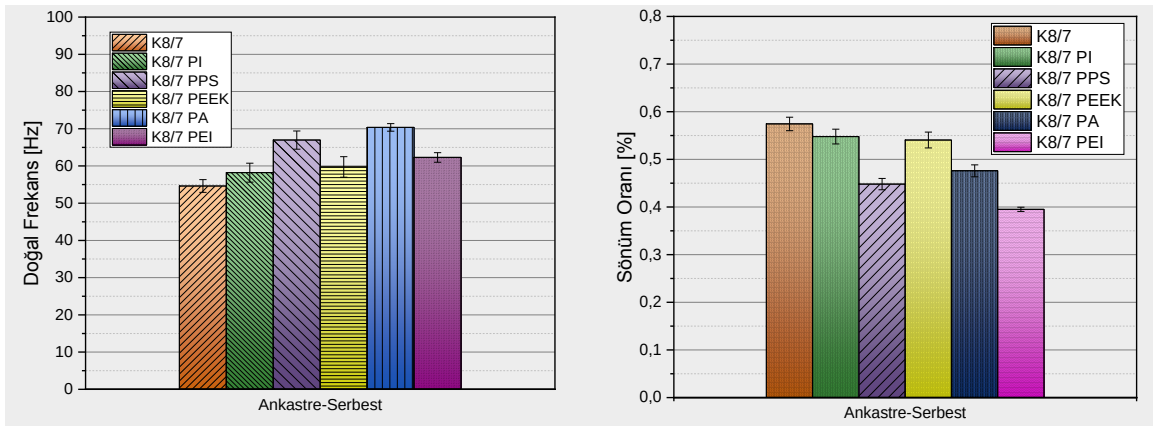
Şekil 25. Yüzey konumuna dâhil edilmiş termoplastik keçelerin cam elyaf tabakalı kompozit yapı için, ankastre-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları

Şekil 23 - 25 incelendiğinde, cam elyaf takviyelerinin arasına dahil edilen termoplastik keçe katmanları ankastre-serbest sınır şartlarında, referans numuneye (G8'e) kıyasla doğal frekansları genel olarak artırdığı görülmektedir. Termoplastik keçelerin tüm katlara dahil edildiği durumlar incelendiğinde (Şekil 23), yaklaşık %26'lık bir artışla PA keçe ilavesinde olduğu gözlemlenmiştir. Buna nazaran en az artış ise yaklaşık %10'luk bir artışla PI keçe ilavesinde olduğu görülmektedir.

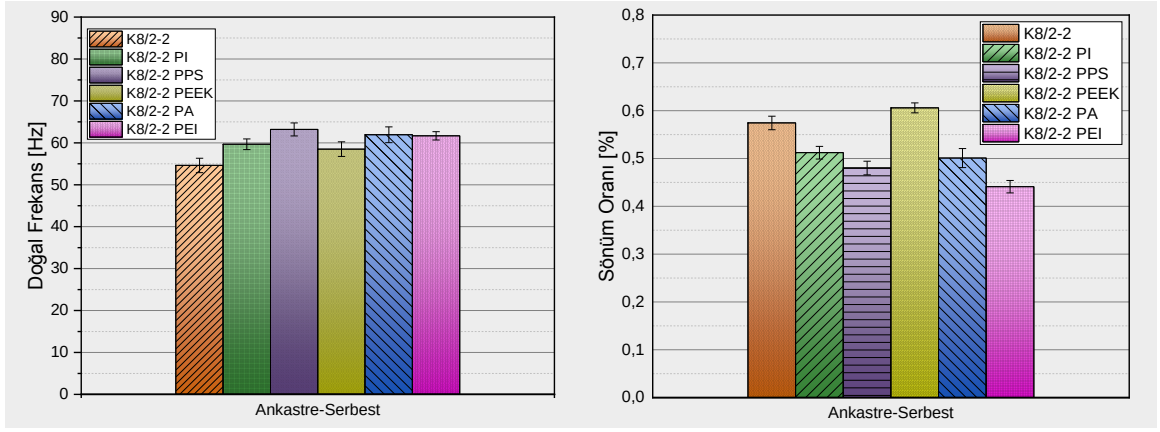
Tarafsız eksene (Şekil 24) dahil edilen termoplastik keçelerde doğal frekansı en fazla artıran keçe PPS olurken en az artıran keçenin PEEK olduğu görülmektedir. Termoplastik keçelerin yüzey konumuna (Şekil 25) yerleştirilmesi durumunda ise, doğal frekansı en fazla (yakalaşık %13) artıran PI keçe olmuştur.

Termoplastik keçelerin ara katman olarak cam elyaf kompozitlere dahil edildiği bu üç farklı konum incelendiğinde, doğal frekans artışı açısından PA keçenin en iyi performans gösterdiği görülmektedir.

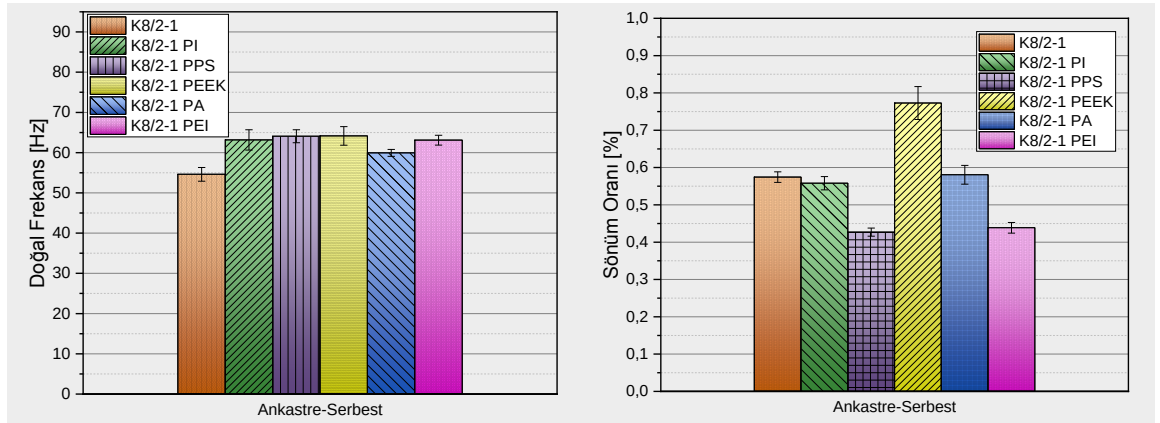
Cam elyaf tabakalı kompozitlere ara katman dahil edilen termoplastik keçelerin, hemen hepsinin iyi bir sönümleme performansı gösterdiğini söyleyebiliriz. Her üç istifleme konumu (tüm-merkez-yüzey) bakımından ilgili grafikler incelendiğinde, tarafsız eksen konumundaki PI keçe %42'lik bir artışla en iyi sönümleme performansı gösteren termoplastik keçe olduğu görülmektedir. Ayrıca PI keçe de PEI keçeye yaklaşan bir sönümleme performansı göstermiştir. Fakat PEEK keçe, her üç grafikte de doğal frekansındaki artışına nispeten zayıf bir sönümleme kabiliyeti sergilemiştir.



Şekil 26. Tüm katlara dâhil edilmiş termoplastik keçelerin karbon elyaf tabakalı kompozit yapı için, ankastre-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları



Şekil 27. Tarafsız eksen konumuna dâhil edilmiş termoplastik keçelerin karbon elyaf tabakalı kompozit yapı için, ankastre-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları

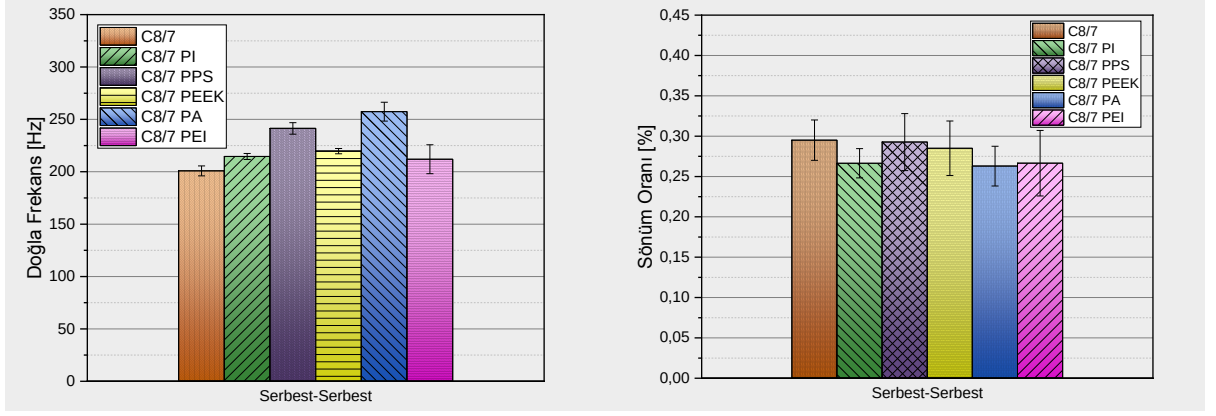


Şekil 28. Yüzey konumuna dâhil edilmiş termoplastik keçelerin karbon elyaf tabakalı kompozit yapı için, ankastre-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları

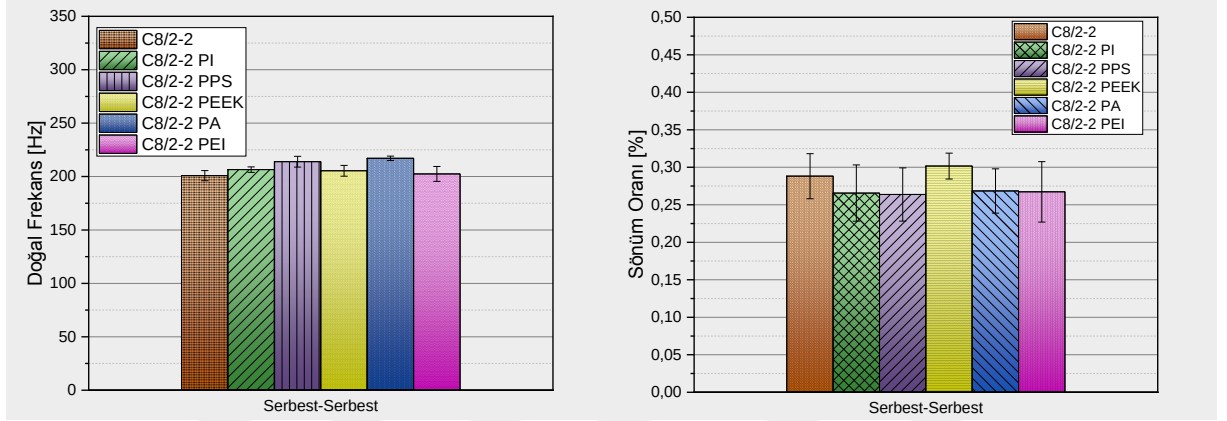
Şekil 26 - 28 incelendiğinde, karbon elyaf takviyelerinin arasına dahil edilen termoplastik keçe katmanları ankastre-serbest sınır şartlarında, referans numuneye (K8'e) kıyasla doğal frekansları genel olarak artırdığı görülmektedir. Termoplastik keçelerin tüm katlara dahil edildiği durumlar incelendiğinde (Şekil 26.), yaklaşık %29'luk bir artışla PA keçe ilavesinde olduğu görülmektedir. Buna nazaran en az artış ise yaklaşık %5'luk bir artışla PI keçe ilavesinde olduğu görülmektedir.

