

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**DOĞAL YAŞLANDIRMA KOŞULLARININ DOKUNMUŞ ARAMİD VE
KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN DİNAMİK
DAVRANIŞINA ETKİSİ**

Ali İhsan KAYA

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2019**

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**DOĞAL YAŞLANDIRMA KOŞULLARININ DOKUNMUŞ ARAMİD VE
KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN DİNAMİK
DAVRANIŞINA ETKİSİ**

Ali İhsan KAYA

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2019**

Prof. Dr. Murat KISA danışmanlığında, Ali İhsan KAYA'nın hazırladığı **“Doğal Yaşlandırma Koşullarının Dokunmuş Aramid ve Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Dinamik Davranışına Etkisi”** konulu bu çalışma 25/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman: Prof. Dr. Murat KISA

.....

Üye : Prof. Dr. M. Arif GÜREL

.....

Üye : Prof. Dr. Hamit AKBULUT

.....

Üye : Doç. Dr. Mustafa ÖZEN

.....

Üye : Doç. Dr. Yusuf ARMAN

.....

Bu Tezin Makine Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Prof. Dr. İrfan ÖZBERK
Enstitü Müdürü

Bu Çalışma Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Kurulu (HÜBAK) Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: 14133

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

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
2.1. Elyaf Türleri	5
2.2. Matris Türleri	6
2.3. Elyaf/Matris Arafazı/Arayüzü	7
2.4. Çevresel Koşullar	8
2.5. Çevresel Performans Değerlendirmesi için Uygulanan Deneysel Teknikler	11
2.6. Yaşlandırma Mekanizmaları	13
2.7. Çevresel Şartlandırmanın Elyaflara Etkisi	14
2.8. Çevresel Şartlandırmanın Epoksi Matrislere Etkisi	16
2.9. Çevresel Şartlandırmanın Elyaf/Matris Arafazına Etkisi	20
2.10. Çevresel Şartlandırmanın Kompozit Yapılara Etkisi	23
2.11. Çevresel Şartlandırmanın Kompozitlerin Dinamik Özelliklerine Etkisi	32
2.12. Yaşlandırılmış Kompozitlerin Literatürü için Sonuç Tespitleri	36
3. MATERYAL VE YÖNTEM	41
3.1 Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Tekniği ile Kompozit Plakaların Üretimi	41
3.2 Kompozit Plakaların Kesilmesi	48
3.3 Çekme Deneyi	50
3.4 Titreşim Deneyi ve Ekipmanları	55
3.4.1 Veri toplama cihazı	59
3.4.2 İvmemetreler	60
3.4.3 Darbe çekici	62
3.4.4 Matlab program bilgileri	64
3.4.5 Titreşim testleri	66
3.5 Ansys Programında Modelleme	68
3.6 Numunelerin Çevresel Yaşlandırmaya Bırakılması	74
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	77
4.1 Deneysel ve Nümerik Verilerin Karşılaştırılması	78
4.2 Yaşlandırılmış Dokunmuş Aramid Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Doğal Frekans Değişimi ..	81
4.3 Yaşlandırılmış Dokunmuş Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Doğal Frekans Değişimi ..	98
4.4 Yaşlandırılmış Dokunmuş Aramid Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Sönümlenme Oranı	
Değişimi	115
4.5 Yaşlandırılmış Dokunmuş Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Sönümlenme Oranı	
Değişimi	121
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	128
5.1 Sonuçlar	128
5.2 Öneriler	131
KAYNAKLAR	132
ÖZGEÇMİŞ	147
EKLER	150
EK 1 Titreşim analiz sonuçları	150
EK 2 Matlab programı	166
EK 3 Toprak ve su analizi sonuçları	179

ÖZET

Doktora Tezi

DOĞAL YAŞLANDIRMA KOŞULLARININ DOKUNMUŞ ARAMİD VE KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ

Ali İhsan KAYA

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat KISA
Yıl: 2019, Sayfa: 179

Bu çalışmada, dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin doğal yaşlandırma koşullarına bağlı olarak dinamik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Kompozit plakalar vakum destekli reçine infüzyon tekniği kullanılarak üretilmiş ve ilgili analize göre kesimi yapılarak kirişler elde edilmiştir. Kompozit kirişlerin çekme testleri ASTM D3039 standardına göre gerçekleştirilmiş ve titreşim analizleri yapılmıştır. Titreşim analiz verileri Matlab yazılımında hazırlanan bir program yoluyla işlenmiştir. DeneySEL veriler, nümerik olarak ANSYS yazılımında elde edilen sonuçlar ile uyum içerisinde. Daha sonra kompozit kirişler; nem, sıcaklık ve bu ikisinin kombine etkisi altında birbirinden farklı üç doğal çevresel koşullarda bir yıl boyunca yaşlandırılmıştır. Kompozit kirişlerin titreşim analizi her üç ayda bir gerçekleştirilmiş ve dinamik özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Yapılan analiz sonuçları incelendiğinde en yıkıcı yaşlandırma koşulunun nem ve sıcaklığın kombine etkisi durumunda olduğu gözlenmiştir. Nemli ortamlarda yaşlandırma durumunda, aramid elyaf takviyeli kompozitlerin frekans ve sönüm özelliklerinde, karbon elyaf takviyeli kompozitlere göre sırasıyla daha düşük ve büyük aşınma/bozunma gerçekleşmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitler, VDRİT, dinamik analiz, doğal yaşlandırma

ABSTRACT

PhD Thesis

THE EFFECT OF NATURAL AGING CONDITIONS ON DYNAMIC BEHAVIOR OF WOVEN ARAMID AND CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITES

Ali İhsan KAYA

**Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Murat KISA
Year: 2019, Page: 179**

In this study, the changes in the dynamic properties of woven aramid and carbon fiber reinforced composites depending on natural aging conditions had been investigated. Composite plates were produced by using vacuum assisted resin infusion technique and plates were cut into beams according to related analysis to be studied. The tensile tests of composite beams were carried out in accordance with ASTM D3039 and vibration analysis was performed. The vibration analysis data was processed through a program prepared in Matlab software. The experimental data were in agreement with the numerical results obtained from ANSYS software. Then composite beams; were aged for one year under three different natural environmental conditions, humidity, temperature and the combined effect of them. The vibration analysis of composite beams was carried out every three months and the change of dynamic properties was investigated. It was observed that the most destructive aging condition was the combined effect of humidity and temperature exposing condition when the analysis results are analyzed. The frequencies and damping properties degradation of woven aramid fiber reinforced composites was found to be more and less than woven carbon fiber reinforced composites respectively in the case of aging in humid environments.

KEY WORDS: Aramid and carbon fiber reinforced composites, VARIM, dynamic analysis, natural aging

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında bana yol gösteren ve çalışma azmi konusunda örnek aldığım danışmanım Prof. Dr. Murat KISA'ya, tezin akademik önemini artırma konusunda bilgi, eleştiri ve tavsiyelerini sakınmayan bu çalışmanın Tez İzleme Komisyonu üyeleri Prof. Dr. M. Arif GÜREL ve Doç. Dr. Mustafa ÖZEN'e, çalışmanın dinamik analizleri ve Matlab analiz programı hususunda yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Hasan ÖZTÜRK ve Prof. Dr. Zeki KIRAL hocalarıma, kompozit malzemeler ile ilgili olarak akademik bilgi ve tecrübesini paylaşmaktan imtina etmeyen Doç. Dr. Yusuf ARMAN'a ve manevi desteklerini benden esirgemeyen eşime ve aileme teşekkürlerimi sunarım.