Tarafsız eksene (Şekil 27) dahil edilen termoplastik keçelerde doğal frekansı en fazla artıran keçe PPS olurken en az artıran keçenin PEEK olduğu görülmektedir. Termoplastik keçelerin yüzey konumuna (Şekil 28) yerleştirilmesi durumunda ise, doğal frekans artışları bakımından, PI, PPS, PEEK ve PEI artış oranları açısından hemen aynı performansı gösterdiler.

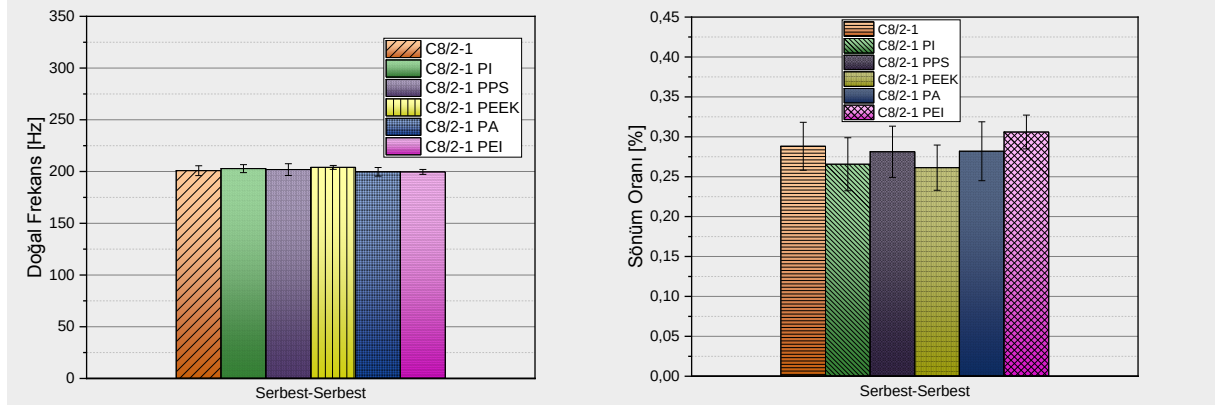
Şekil 26 – 28 grafikleri sönüm oranları bakımından analiz edildiğinde, her üç grafikte de göze çarpan PEEK keçenin performansı olmuştur. PEEK'teki bu performans artışı, karbon elyafı daha iyi yapışma dolayısıyla daha iyi mekanik ve dinamik özellik göstermiştir şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 29. Tüm katlara dâhil edilmiş termoplastik keçelerin cam elyaf tabakalı kompozit yapı için, serbest-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları

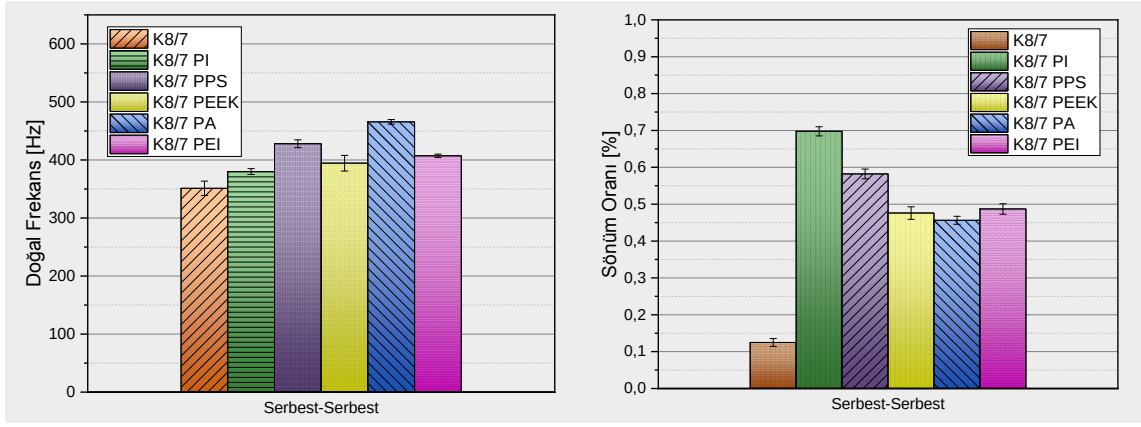


Şekil 30. Tarafsız eksen konumuna dâhil edilmiş termoplastik keçelerin cam elyaf tabakalı kompozit yapı için, serbest-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları

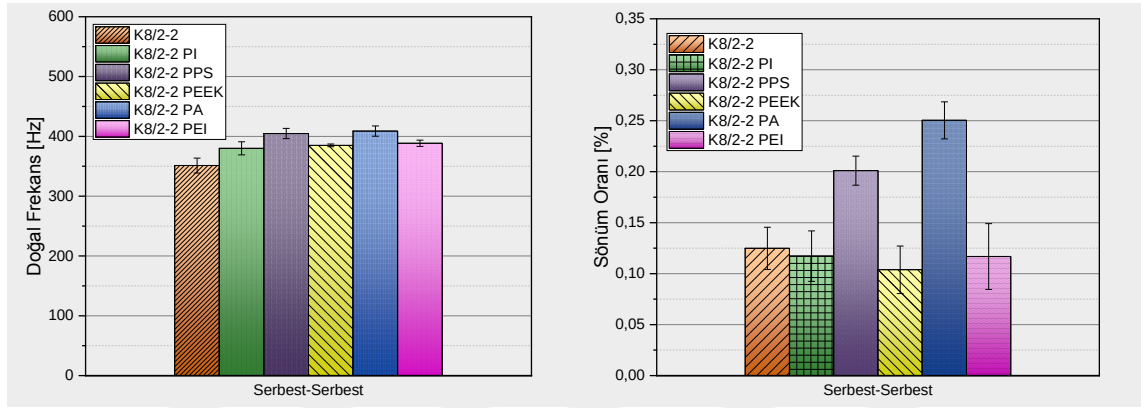


Şekil 31. Yüzey konumuna dâhil edilmiş termoplastik keçelerin cam elyaf tabakalı kompozit yapı için, serbest-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları

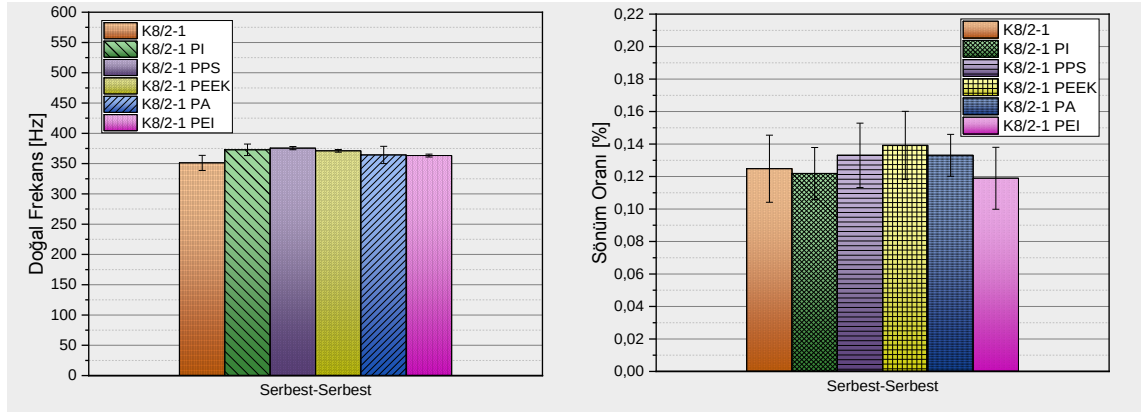
Şekil 29 - 31 incelendiğinde, cam elyaf takviyelerinin arasına dahil edilen termoplastik keçe katmanları serbest-serbest sınır şartlarında, referans numuneye (G8'e) kıyasla doğal frekansları tüm katmanlarda ve merkezde genel olarak artırdığı görülürken yüzey konumunda etkisiz kaldığı görülmektedir. Sönüm oranları açısından incelendiğinde ise, tarafsız eksen konumundaki PEEK keçe ve yüzey konumundaki PEI keçe hariç diğer konumlarda bir azalış görülmektedir.



Şekil 32. Tüm katlara dâhil edilmiş termoplastik keçelerin karbon elyaf tabakalı kompozit yapı için, serbest-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları



Şekil 33. Tarafsız eksen konumuna dâhil edilmiş termoplastik keçelerin karbon elyaf tabakalı kompozit yapı için, serbest-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları



Şekil 34. Yüzey konumuna dâhil edilmiş termoplastik keçelerin karbon elyaf tabakalı kompozit yapı için, serbest-serbest sınır şartlarında 1. doğal frekansları ve sönüm oranları

Şekil 32 - 34 incelendiğinde, karbon elyaf takviyelerinin arasına dahil edilen termoplastik keçe katmanları serbest-serbest sınır şartlarında, referans numuneye (K8'e) kıyasla doğal frekansları tüm konumlarda artırdığı görülmektedir. Sönüm oranları açısından incelendiğinde ise, tüm katlara dahil edilen termoplastik keçeler sönüm oranını artırmıştır. Fakat merkez ve yüzeyde aynı durum söz konusu değildir. Tarafsız ekseninde PPS ve PA keçeler sönüm oranını artırırken PI, PEEK ve PEI sönüm oranını azaltmış olduğu görülmektedir. Yüzey

konumunda ise, PEEK, PPS ve PA keçeler sönüm oranını artırırken PI ve PEI keçeler sönüm oranını azalttığı görülmektedir.

Termoplastik keçe katmanlarının istifleme sırasına göre doğal frekanslar, her üç konfigürasyonlar için referans numuneye göre arttığı görülmektedir. Doğal frekanslardaki bu artış keçelerin kompozit yapıda meydana getirdiği sertleştirme yani rijitlik artışı ile açıklanabilir. Ayrıca sınır koşullarının, termoplastik keçe katmanlı cam elyaf veya karbon elyaf takviyeli kompozitlerin doğal frekansları üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu da eklemek gerekir. Aynı mod şekilleri için, iki sınır koşulları arasında doğal frekans değerleri, serbest-serbest durum için daha yüksek, ankastre-serbest durum için daha düşük bulunmuştur. Benzer türden durumlar başka çalışmalarda da görülmüştür{İlangovan, 2020 #69;Alexander, June 2015 #70}.