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Release (ayırma) film kumaşı ve sızdırmazlığın sağlanması ve 5 kat dokunmuş karbon elyaf kumaşının release film üzerine serilmiş hali.....	44
Şekil 3.2. Karbon elyafların üzerine soyma kumaşının serilmesi, İnfüzyon filesinin elyaflar üzerine serilmesi, spiral hortum ile T borularının vakum naylonundaki yerleşimi ve vakum işleminin uygulanması.....	44
Şekil 3.3. Reçinenin sisteme emdirilmesi ve tam olarak reçine emdirilmiş sistemin soğumaya terk edilmiş hali.....	46
Şekil 3.4. Kompozit plakanın soyma kumaşından ayrılması işlemi ve üretilen karbon elyaflı kompozit plaka.....	46
Şekil 3.5. Rubi DS-300 sulu testere kesim cihazı.....	49
Şekil 3.6. Kesilen kirişlerin boyut bilgileri (Z yönü: En, X yönü: Boy ve Y yönü: Kalınlık).....	49
Şekil 3.7. Kulakçık materyali gösterimi (Carlsson ve ark., 2014).....	49
Şekil 3.8. Dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin çekme deneyi.....	51
Şekil 3.9. Aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin çekme deneyi hasar durumu.	51
Şekil 3.10. Dokunmuş aramid kompozit çekme numuneleri için gerilme-gerinim grafiği.....	52
Şekil 3.11. Karbon kompozit çekme numuneleri için gerilme-gerinim grafiği.....	52
Şekil 3.12. Çekme testi 1. ve 2. dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit numuneleri için gerilme-gerinim değerleri.....	53
Şekil 3.13. Sırasıyla, 1. ve 2. dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit numuneleri için gerilme-gerinim değerleri.....	54
Şekil 3.14. Tek giriş ve çıkışlı bir sistem modeli.....	57
Şekil 3.15. Veri toplama cihazı.....	59
Şekil 3.16. Hafif seramik PCB 352A24 ivmemetre.....	60
Şekil 3.17. PCB 086C01 darbe çekici.....	62
Şekil 3.18. Aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlerin titreşim deney düzeneği.....	66
Şekil 3.19. İvmemetre noktaları ve tahrik noktası (Capozucca, 2014).....	67
Şekil 3.20. Ansys'te analiz türü seçimi.....	69
Şekil 3.21. Ansys'te element tipi seçimi.....	69
Şekil 3.22. Ansys'te materyal model seçimi.....	70
Şekil 3.23. Ansys'te yoğunluk girişi.....	70
Şekil 3.24. Kalınlık girişi.....	70
Şekil 3.25. Model oluşturma.....	71
Şekil 3.26. Mesh oluşturma.....	71
Şekil 3.27. Analiz tipi seçimi.....	72
Şekil 3.28. Analiz seçeneklerinin girilmesi.....	72
Şekil 3.29. Ankastre seçimi.....	73
Şekil 3.30. Çözümün gerçekleştirilmesi.....	73
Şekil 3.31. Güneş altında kuru ve güneş altında suda şartlandırma ile toprak altında 50 cm derinlike şartlandırma.....	76
Şekil 3.32. Yaşlandırma süresince aylara göre bağıl nem değişimi ile sıcaklık değişimi.....	76
Şekil 3.33. Yaşlandırma süresince güneş radyasyonu değişimi ve yağmur yağış miktarı.....	76
Şekil 4.1. Dokunmuş aramid kompozit kirişlerin ANSYS sonuçları: a) ilk mod, b) ikinci mod ve c) üçüncü mod.....	80
Şekil 4.2. Dokunmuş karbon kompozit kirişlerin ANSYS sonuçları.....	81
Şekil 4.3. Çekiç ile tahrik edilen 1 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	83
Şekil 4.4. Çekiç ile tahrik edilen 2 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	83
Şekil 4.5. Çekiç ile tahrik edilen 3 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	83
Şekil 4.6. Çekiç ile tahrik edilen 4 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	84