Termoplastik keçe ilavesinin cam elyaf/epoksi kompozitlerde sönümlenme oranları (Şekil 23-25) ve (Şekil 29-31)'de verilmiştir. Ankastre-serbest sınır koşullarında test edilen numunler serbest-serbest test edilen numunelere göre ekseriyetle daha yüksek sönümlenme oranları sergilemiştir. Elde edilen sayısal veriler dikkate alındığında, termoplastik keçe ilavesiyle sönümlenme oranlarının artması, cam eltaf takviyeli kompozitlerde titreşim özelliklerini geliştirmek için keçe ilavesinin sağlamlığını teyit etmektedir. Bu, epoksi matris ile cam elyaf ve termoplastik keçelerin arasındaki arayüzey sürtünmesindeki artışa bağlanabilir{Fu, 2008 #71;İlangovan, 2020 #69;Alexander, June 2015 #70}.

İnterlaminar Kayma Mukavemeti (ILSS) Analizleri

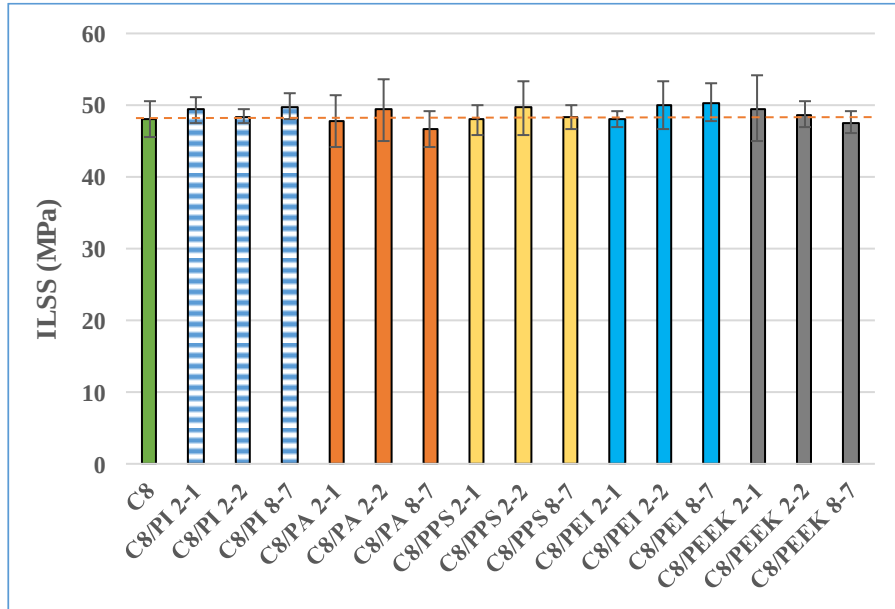
İnterlaminar kayma mukavemeti sonuçları, termoplastik keçe katmanlı cam elyaf takviyeli kompozitler için Tablo 9'da, termoplastik keçe katmanlı karbon elyaf takviyeli kompozitler için ise Tablo 10'da sunulmuştur.

Tablo 9. Termoplastik Keçe Katmanlı Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin ILSS Testi Sonuçları

Numune Adı	Kumaş Türü	Tabaka Yerleşimi	ILSS (MPa)
C8	Cam	8	48,0430
C8/7 PI	PI Keçe	8/7	49,8240
C8/7 PPS	PPS Keçe	8/7	48,1981
C8/7 PEEK	PEEK Keçe	8/7	47,6000
C8/7 PA	PA Keçe	8/7	46,6650
C8/7 PEI	PEI Keçe	8/7	50,3710
C8/2-2 PI	PI Keçe	8/2 Merkez	48,3990
C8/2-2 PPS	PPS Keçe	8/2 Merkez	49,5800
C8/2-2 PEEK	PEEK Keçe	8/2 Merkez	48,6240
C8/2-2 PA	PA Keçe	8/2 Merkez	49,3508
C8/2-2 PEI	PEI Keçe	8/2 Merkez	50,0226
C8/2-1 PI	PI Keçe	8/2 Yüzey	49,3164
C8/2-1 PPS	PPS Keçe	8/2 Yüzey	47,9823
C8/2-1 PEEK	PEEK Keçe	8/2 Yüzey	49,5585
C8/2-1 PA	PA Keçe	8/2 Yüzey	47,7036
C8/2-1 PEI	PEI Keçe	8/2 Yüzey	48,0125

Tablo 10. Termoplastik Keçe Katmanlı Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin ILSS Testi Sonuçları

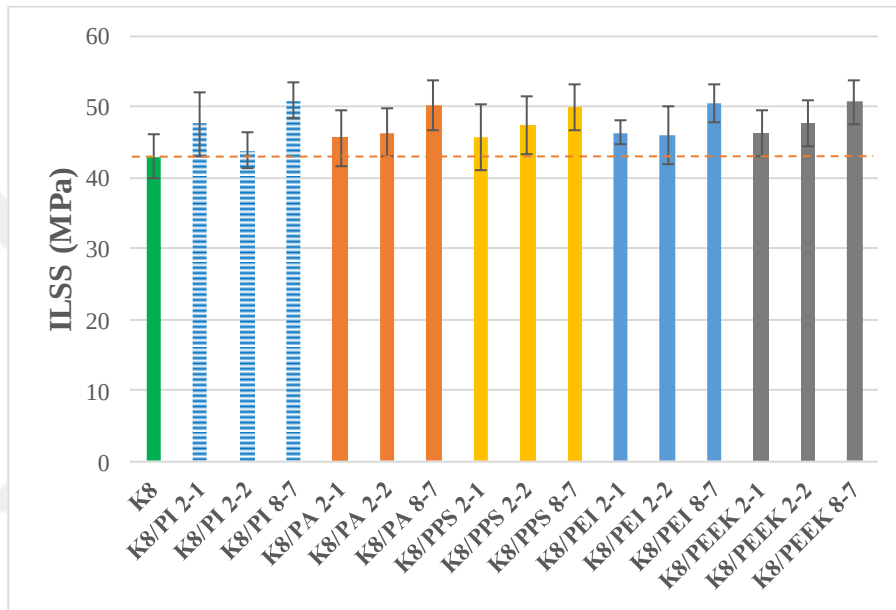
Numune Adı	Kumaş Türü	Tabaka Yerleşimi	ILSS (MPa)
K8	Karbon	8	42,9473
K8/7 PI	PI Keçe	8/7	50,7741
K8/7 PPS	PPS Keçe	8/7	49,9599
K8/7 PEEK	PEEK Keçe	8/7	50,5862
K8/7 PA	PA Keçe	8/7	50,1394
K8/7 PEI	PEI Keçe	8/7	50,3469
K8/2-2 PI	PI Keçe	8/2 Merkez	43,7820
K8/2-2 PPS	PPS Keçe	8/2 Merkez	47,3978
K8/2-2 PEEK	PEEK Keçe	8/2 Merkez	47,6110
K8/2-2 PA	PA Keçe	8/2 Merkez	46,3607
K8/2-2 PEI	PEI Keçe	8/2 Merkez	46,0430
K8/2-1 PI	PI Keçe	8/2 Yüzey	47,4965
K8/2-1 PPS	PPS Keçe	8/2 Yüzey	45,6040
K8/2-1 PEEK	PEEK Keçe	8/2 Yüzey	46,3045
K8/2-1 PA	PA Keçe	8/2 Yüzey	45,5650
K8/2-1 PEI	PEI Keçe	8/2 Yüzey	46,3073



Şekil 35. Termoplastik keçe katmanlı cam elyaf takviyeli kompozitlerin ILSS testi sonuçlarının grafiği

Genel olarak elyaf takviyeli kompozitlerin tasarımında interlaminar keme mukavemeti (ILSS) sınırlayıcı bir özelliğe sahiptir. Kompozit yapıların tasarımında matrisin hakim olduğu en önemli mekanik özelliklerden biridir. Bu nedenle çeşitli yapısal sektörlerde elyaf takviyeli

kompozitlerinin ILSS'nin iyileştirilmesi, başarılı bir uygulama eldesi için her zaman önemli bir amaç olmuştur. Dolayısıyla bu tez çalışmasında ILSS'nin geliştirilmesi için beş farklı termoplastik keçe kullanılmıştır. Bu keçeler karbon ve cam elyaf arasına katman olarak dahil edilmiştir. Şekil 35 incelendiğinde, keçelerin tarafsız eksene yerleştirilmesi durumunda, PA, PPS, PEI ve PEEK keçelerde artış şeklinde olurken PI keçesinde azaldığı görülmektedir. Yüzey konumuna yerleştirilen termoplastik keçelerde, PI keçe ilavesi mukavemeti artırırken diğer keçelerde ya azalış şeklinde olmuş ya da etkisiz kalmıştır. Keçelerin tüm katmanlara dahil edilmesi durumunda ise PI ve PEI keçeler mukavemeti artırırken, kalınlığın artmasına rağmen diğer termoplastik keçelerin mukavemeti azalttığı görülmektedir.



Şekil 36. Termoplastik keçe katmanlı karbon elyaf takviyeli kompozitlerin ILSS testi sonuçlarının grafiği

Şekil 36 incelendiğinde, karbon elyaf kumaşların arasına istiflenen termoplastik keçeler genel anlamda interlaminar kayma mukavemetini artırmıştır. Bu artış en fazla tüm katmanlara yerleştirilen keçe katmalı kompozit yapılarda görülmüştür. Yine bu artışı en iyi takip eden konum ise yüzey konumu olduğu görülmektedir. Her iki grafikte birlikte analiz edildiğinde, interlaminar kayma mukavemeti açısından termoplastik keçeler ile karbon elyaf takviyeli kompozitler olduğu görülmektedir.

Şekil 35 ve Şekil 36 ILSS'nin termoplastik keçe katmalı cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin katmanlarının sayısı ile varyasyonunu gösterir. Termoplastik keçe katmanlarının sayısının artmasıyla cam elyaf takviyeli kompozitler için PI ve PEI keçelerde karbon elyaf takviyeli kompozitlerde ise tüm varyasyonlarda ILSS'de monoton bir artış eğilimi gözlemledik. Bu monotonik artış eğilimi, artan kalınlıkla birlikte termoplastik ara katmanlarının artan kırılma mukavemetine ve tokluğuna bağlanabilir. Aslında, iki malzeme

(kumaş ve keçe) arasındaki uyumlu yapıştırıcıların tabaka kalınlığı ile bunların etkili kırılma mukavemeti ve tokluğu arasında pozitif bir ilişkiden kaynaklanabilir{Yavas, 2021 #72}. Artan bir tabaka kalınlığının, uyumlu bir yapışkan tabaka içindeki plastik iş dağılımını arttırdığı ve bunun da etkin bir şekilde iyileştirilmiş mukavemete yol açtığı benzer çalışmalarda dile getirilmiştir{Kin Loch, 1981 #75;Chai, 1993 #73;Groleau, 1996 #74}. Benzer şekilde, karbon elyaf takviyeli kompozitler arasındaki termoplastik keçe katmanları, plastik deformasyon seviyesini kontrol ederek ILSS'yi etkilediği varsayılabilir. Deneysel gözlemler bu hipotezi güçlü bir şekilde desteklemektedir. Örneğin, istifleme sırası K8/2-2 PI ince tabaka kalınlığı nedeniyle karbon elyaf/epoksi katmanlarında kırılma matris çatlaması ile neredeyse hiç plastisite sergilemedi. Bununla birlikte, istifleme sırası K8/7 PEEK ve K8/7 PI daha büyük katman kalınlığının bir sonucu kırılma mukavemeti ve tokluğuna bağlı olarak ILSS'yi artırmıştır.