Şekil 4.7. Çekiç ile tahrik edilen 5 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	84
Şekil 4.8. El ile tahrik edilen 1 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	86
Şekil 4.9. El ile tahrik edilen 2 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	86
Şekil 4.10. El ile tahrik edilen 3 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	86
Şekil 4.11. El ile tahrik edilen 4 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	87
Şekil 4.12. El ile tahrik edilen 5 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	87
Şekil 4.13. Çekiç ile tahrik edilen dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerin yaşlandırma koşullarına göre değişimi.....	96
Şekil 4.14. El ile tahrik edilen dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerin yaşlandırma koşullarına göre değişimi.....	97
Şekil 4.15. Çekiç ile tahrik edilen 1 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	99
Şekil 4.16. Çekiç ile tahrik edilen 2 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	100
Şekil 4.17. Çekiç ile tahrik edilen 3 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	100
Şekil 4.18. Çekiç ile tahrik edilen 4 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	100
Şekil 4.19. Çekiç ile tahrik edilen 5 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	101
Şekil 4.20. El ile tahrik edilen 1 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	102
Şekil 4.21. El ile tahrik edilen 2 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	102
Şekil 4.22. El ile tahrik edilen 3 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	102
Şekil 4.23. El ile tahrik edilen 4 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	103
Şekil 4.24. El ile tahrik edilen 5 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı.....	103
Şekil 4.25. Çekiç ile tahrik edilen dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yaşlandırma koşullarına göre değişimi.....	112
Şekil 4.26. El ile tahrik edilen dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yaşlandırma koşullarına göre değişimi.....	113
Şekil 4.27. Dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit kirişlerin sönümlleme oranı için ardıl piklerin belirlenmesi.....	120
Şekil 4.28. Dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerin yaşlandırma koşullarına göre sönümlleme oranı değişimi.....	121
Şekil 4.29. Dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlerin sönümlleme oranı için ardıl piklerin belirlenmesi.....	122
Şekil 4.30. Dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yaşlandırma koşullarına göre sönümlleme oranı değişimi.....	123

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Dokunmuş karbon kompozit numunelerine ait ortalama elastisite modülü.....	53
Çizelge 3.2. Dokunmuş aramid kompozit numunelerine ait ortalama elastisite modülü.....	55
Çizelge 3.3. PCB 352A24 ivmemetrenin özellikleri.....	61
Çizelge 4.1. Dokunmuş aramid kompozit kirişlerin deneysel test sonuçları (Hz).....	78
Çizelge 4.2. Dokunmuş karbon kompozit kirişlerin deneysel test sonuçları (Hz).....	78
Çizelge 4.3. Dokunmuş aramid kompozit kirişlerin nümerik sonuçları.....	80
Çizelge 4.4. Dokunmuş karbon kompozit kirişlerin nümerik sonuçları.....	80
Çizelge 4.5. Çekiç ile tahrik edilen dokunmuş aramid elyaf takviyeli referans numunelerin frekans değerleri.....	84
Çizelge 4.6. El ile tahrik edilen dokunmuş aramid elyaf takviyeli referans numunelerin frekans değerleri.....	85
Çizelge 4.7. Çekiç ile tahrik edilen 3 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	88
Çizelge 4.8. Çekiç ile tahrik edilen 3 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	88
Çizelge 4.9. Çekiç ile tahrik edilen 3 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	88
Çizelge 4.10. El ile tahrik edilen 3 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	89
Çizelge 4.11. El ile tahrik edilen 3 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	89
Çizelge 4.12. El ile tahrik edilen 3 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	89
Çizelge 4.13. Çekiç ile tahrik edilen 6 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	90
Çizelge 4.14. Çekiç ile tahrik edilen 6 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	90
Çizelge 4.15. Çekiç ile tahrik edilen 6 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	90
Çizelge 4.16. El ile tahrik edilen 6 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	91
Çizelge 4.17. El ile tahrik edilen 6 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	91
Çizelge 4.18. El ile tahrik edilen 6 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	91
Çizelge 4.19. Çekiç ile tahrik edilen 9 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	91
Çizelge 4.20. Çekiç ile tahrik edilen 9 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	92
Çizelge 4.21. Çekiç ile tahrik edilen 9 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	92
Çizelge 4.22. El ile tahrik edilen 9 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	92
Çizelge 4.23. El ile tahrik edilen 9 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	93
Çizelge 4.24. El ile tahrik edilen 9 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	93
Çizelge 4.25. Çekiç ile tahrik edilen 12 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	93
Çizelge 4.26. Çekiç ile tahrik edilen 12 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	94
Çizelge 4.27. Çekiç ile tahrik edilen 12 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf	94

takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	
Çizelge 4.28. El ile tahrik edilen 12 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	94
Çizelge 4.29. El ile tahrik edilen 12 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	94
Çizelge 4.30. El ile tahrik edilen 12 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	95
Çizelge 4.31. Çekiş ile tahrik edilen dokunmuş karbon elyaf takviyeli referans kompozit kırımların frekans değerleri.....	101
Çizelge 4.32. El ile tahrik edilen dokunmuş karbon elyaf takviyeli referans numunelerin frekans değerleri.....	103
Çizelge 4.33. Çekiş ile tahrik edilen 3 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	104
Çizelge 4.34. Çekiş ile tahrik edilen 3 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	104
Çizelge 4.35. Çekiş ile tahrik edilen 3 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	104
Çizelge 4.36. El ile tahrik edilen 3 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	105
Çizelge 4.37. El ile tahrik edilen 3 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	105
Çizelge 4.38. El ile tahrik edilen 3 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	105
Çizelge 4.39. Çekiş ile tahrik edilen 6 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	106
Çizelge 4.40. Çekiş ile tahrik edilen 6 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	106
Çizelge 4.41. Çekiş ile tahrik edilen 6 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	106
Çizelge 4.42. El ile tahrik edilen 6 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	107
Çizelge 4.43. El ile tahrik edilen 6 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	107
Çizelge 4.44. El ile tahrik edilen 6 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	107
Çizelge 4.45. Çekiş ile tahrik edilen 9 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	108
Çizelge 4.46. Çekiş ile tahrik edilen 9 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	108
Çizelge 4.47. Çekiş ile tahrik edilen 9 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	108
Çizelge 4.48. El ile tahrik edilen 9 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	109
Çizelge 4.49. El ile tahrik edilen 9 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	109
Çizelge 4.50. El ile tahrik edilen 9 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	109
Çizelge 4.51. Çekiş ile tahrik edilen 12 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	110
Çizelge 4.52. Çekiş ile tahrik edilen 12 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	110
Çizelge 4.53. Çekiş ile tahrik edilen 12 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	110
Çizelge 4.54. El ile tahrik edilen 12 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	111
Çizelge 4.55. El ile tahrik edilen 12 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	111
Çizelge 4.56. El ile tahrik edilen 12 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	111

takviyeli numunelerin frekans değerleri.....	120
Çizelge 4.57. Dokunmuş aramid elyaf takviyeli 5 adet numunenin ortalama sönüm değerleri.....	120
Çizelge 4.58. Dokunmuş karbon elyaf takviyeli 5 adet numunenin ortalama sönüm değerleri.....	123
Çizelge 4.59. Çekiç ile tahrik edilen dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yaşlandırma koşullarına göre frekans ve sönümleme oranı değişim karşılaştırılması.....	125