Üç Nokta Eğilme Analizleri

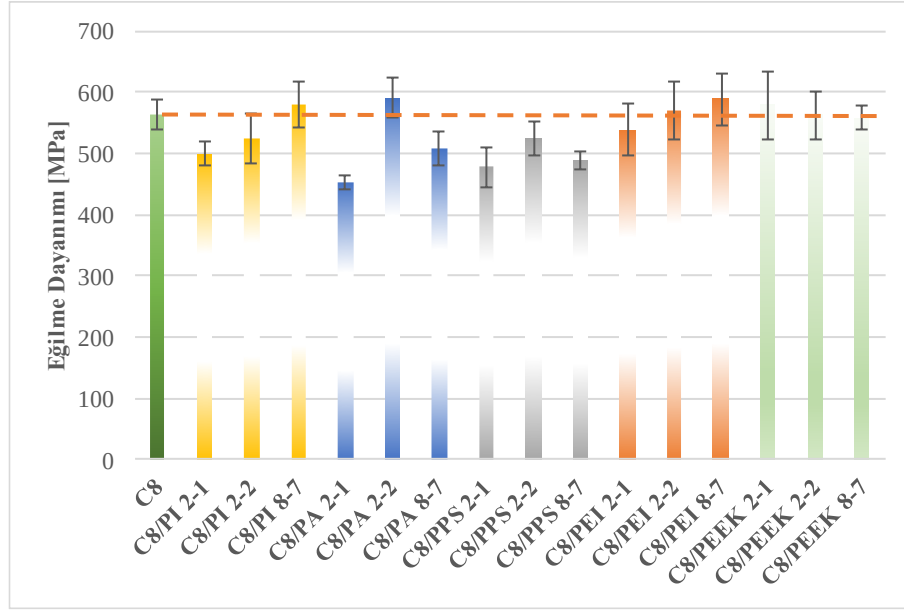
Üç nokta eğilme testi sonuçları, termoplastik keçe katmanlı cam elyaf takviyeli kompozitler için Tablo 11'de, termoplastik keçe katmanlı karbon elyaf takviyeli kompozitler için ise Tablo 12'de sunulmuştur.

Tablo 11. Termoplastik Keçe Katmanlı Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları

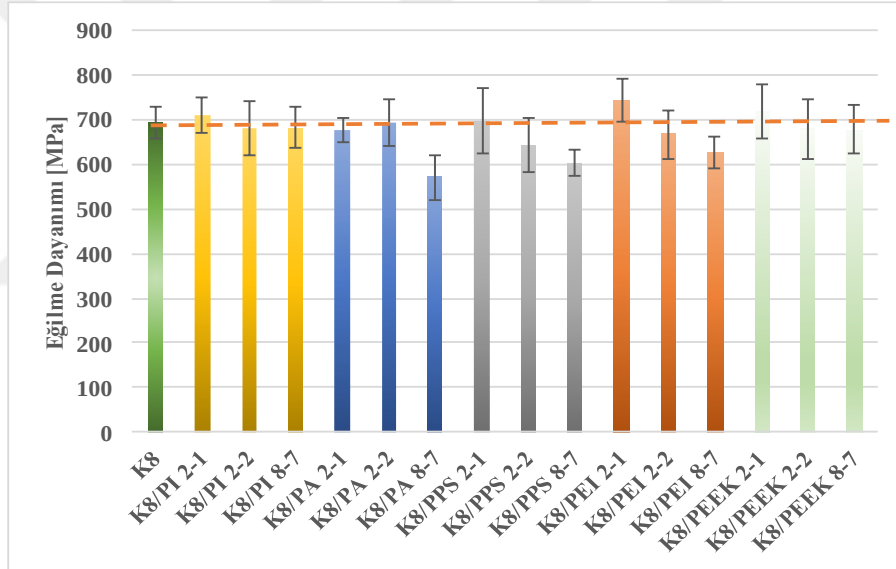
Numune Adı	Kumaş Türü	Tabaka Yerleşimi	Eğilme Dayanımı (MPa)
C8	Cam	8	562,780
C8/7 PI	PI Keçe	8/7	580,156
C8/7 PPS	PPS Keçe	8/7	487,621
C8/7 PEEK	PEEK Keçe	8/7	557,754
C8/7 PA	PA Keçe	8/7	506,934
C8/7 PEI	PEI Keçe	8/7	587,930
C8/2-2 PI	PI Keçe	8/2 Merkez	524,792
C8/2-2 PPS	PPS Keçe	8/2 Merkez	525,708
C8/2-2 PEEK	PEEK Keçe	8/2 Merkez	563,141
C8/2-2 PA	PA Keçe	8/2 Merkez	590,681
C8/2-2 PEI	PEI Keçe	8/2 Merkez	569,955
C8/2-1 PI	PI Keçe	8/2 Yüzey	499,684
C8/2-1 PPS	PPS Keçe	8/2 Yüzey	478,202
C8/2-1 PEEK	PEEK Keçe	8/2 Yüzey	578,883
C8/2-1 PA	PA Keçe	8/2 Yüzey	452,797
C8/2-1 PEI	PEI Keçe	8/2 Yüzey	538,403

Tablo 12. Termoplastik Keçe Katmanlı Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları

Numune Adı	Kumaş Türü	Tabaka Yerleşimi	Eğilme Dayanımı (MPa)
K8	Karbon	8	692,758
K8/7 PI	PI Keçe	8/7	682,181
K8/7 PPS	PPS Keçe	8/7	602,894
K8/7 PEEK	PEEK Keçe	8/7	676,258
K8/7 PA	PA Keçe	8/7	570,136
K8/7 PEI	PEI Keçe	8/7	626,874
K8/2-2 PI	PI Keçe	8/2 Merkez	680,168
K8/2-2 PPS	PPS Keçe	8/2 Merkez	643,942
K8/2-2 PEEK	PEEK Keçe	8/2 Merkez	679,620
K8/2-2 PA	PA Keçe	8/2 Merkez	693,014
K8/2-2 PEI	PEI Keçe	8/2 Merkez	665,780
K8/2-1 PI	PI Keçe	8/2 Yüzey	709,668
K8/2-1 PPS	PPS Keçe	8/2 Yüzey	696,838
K8/2-1 PEEK	PEEK Keçe	8/2 Yüzey	718,382
K8/2-1 PA	PA Keçe	8/2 Yüzey	675,705
K8/2-1 PEI	PEI Keçe	8/2 Yüzey	742,389



Şekil 37. Termoplastik keçe katmanlı cam elyaf takviyeli kompozitlerin üç nokta eğilme testi sonuçlarının grafiği



Şekil 38. Termoplastik keçe katmanlı karbon elyaf takviyeli kompozitlerin üç nokta eğilme testi sonuçlarının grafiği

Bu tez çalışmasında elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemelerin hasar mekanizmasının daha iyi anlaşılmasını geliştirmek için, eğilme özelliklerinin deneysel bir araştırması yapılmıştır. Termoplastik keçelerin cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlere ara katman olarak dahil edilmesi sonucunda oluşturulan bu yeni kompozit yapının eğilme dayanımının bilinmesi amacıyla üç nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 37 ve Şekil 38 analiz edildiğinde, cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit yapılara dahil edilen termoplastik keçelerin genel anlamda eğilme dayanımını azalttığı görülmektedir. Her iki elyaf takviyeli kompozitlerde yüzeye yerleştirilen PI, PPS, PEI ve PEEK keçeler eğilme dayanımını olumlu etkilerken diğer hemen bütün şartlarda konumlandırılan

keçelerin eğilme dayanımını olumsuz etkilediği görülmektedir. Bu durum kalınlığın artması gibi bazı etkenlerle alakalı olduğu literatürde de bahsedilmektedir (Beylergil et al., 2018, 2020; de Souza & Tarpani, 2021; Nash et al., 2016).

Düşük Hızlı Darbe (LVI) Analizleri

Bu tez çalışmasında, çeşitli termoplastik örtü ara yapraklarının karbon /epoksi kompozitler için LVI tepkileri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla 25,2 J darbe enerjisi altında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Düşük hızlı darbe testi sonrası elde edilen sonuçlara ait veriler Tablo 13 ve Tablo 14'te gösterilmiştir.

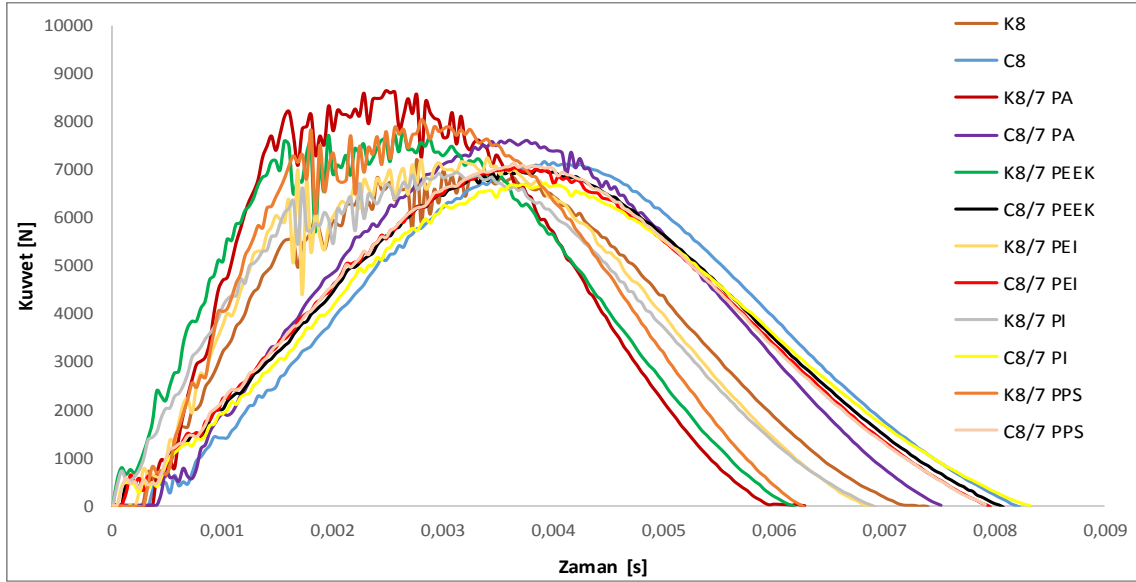
Tablo 13. Termoplastik Keçe Katmanlı Karbon ve Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Testi Sonrası Elde Edilen Sonuçlar

Numune Adı	Toplam Impulse (N.s)	Tepe Deplasman (m)	Absorbe Edilen Enerji (J)	İade edilen enerji (J)
K8	4470,97	0,0066	13,8500	11,3490
C8	5857,01	0,0083	9,9207	15,2783
K8/7 PA	3512,31	0,0052	14,3913	10,8077
C8/7 PA	5301,87	0,0074	10,0807	15,1183
K8/7 PEEK	3880,00	0,0057	14,1090	11,0900
C8/7 PEEK	5754,87	0,0080	9,9760	15,2230
K8/7 PEI	4195,40	0,0062	14,1420	11,0570
C8/7 PEI	5914,64	0,0084	10,2430	14,9560
K8/7 PI	4193,38	0,0061	14,0347	11,1643
C8/7 PI	5731,91	0,0079	10,0863	15,1127
K8/7 PPS	3879,28	0,0058	13,8813	11,3177
C8/7 PPS	5523,37	0,0077	9,7390	15,4600

Tablo 14. Termoplastik Keçe Katmanlı Karbon ve Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Testi Sonrası Elde Edilen Sonuçlar

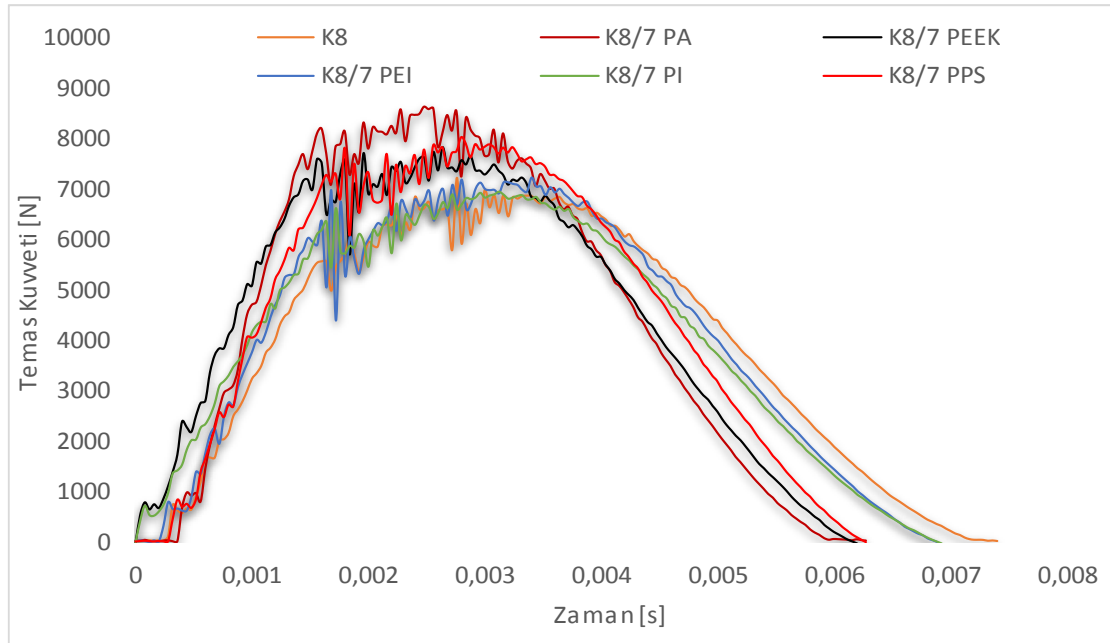
Numune Adı	Temas Rijitliği (N/s)	Eğilme Rijitliği (N/m)	Toplam Süre (s)	Tepe Kuvveti (N)
K8	3639197,9	1332938,8	0,007033	7077,29
C8	2139158,3	757138,8	0,008067	6902,06
K8/7 PA	6264419,5	2309041,5	0,005700	8682,92
C8/7 PA	2721671,6	971158,0	0,007367	7256,20
K8/7 PEEK	4789466,8	1782371,2	0,006333	7804,02
C8/7 PEEK	2180571,7	781000,5	0,008067	6770,18
K8/7 PEI	4163019,9	1541520,8	0,006833	7183,35
C8/7 PEI	2040687,2	727736,0	0,008300	6690,87
K8/7 PI	3958900,8	1469724,9	0,006733	7121,56
C8/7 PI	2186384,3	785419,8	0,008100	6713,00
K8/7 PPS	5115307,9	1841849,1	0,005967	8481,87
C8/7 PPS	2471187,7	883812,0	0,007633	7083,75

Bu bağlamda, 8 katlı cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozitleri için temas kuvveti-zaman eğrileri, toplam implus, tepe deplasman, etkileşim zamanı, tepe kuvveti, temas ve eğilme rijitliği ile absorbe edilen ve iade edilen enerji PA, PPS, PEEK, PEI ve PI keçelerin karbon ve cam / epoksi kompozitlerle karşılaştırılmış ve Şekil 39'da gösterilmiştir.

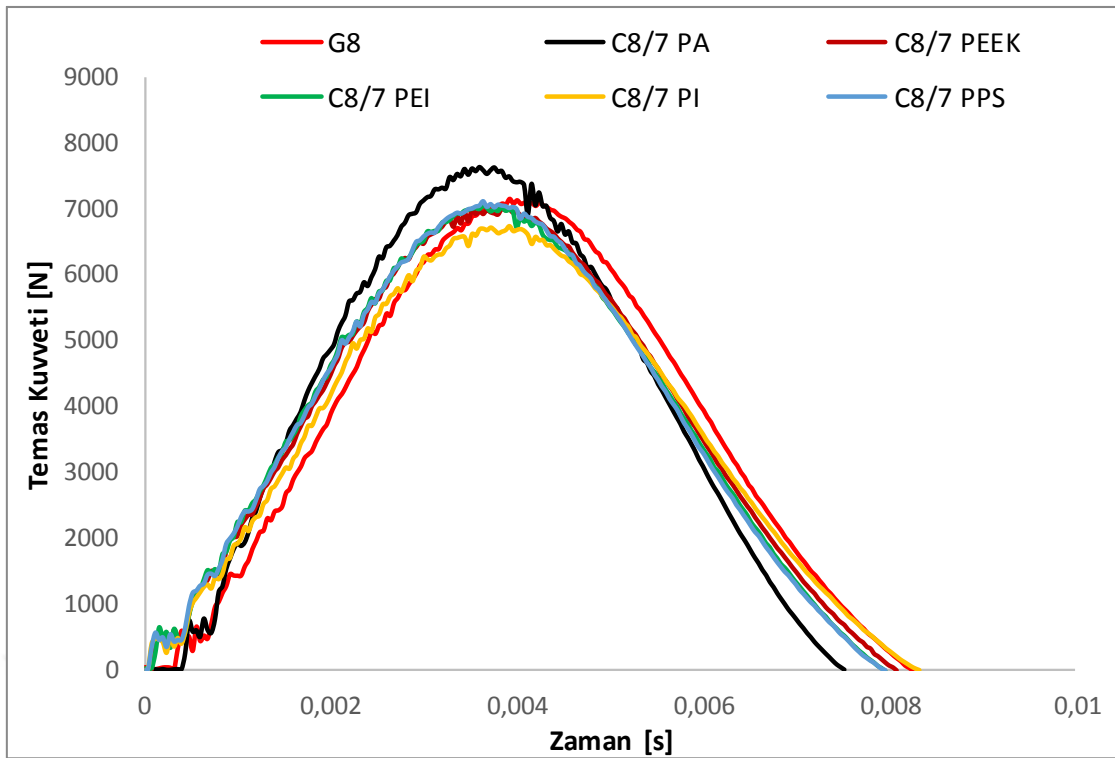


Şekil 39. Termoplastik keçelerine uygulanan darbe sonrası oluşan kuvvet/zaman eğrileri

Eğrilerdeki dalgalanmalar ve ani yük düşüşleri, hasar şiddetini değerlendirmek için kullanılabilir (Panettieri et al., 2016). Kuvvet-zaman eğrilerinden (Şekil 4.17), tüm konfigürasyonlar için örtü araları ile ani yük düşüşlerinin ve dalgalanmalarının daha belirgin hale geldiği ve özellikle PEEK ve PEI örtü araları için ani yük düşüşlerinin büyüklüğünün önemli ölçüde değiştiği açıkça görülmektedir.

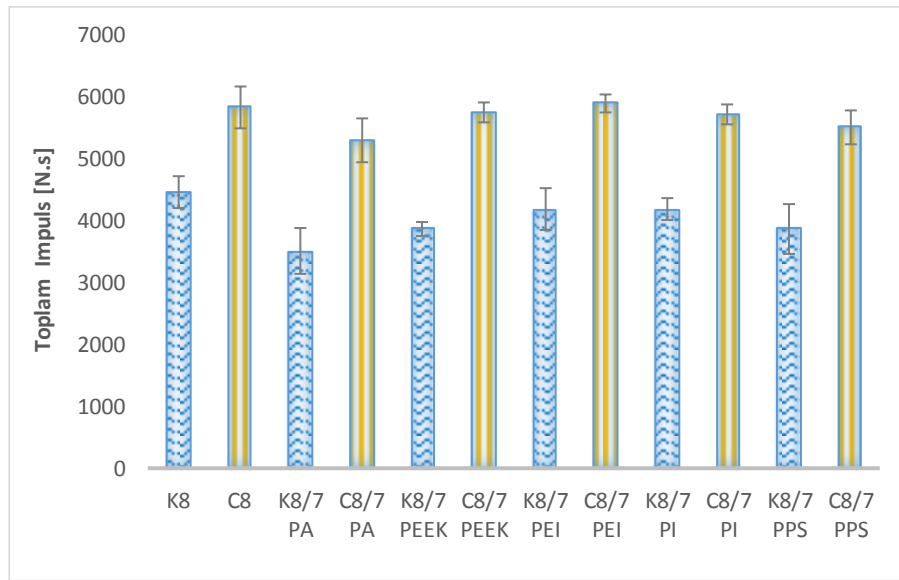


Şekil 40. Termoplastik keçe katmanlı karbon elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan temas kuvveti

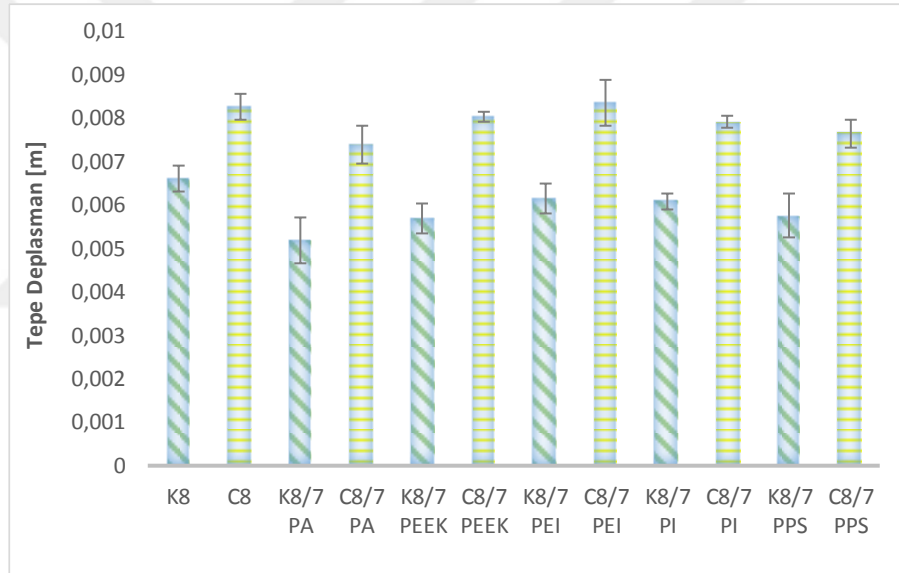


Şekil 41. Termoplastik keçe katmanlı cam elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan temas kuvveti