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

T_g	Camsı geçiş sıcaklığı
$\tan\delta$	Tanjant kaybı
E'	Başlangıç modülü
E''	Depolama modülü
$X(\omega)$	Yapısal cevap
$F(\omega)$	Tahrik kuvveti
ω	Doğal frekans
nfft	Fourier dönüşümü sinyal uzunluğu
Δ_{freq}	Frekans çözünürlük değeri
F_s	Örnekleme frekansı
m	Elyaf ya da epoksi kütlesi (m_f : elyaf kütlesi ve m_g : matris kütlesi)
M	Kompozit kiriş toplam ağırlık
ρ	Yoğunluk (ρ_c : kompozit kiriş yoğunluğu, ρ_f : fiber yoğunluğu ve ρ_m : matris yoğunluğu)
W	Kütlesel oran (W_f : fiber kütlesel oranı ve W_m : matris kütlesel oranı)
Ex, Ey ve Ez	Sırasıyla x, y ve z eksenli Elastisite Modülü
Hz	Hertz
$z(t)$	Nodal yer değiştirme vektörü
A	Genlik
A_0	Maksimum genliği
φ	Faz değişimini
ω_n	Sönümsüz doğal frekansı
ω_d	Sönümlü doğal frekansı
ζ	Sönümleme oranı
δ	Logaritmik azalma
ETP	Elyaf Takviyeli Plastik
ASTM	American Society for Testing and Materials
TGA	Termogravimetrik Analiz
TEM	Taramalı Elektron Mikroskopisi
DMA	Dinamik Mekanik Analiz
DMTA	Dinamik Mekanik Termal Analiz
DSC	Diferansiyel tarama kalorimetresi
PMK	Plastik Matrisli Kompozit
İİS	Isıl İşlem Sıcaklığı
SEM	Sonlu Elemanlar Metodunu
KETP	Karbon Elyaf Takviyeli Plastikler
SKK	Sıvı Kompozit Kalıplama
RTK	Reçine Transfer Kalıplama
Vİ	Vakumda İnfüzyon
VDRTK	Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
VDRİK	Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Kalıplama
SKRİKİ	Seemann Kompozit Reçine İnfüzyon Kalıplama İşlemi
VTRTK	Vakum Torbası Reçine Transfer Kalıplama
VDRİ	Vakum Destekli Reçine İnfüzyon
FTF	Frekans Tepki Fonksiyonu
FFT	Fast Fouier Transform
PVDF	Polivinilidin Diflorür)

1. GİRİŞ

Elyaf Takviyeli Plastiklerin (ETP) gelişimi, İkinci Dünya Savaşı sırasında uçak yapıları ve roket motorları için yüksek mukavemet ve rijitliğe sahip hafif malzeme geliştirilmesi ihtiyacı ile başlamıştır. ETPlerin kullanımı, daha sonra havacılık ve uzay sanayi alanlarında kendine yer bulmuş ve bu malzemeler, bu alanlara ek olarak, ihtiyaç duyulan diğer uygulamalarda da geniş bir yer bulmaya başlamıştır. Kompozit malzemenin yüksek mukavemet ve rijitlik gibi özellikleri bu materyallerin sivil havacılık pazarında kullanılmasında etkili olmuştur. İleri döküm tekniklerinin geliştirilmesi, ETPlerin otomotiv endüstrisinde kullanım yolunu açmış ve buna ek olarak ETPler hafif demiryolu ve deniz gemileri gibi diğer ulaşım sistemlerinde de yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bugün ETPler, elektrikli ve elektronik cihazlar ile tüketici ürünleri dâhil olmak üzere çok sayıda özel ürünlerde kullanılmaktadır. Bu materyallerin kullanımı yirminci yüzyılın ikinci yarısında pek çok sanayi sektöründe belirgin bir büyüme kaydetmiş ve bu büyüme yirmi birinci yüzyılda da devam etmektedir. Kompozit malzemelere olan ilgi hem performans faktörleri hem de çevresel faktörler tarafından belirlenmektedir. Bu özellikler ile birlikte enerji absorpsiyonu sayesinde; formula yarışları, kayak, golf ve tenis de dâhil olmak üzere birçok spor dalında performansların gelişmesine ciddi katkı sağlamıştır. Şimdiye kadar bahsedilen uygulama alanlarının çoğunda, maliyet yerine, performans daha önemli husus olmuştur. Bu duruma bağlı olarak, sofistike imalat ve kalite kontrol teknikleri gerektiren karbon ya da bor elyaf gibi nispeten pahalı bileşenleri bu tür uygulama alanlarında kullanmak mümkün olmuştur. ETP kullanımı ile elde edilen iyi sonuçlar, bu materyallerin daha geniş ölçekli hafif endüstriyel yapıların uygulama alanlarında kullanılmalarını yaygınlaştırmıştır. Bu malzemeler ayrıca, düşük özgül ağırlıkları yüzünden yakıt tasarrufu sağladığı için ulaşım endüstrisinde, büyük rüzgâr türbini kanatlarının tasarımında ve daha uzun ömürlü oldukları için köprüler, yollar ve binaların desteklenmeleri gibi inşaat projelerinde tercih edilmektedir.