Şekil 40 ve Şekil 41 referans numunesi (K8-C8), PA, PPS, PEEK, PEI ve PI termoplastik örtülerin karbon elyaf ve cam elyaf takviyeli kompozitleri için LVI yanıtları üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalarını göstermektedir. Elde edilen sonuçlardan, termoplastik keçe katmanlarının temas sertliği ve dolayısıyla kompozit numunelerin tepe kuvvetleri üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Termoplastik keçe katmanlarının temas ve tepe kuvvetlerini arttırdığı gözlenmiştir. PEI örtülerle serpiştirilmiş karbon / epoksi kompozitler için minimum temas sertliği ve tepe kuvvetleri gözlenirken, sırasıyla PA, PPS, PEEK ve PI örtülerle serpiştirilmiş kompozitler için daha yüksek olanlar belirlendi. Lakin cam elyaf takvieli kompozitlerde bu durumun aynı olmadığı görülmektedir. Çünkü termoplastik PA keçe, sertliği artıtken diğer keçe katmanları sertliği azalttığı gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar, termoplastik keçelerin lif-matris etkileşimini güçlendirmesi ve genel olarak laminatlar için delaminasyon direncini arttırması gerçeğine bağlanmıştır (Ramji et al., 2021). Böylece keçenin ara katman olarak dahil edilmesi, kompozitlerinin temas sertliği kazanmasına neden olur. Buna dayanarak, karbon elyaf takviyeli kompozitler için PEI, cam elyaf takviyeli kompozitler için ise PA hariç diğerlerinin lif-matris etkileşimleri üzerinde dikkate değer bir etkisi olmadığı görülürken, delaminasyon direncinin iyileştirilmesi açısından PA ara katman her iki elyaf türü için en etkili örtü tipi olduğu söylenebilir.



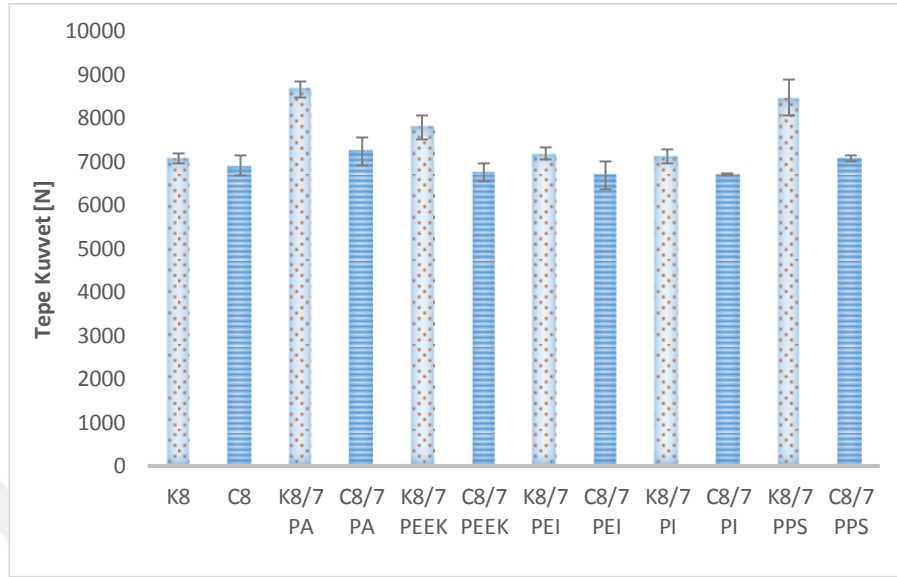
Şekil 42. Termoplastik keçe katmanlı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan toplam implus



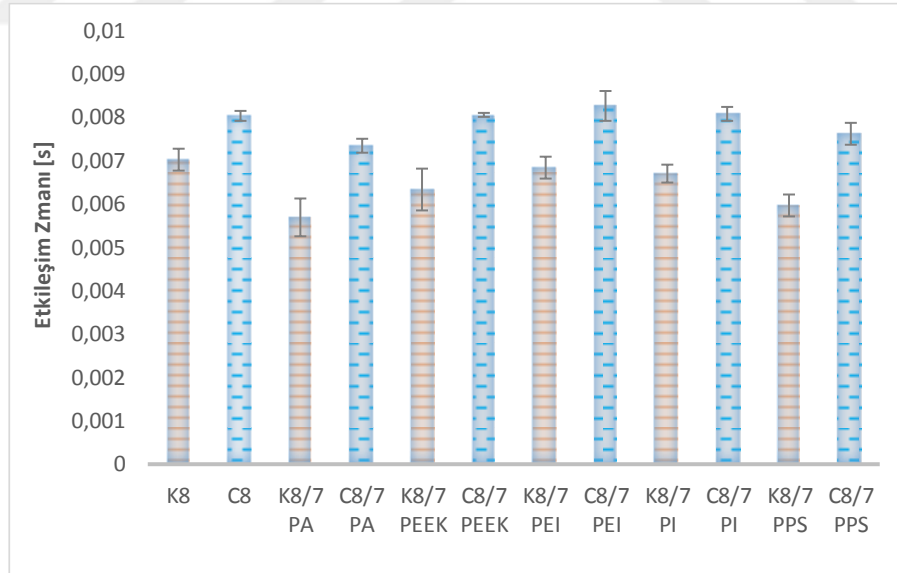
Şekil 43. Termoplastik keçe katmanlı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan toplam deplasman

Tepe deplasman, toplam implus ve etkileşim sürelerine göre tepe kuvveti, temas sertliği ve bükülme sertliği tepkileri için ters eğilim gözlemlendi. Bu aynı zamanda bekleniyordu çünkü her türlü termoplastik keçe katmanları, numune sertliğinde bir artışa neden oldu ve bu tepkiler genellikle artan sertlikle artar. Örneğin, kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin eğimi olarak tanımlanabilen bükülme sertliğinin {Gemi, 2018 #76} tüm konfigürasyonlar için termoplastik keçe katmanları sayesinde önemli ölçüde etkilendiği açıkça görülmektedir. PA keçe katmanları, bükülme sertliğinde yaklaşık % 73,23'lük bir artışa neden olurken, 8 kat karbon elyaf takviyeli

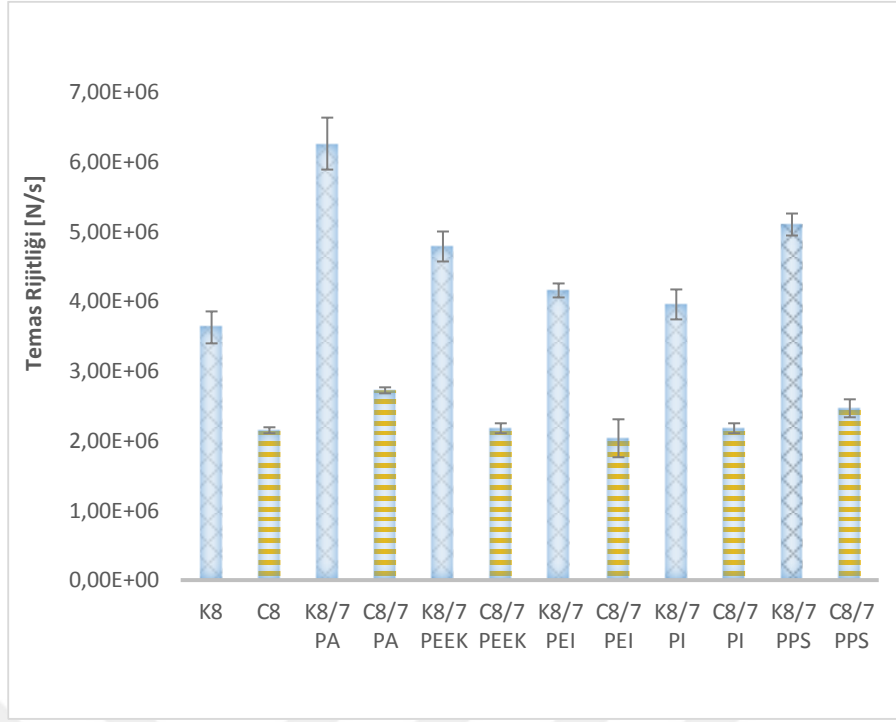
kompozit için minimum bükülme sertliği gözlemlendi. Benzer şekilde maksimum ve minimum temas rijitliği 6264.4 ve 3639.2 kN/s olarak gözlemlenmiş ve PA keçeleri sayesinde temas rijitliğinde yaklaşık %72.14 artış elde edilmiştir.



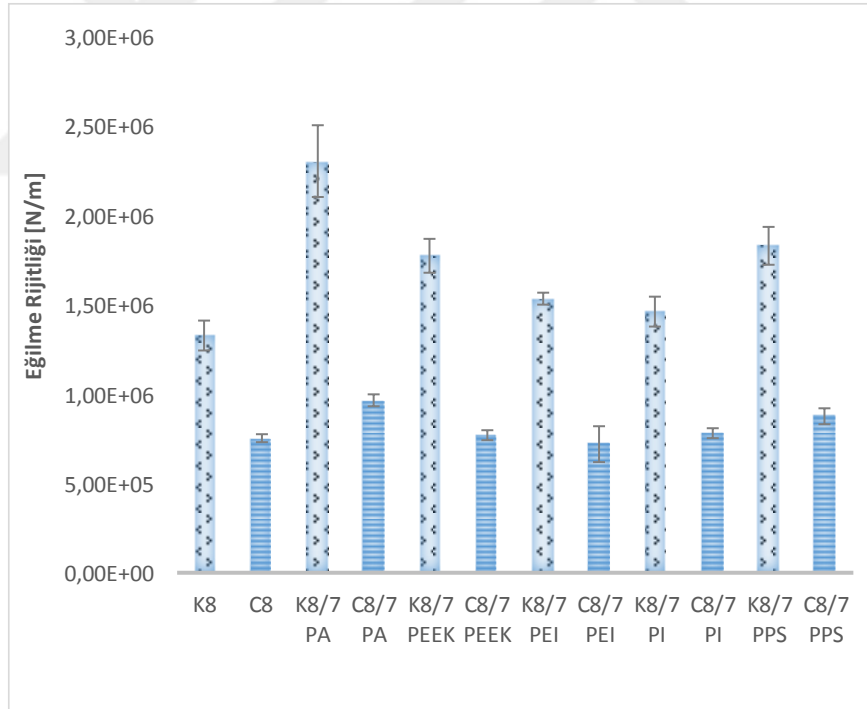
Şekil 44. Termoplastik keçe katmanlı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan tepe kuvveti



Şekil 45. Termoplastik keçe katmanlı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan etkileşim zamanı



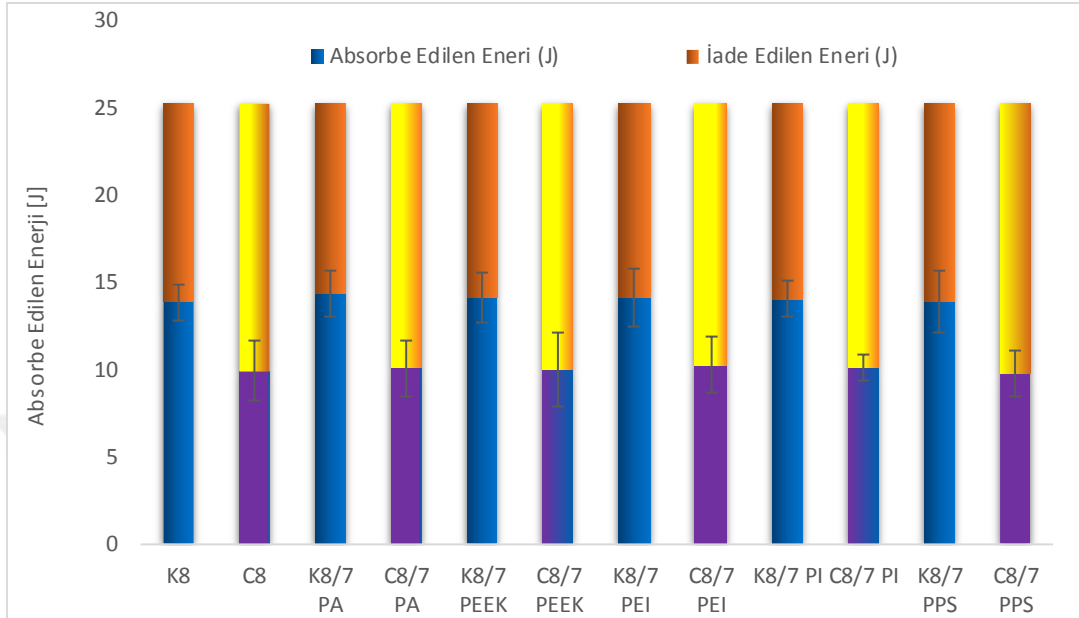
Şekil 46. Termoplastik keçe katmanlı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan temas rijitliği



Şekil 47. Termoplastik keçe katmanlı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası oluşan eğilme rijitliği

Şekil 42-47, kompozit numuneler için toplam implus, tepe deplasmanı, etkileşim süresi, tepe kuvvetleri, temas sertliği ve bükülme sertliği gibi LVI tepkilerini göstermektedir. Bu çalışmada, tüm konfigürasyonlar için en az üç örnek LVI testlerine tabi tutulmuş ve sonuçların güvenilir ve tekrarlanabilir olup olmadığını belirlemek için standart sapmalar hesaplanmıştır. Bu kapsamda standart sapmaların makul, deneysel sonuçların güvenilir ve tekrarlanabilir

olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, toplam implus, tepe deplasman ve etkileşim sürelerinin benzer eğilimler sergilediği açıkça görülmektedir. Bu üç davranışın tümü için, karbon elyaf takviyeli kompozitlerin referansı için maksimum tepkiler elde edilirken, PA örtüleri ile serpiştirilmiş kompozitler için minimum tepkiler gözlemlendi.



Şekil 48. Termoplastik keçe katmanlı karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası absorbe edilen ve iade edilen enerji

Karbon elyaf ve cam elyaf takviyeli kompozitlerin referansı (K8-C8) için enerji değişimleri, termoplastik keçe katmanlı karbon-cam/epoksi kompozitlerle karşılaştırıldı ve Şekil 48'de gösterilmiştir. Burada emilen enerji, kompozitlere uygulanan maksimum darbe enerjisi ile çarpıcıya aktarılan artık enerji arasındaki fark olarak tanımlanır ve temas kuvveti-zaman eğrileri altındaki alandan hesaplanabilir. Tüm konfigürasyonlar için termoplastik keçe katmanlı karbon elyaf takviyeli kompozitler enerjilerin % 50'sinden fazlasını absorbe ettikleri görülmektedir. Fakat termoplastik keçe katmanlı cam takviyeli kompozitlerde ise bu durum tam tersi olarak gözükmemektedir. Dolayısıyla, termoplastik keçe katmanlı karbon elyaf kompozitlerin, yüksek darbe direncinin gerekli olduğu uygulama alanları için uygun olduğu, termoplastik keçe katmanlı cam elyaf kompozitlerin uygun olmadığı açıktır. Ek olarak, termoplastik keçelerin genellikle emilen enerjiyi arttırdığı sonucuna varılmıştır.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında termoplastik keçe katmanlı karbon ve cam elyaf takviyeli tabakalı kompozit yapılarda, oluşturulan yeni kompozit yapıların kullanım amaçlarına yönelik üstün taraflarını belirleyebilmek ve üretim tasarımı elyaf kumaş türleri ile en iyi uyum sağladıkları termoplastik keçe katmanlarını tespit edebilmek için deneysel analizler yapılmıştır. Hem elyafları hem de keçelerin karşılaştırılması bakımından önem arz eden, eşit alan yoğunluktaki (500g/m^2) ve aynı örgü türlerine sahip karbon ve cam elyaflar, özel sipariş olarak temin edilmiştir. Ayrıca ara katman olarak kullanılacak olan farklı alan yoğunluklarındaki (PEI keçe 10 g/m^2 , PPS keçe 20 g/m^2 , PI keçe 8 g/m^2 , PA keçe 10g/m^2 ve PEEK keçe 10g/m^2) termoplastik keçeler yurtdışından özel sipariş olarak temin edilmiştir. Üretimlerin tamamı güvenilirliğini ispatlamış olan VARTM cihazında yapılmıştır. Üretilen plakalar tekrarlanabilirlik ve güven açısından ikişer adet üretilmiştir. İlgili ASTM standartlarına göre üretimi yapılan plakalardan CNC-Router cihazı ile ILSS, üç nokta eğilme, LVI ve titreşim numuneleri kesilmiştir. Mekanik analizler (ILSS, LVI ve üç nokta eğilme) ve dinamik analizler (titreşim karakteristiği) sonunda elde edilen verilerin grafikleri çizilerek değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, termoplastik keçelerin hem kendi aralarında hemde ara katman olarak kullanıldıkları karbon ve cam elyaf takviyelerindeki alınan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

İnterlaminar kayma mukavemeti testlerinde, genel olarak kullanılan tüm termoplastik keçelerin kayma mukavemetini artırdığı gözlemlenmiştir. Ancak bu artış daha çok karbon elyaf takviyeli kompozitlerde olmuştur. En iyi artışlar, termoplastik keçelerin tüm katmanlara istiflenmiş halinde olduğu görülmektedir. Cam elyaf takviyeli kompozitlerde ise PA ve PPS keçe hariç diğer keçeler genel anlamda kayma mukavemetini iyileştirmiştir. Dolayısıyla kayma mukavemetinin önem arz ettiği kompozit yapılarda termoplastik keçelerin kullanılabileceği açıktır.

Üç nokta eğilme testlerinde, termoplastik keçe katmanlı kompozitlerin her iki elyaf türünde de eğilme dayanımını ya değiştirmede ya da azalttığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar, literatürdeki bazı çalışmalarla uyumlu olduğuna dikkat çekilmiştir.

Düşük hızlı darbe testlerinde, karbon elyaf kontrol numunesi (K8) termoplastik keçe katmanlı karbon / epoksi kompozitlerle karşılaştırıldı ve keçe katmanlarının dinamik özellikler üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu bulundu. Elde edilen sonuçlardan, termoplastik keçe katmanlı karbon / epoksi kompozitlerin, K8 kompozitten daha fazla temas sertliği sergilediği

bulunmuştur. Benzer şekilde örtü ara yapraklı kompozitler için eğilme rijitliğinde ve tepe kuvvetlerinde bir artış gözlenmiş ve bu sonuçlar yapıların PA, PPS, PEEK, PEI ve PI keçeler sayesinde sertlik kazanmalarına bağlanmıştır. keçe tiplerinin LVI yanıtları üzerindeki etkileri incelendiğinde, PA ve PEI ara katmanları için sırasıyla sonuçlarda maksimum ve minimum varyasyonlar gözlenmiş ve bu nedenle PA keçelerin LVI yanıtları üzerinde en etkili örtü tipleri olduğu bulunmuştur.

Titreşim testlerinde, ankastre-serbest sınır koşullarında yapılan deneysel çalışma sonuçlarında, her üç istifleme konumu ve tüm termoplastik keçelerin doğal frekansı artırdığı bulunmuştur. Bu durumun serbest-serbest sınır koşulları içinde aynı olduğu görülmüştür. Dolayısıyla termoplastik keçeler genel anlamda rijitliği artırmış buna bağlı olarak ta birkaç farklı konum ve keçe türü hariç diğer tüm varyanslarda sönüm oranında iyileşme görülmüştür.

Gelişmiş kompozit malzemelerin hem ekonomik açıdan hem de yapısal olarak daha verimli tasarlanabilmesi için ara katman dahil edilmesi oldukça önemlidir. Kompozit yapı kesme yüklerine maruz kalacaksa PA,PPS, PEI ve PEEK keçeler tercih edilmesi daha uygun olacaktır. Ayrıca çalışma koşulları gereği darbeye her an maruz kalabilecek kompozit yapılar için PA keçe katmanlı kompozit yapılar kullanılması mantıklı bir yaklaşım olacaktır. Dayanıklılık ve etkili kullanım ömrü açısından yapısal kısıtların dikkate alınarak, uygun kumaş türü ve uygun termoplastik keçe türünün doğru seçilmesi oldukça önemlidir. Ayrıca, bu çalışmada gerçekleştirilen sonuçlar, kompozit tasarım toplumu için oldukça değerli olacaktır ve bu da işçilik, malzeme ve araçlar açısından zamanı ve maliyeti azaltabilir.