ETPlerin büyük endüstriler, farklı spor branşları, büyük sivil yapılar ve günlük hayatta her alanda büyük ölçekli kullanımı aşağıda belirtilen faktörlerin göz önünde bulundurulmasını gerektirmektedir: i) maliyet, ii) sıklıkla değişen ve çoğunlukla birbirinden farklı ortamlara maruz kalma ve iii) ETP destekli yapıların performansını uzun yıllar boyunca başlangıç seviyelerinin çok altında olmayacak şekilde muhafaza etme ihtiyacı. Özellikle inşaat sektöründeki yapıların uzun yıllar boyunca ihtiyaca cevap verecek şekilde performansını koruması önem arz etmektedir. Çünkü; örneğin köprü gibi bir inşaat sektörü yapısından beklenen hizmet ömrü 50 yıldan fazladır (Kajorncheappunngam ve ark., 2002). Yukarıda sıralanan faktörlerin optimizasyonu ve servis koşulları, ETPlerin herhangi bir işgörmezlik yaşanmaması için gerekli önlemlerin alınmasını sağlamak amacıyla ETP imalatında, kalite kontrolünde ve yapısal tasarım çalışmaları alanlarında yoğun çalışmalar gerektirmektedir.

Kompozit malzemelere duyulan ihtiyaç ve piyasada farklı sektörlerde kullanımı her geçen gün artmasına rağmen, bu malzemelerin öngörülemeyen servis dışı yükler ve çevresel şartlandırma kombinasyonuna maruz bırakılması durumunda uzun vadeli özellikleri halen tam olarak bilinmemektedir. Isı, nem, çözücüler, asitler, ozon, hidrokarbonlar, yükler vb. farklı ortamlara maruz kalmanın etkisi ve daha da önemlisi bu ortam parametrelerin bir kombinasyonu, malzemenin rijitliğini ve mukavemetini bozarak çatlaklara ve malzemenin amacına göre hizmet etmemesine (işgörmezlik) neden olabilir. Bu tarz bir bozulmanın kompozit malzemelerin nitelikleri ve gelecekteki servis ömrü üzerine etkisini öngörecektir uzun vadeli verilerin ya da hızlandırılmış bir yaşlandırma metodolojisinin olmaması, kompozitlerin daha geniş kullanımını engelleyen başlıca sorunlardandır. Bu durum, kompozit materyallerin gereğinden fazla sağlam üretilmesini gerektirmektedir ki bu da yukarıda sıralanan faktörlerden dolayı maliyetin artmasına sebebiyet vermektedir.

ETPlerin yaşlanması genel olarak, görece daha tehlikesiz ve tersinir olan fiziksel yaşlanma etkilerinden tersinmez olan daha ciddi kimyasal yaşlanmaya kadar değişebilir. Dahası, sürünme gibi mekanik yüklemekten kaynaklanan yaşlanma çevre koşulları ile ilişkili olarak düşünülmelidir. Literatürden de görüleceği gibi kompozit malzemelerin çevresel olarak yaşlanması, genel olarak bu materyallerin yüzeyinden