KAYNAKLAR

- Aydin, M. R. (2019). *Comparative mechanical and dynamic analysis of interply and intraply hybrid composites* (Publication Number 600345) [PhD, Atatürk University]. Erzurum.
- Aydin, M. R., Acar, V., Cakir, F., Gündoğdu, Ö., & Akbulut, H. (2022). Comparative dynamic analysis of carbon, aramid and glass fiber reinforced interply and intraply hybrid composites. *Composite structures*, 291, 115595.
- Barbero, E. J. (2018). *INTRODUCTION TO Composite Materials Design* (Third ed.). CRC Press Taylor & Francis Group.
- Besergil, B. (2016). *Doğadan Teknolojiye kompozitler-temel ilkeler-test metodları*. Gazi Kitabevi.
- Beylergil, B., Tanoğlu, M., & Aktaş, E. (2017). Enhancement of interlaminar fracture toughness of carbon fiber–epoxy composites using polyamide- 6, 6 electrospun nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 134 (35), 45244.
- Beylergil, B., Tanoğlu, M., & Aktaş, E. (2018). Effect of polyamide-6, 6 (PA 66) nonwoven veils on the mechanical performance of carbon fiber/epoxy composites. *Composite Structures*, 194, 21-35.
- Beylergil, B., Tanoğlu, M., & Aktaş, E. (2020). Experimental and statistical analysis of carbon fiber/epoxy composites interleaved with nylon 6, 6 nonwoven fabric interlayers. *Journal of Composite Materials*, 54 (27), 4173-4184.
- Bunsell, A. R., Joannès, S., & Thionnet, A. (2021). *Fundamentals of fibre reinforced composite materials*. CRC Press.
- Caminero, M. A., Chacón, J. M., García-Moreno, I., & Reverte, J. M. (2018). Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Polymer Testing*, 68, 415-423. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.04.038>
- Chandra, R., Singh, S., & Gupta, K. (1999). Damping studies in fiber-reinforced composites—a review. *Composite Structures*, 46 (1), 41-51.
- Chawla, K. K. (2012). *Composite materials: science and engineering*. Springer Science & Business Media.
- Chen, D., Pi, C., Chen, M., He, L., Xia, F., & Peng, S. (2019). Amplitude- dependent damping properties of ramie fiber- reinforced thermoplastic composites with varying fiber content. *Polymer Composites*, 40 (7), 2681-2689.
- Cheng, C., Zhang, C., Zhou, J., Jiang, M., Sun, Z., Zhou, S., Liu, Y., Chen, Z., Xu, L., & Zhang, H. (2019). Improving the interlaminar toughness of the carbon fiber/epoxy composites via interleaved with polyethersulfone porous films. *Composites science and technology*, 183, 107827.
- Chung, D. (2001). Materials for vibration damping. *Journal of materials science*, 36 (24), 5733-5737.
- Cicala, G., Latteri, A., Mannino, S., Cozzo, G., Ognibene, G., & Recca, A. (2014). Thermoplastic veils as advanced modifiers for multifunctional fiber reinforced composites. AIP Conference Proceedings,

- Collings, T. (1974). Transverse compressive behaviour of unidirectional carbon fibre reinforced plastics. *Composites*, 5 (3), 108-116.
- de Souza, G., & Tarpani, J. R. (2021). Interleaving CFRP and GFRP with a Thermoplastic Ionomer: The Effect on Bending Properties. *Applied Composite Materials*, 28 (2), 559-572.
- Del Saz- Orozco, B., Ray, D., & Stanley, W. F. (2017). Effect of thermoplastic veils on interlaminar fracture toughness of a glass fiber/vinyl ester composite. *Polymer Composites*, 38 (11), 2501-2508.
- Di Landro, L., & Lorenzi, W. (2009). Static and dynamic properties of thermoplastic matrix/natural fiber composites. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 3 (3), 238-244.
- Dirand, X., Hilaire, B., Soulier, J., & Nardin, M. (1996). Interfacial shear strength in glass-fiber/vinylester-resin composites. *Composites science and technology*, 56 (5), 533-539.
- Duan, Y., Li, J., Zhong, W., Maguire, R. G., Zhao, G., Xie, H., Li, D., & Lu, B. (2012). Effects of compaction and UV exposure on performance of acrylate/glass- fiber composites cured layer by layer. *Journal of Applied Polymer Science*, 123 (6), 3799-3805.
- Duc, F., Bourban, P.-E., Plummer, C., & Manson, J.-A. (2014). Damping of thermoset and thermoplastic flax fibre composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 64, 115-123.
- Ensinger. (2022, Aralık 4). *Yüksek Performanslı Plastikler*. <https://www.ensingerplastics.com/tr-tr>
- Ersoy, H. Y. (2001). *Kompozit Malzeme* (S. Özkal, Ed.). Literatür Yayınları.
- Etaati, A., Mehdizadeh, S. A., Wang, H., & Pather, S. (2014). Vibration damping characteristics of short hemp fibre thermoplastic composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33 (4), 330-341.
- Finegan, I. C., & Gibson, R. F. (1999). Recent research on enhancement of damping in polymer composites. *Composite structures*, 44 (2-3), 89-98.
- Folsom, C. A., Zok, F. W., & Lange, F. F. (1994). Flexural properties of brittle multilayer materials: II, experiments. *Journal of the American Ceramic Society*, 77 (8), 2081-2087.
- Fu, W., & Chung, D. (2001). Vibration reduction ability of polymers, particularly polymethylmethacrylate and polytetrafluoroethylene. In: SAGE Publications Sage UK: London, England.
- Fu, Z.-F., & He, J. (2001). *Modal analysis*. Elsevier.
- GangaRao, H. V., & Prachasaree, W. (2021). *FRP composite structures: theory, fundamentals, and design*. CRC Press.
- Gassan, J., & Bledzki, A. (2000). Possibilities to improve the properties of natural fiber reinforced plastics by fiber modification—Jute polypropylene composites—. *Applied Composite Materials*, 7 (5), 373-385.
- Haldar, A. K., Aggarwal, I., & Batra, N. (2010). Damping behavior of discontinuous fiber reinforced thermoplastic composites. *AIP Conference Proceedings*,
- Haldar, A. K., Singh, S., & Prince. (2011). Vibration characteristics of thermoplastic composite. *AIP conference proceedings*,

- Khalid, M. Y., Arif, Z. U., Al Rashid, A., Shahid, M. I., Ahmed, W., Tariq, A. F., & Abbas, Z. (2021). Interlaminar shear strength (ILSS) characterization of fiber metal laminates (FMLs) manufactured through VARTM process. *Forces in Mechanics*, 4, 100038.
- Khan, S. U., & Kim, J.-K. (2012). Improved interlaminar shear properties of multiscale carbon fiber composites with bucky paper interleaves made from carbon nanofibers. *Carbon*, 50 (14), 5265-5277. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.07.011>
- Larson, E. R. (2015). *Thermoplastic material selection: a practical guide*. William Andrew.
- Lee, H., & Neville, K. (1967). Handbook of epoxy resins.
- Li, D. (2022). *Analysis of Composite Laminates: Theories and Their Applications*. Elsevier.
- Nash, N., Young, T., & Stanley, W. (2016). The reversibility of Mode-I and-II interlaminar fracture toughness after hydrothermal aging of Carbon/Benzoxazine composites with a thermoplastic toughening interlayer. *Composite Structures*, 152, 558-567.
- Nisini, E., Santulli, C., & Liverani, A. (2017). Mechanical and impact characterization of hybrid composite laminates with carbon, basalt and flax fibres. *Composites Part B: Engineering*, 127, 92-99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.071>
- Ou, Y., González, C., & Vilatela, J. J. (2020). Understanding interlaminar toughening of unidirectional CFRP laminates with carbon nanotube veils. *Composites Part B: Engineering*, 201, 108372.
- Panettieri, E., Fanteria, D., Montemurro, M., & Froustey, C. (2016). Low-velocity impact tests on carbon/epoxy composite laminates: A benchmark study. *Composites Part B: Engineering*, 107, 9-21.
- Quan, D., Alderliesten, R., Dransfeld, C., Murphy, N., Ivanković, A., & Benedictus, R. (2020). Enhancing the fracture toughness of carbon fibre/epoxy composites by interleaving hybrid meltable/non-meltable thermoplastic veils. *Composite structures*, 252, 112699.
- Quan, D., Flynn, S., Artuso, M., Murphy, N., Rouge, C., & Ivanković, A. (2019). Interlaminar fracture toughness of CFRPs interleaved with stainless steel fibres. *Composite structures*, 210, 49-56.
- Quan, D., Murphy, N., Ivanković, A., Zhao, G., & Alderliesten, R. (2022). Fatigue delamination behaviour of carbon fibre/epoxy composites interleaved with thermoplastic veils. *Composite structures*, 281, 114903.
- Rahman, M., Zainuddin, S., Hosur, M., Robertson, C., Kumar, A., Trovillion, J., & Jeelani, S. (2013). Effect of NH₂-MWCNTs on crosslink density of epoxy matrix and ILSS properties of e-glass/epoxy composites. *Composite Structures*, 95, 213-221.
- Ramji, A., Xu, Y., Grasso, M., Yasaee, M., & Webb, P. (2021). Effect of interfacial fibre orientation and PPS veil density on delamination resistance of 5HS woven CFRP laminates under mode II loading. *Composites science and technology*, 207, 108735.
- Rezaei, F., Yunus, R., & Ibrahim, N. (2009). Effect of fiber length on thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polypropylene composites. *Materials & Design*, 30 (2), 260-263.
- Sahin, Y. (2000). *Kompozit Malzemelere Giriş*. Gazi Kitabevi.
- Sahu, N. P., Khande, D. K., Patel, G. C., Bohidar, S., & Sen, P. (2014). Study on aramid fibre and comparison with other composite materials. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 1 (7), 303-306.
- Schwartz, M. M. (1983). Composite materials handbook.

- Singh, K. K., Rawat, P., & Rai, A. K. (2016). Mechanical characterization of GFRP laminate reinforced with short carbon fiber fillers under ILSS test and 3-point bend test. *ARPJN journal of Engineering and Applied Sciences*, 11, 16.
- Subramanian, C., Deshpande, S. B., & Senthilvelan, S. (2011). Effect of reinforced fiber length on the damping performance of thermoplastic composites. *Advanced Composite Materials*, 20 (4), 319-335.
- Tserpes, K., Tzatzadakis, V., & Katsiropoulos, C. (2019). Effect of hygrothermal ageing on the interlaminar shear strength of carbon fiber-reinforced rosin-based epoxy bio-composites. *Composite Structures*, 226, 111211.
- Yang, W., Noda, T., Araki, H., Yu, J., & Kohyama, A. (2003). Mechanical properties of several advanced Tyranno-SA fiber-reinforced CVI-SiC matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 345 (1), 28-35. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00468-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00468-9)
- Zhou, H., Du, X., Liu, H.-Y., Zhou, H., Zhang, Y., & Mai, Y.-W. (2017). Delamination toughening of carbon fiber/epoxy laminates by hierarchical carbon nanotube-short carbon fiber interleaves. *Composites science and technology*, 140, 46-53.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Yavuz Selim TARIH
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Medeni Hali:	
Uyruğu:	
Adres:	
Faks:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erzurum Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Teorisi ve Dinamiği Anabilim Dalı (2015)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Teorisi ve Dinamiği Anabilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	orta
Almanca:	-
Rusça:	-
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Makine Mühendisleri Odası	
İlgi Alanları ve Hobiler	
Futbol, Masa Tenisi Doğa ve kültürel geziler	