veya kenardan içe doğru oluştuğu ve malzemenin merkezine nüfuz edebilmesi ise daha uzun süreye ihtiyaç duyduğu yönündedir. Bu durumun akışkanların difüzyonuna benzediği ve anizotropik olabileceği gibi yaşlanma oranının sıcaklığa ve yükleme durumuna bağlı olabileceğidir. Bu benzerlik, farklı geometrik şekillerdeki ETPlerin yaşlanmasında önemsiz sayılamayacak gerilme yığılması gibi özelliklerin tahmin edilmesini sağlar. Kompozit malzemelerin servis şartlarındaki geçmişini doğru temsil eden herhangi bir metodolojinin geliştirilmesi, uzun vadeli ömür tahminini gerçekleştirebilmek için önemli bir adımdır. Bu metodolojideki testler, yaşlanmanın polimer (yani, nispeten daha zayıf olan matris materyali) üzerindeki etkisini doğru bir şekilde yansıtmalıdır, çünkü elyaf, reçinedeki herhangi bir nitelik kaybının görünürlüğünü gizleyebilir. Ancak, elyafların üstün özelliklerine rağmen bazı ortamlarda polimere göre daha çabuk bozunabilir ve ek olarak elyaf/matris arayüzünde beklenmedik hasarlar oluşabilir.

ETP malzemeleri, matris, elyaf ve arayüz bölgesi olmak üzere üç farklı bileşeni içeren karmaşık malzeme sistemleri olduğu için bu materyallerin yaşlanma analizleri oldukça zordur. Agresif çevre koşullarına maruz bırakılan polimer kompozitlerdeki bozulma/yozlaşma genellikle birkaç faktörün sonucunda oluşmaktadır: (i) gerilme korozyonu veya su/çözücü plastikleştirme vasıtasıyla takviye edici elyafların mukavemet kaybı, (ii) su/çözücü emilimi veya kimyasal madde etkisi yüzünden matris bozunması ve (iii) arayüzey bağ mukavemetinin zayıflaması nedeniyle elyaf/matris arayüzünün bozulması, (iv) matris modülünün ve mukavemetin zaman ve sıcaklığa bağımlılığı ve (v) sıcaklık ve kimyasal ortamın birleşik etkisi nedeniyle ortaya çıkan hızlandırılmış bozunma (Agarwal ve ark., 2006). Yukarıdaki faktörlerin bir kompozit sisteme birlikte etki etmesi ile kompozit malzemelerin rijitliği, yapısal kararsızlığa ve/veya işgörmezliğe veya yırtıklara neden olacak kadar azaldığı zaman; bu materyallerin yapısal bütünlüğü tehlikeye girer. Dolayısıyla bir kompozit sistemin servis koşulları altında muhtemelen maruz kalacağı bütün olasılıkların göz önüne alınarak üretilmesi ve önlem alınması önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin doğal yaşlandırma koşullarına bağlı olarak dinamik özelliklerindeki değişimler

incelenmiştir. Kompozit plakalar vakum destekli reçine infüzyon tekniği kullanılarak üretilmiş ve ilgili analize göre sulu testere ile kesimi yapılarak test numuneleri elde edilmiştir. Kompozit kirişlerin çekme testleri ASTM D3039 standardına göre gerçekleştirilmiş ve titreşim analizleri yapılmıştır. Titreşim analiz verileri Matlab yazılımında hazırlanan bir program yoluyla işlenmiştir. Araştırma yönteminden elde edilen deneysel sonuçlar, referans numuneler için ANSYS yazılımında da nümerik olarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kompozit kirişler; nem, sıcaklık ve bu ikisinin kombine etkisi olmak üzere birbirinden farklı üç doğal çevresel koşullarda bir yıl boyunca yaşlandırılmıştır. Kompozit kirişlerin titreşim analizi her üç ayda bir gerçekleştirilmiş ve hem doğal frekans hem de sönümlleme oranı değişimleri incelenmiştir. Yapılan analiz sonuçları incelendiğinde en yıkıcı yaşlandırma koşulunun nem ve sıcaklığın kombine şartlandırılması durumunda olduğu gözlenmiştir. Nemli ortamlardaki yaşlandırma durumunda, Aramid elyaf takviyeli kompozitlerin dinamik özelliklerinden sönümlleme oranının karbon elyaf takviyeli kompozitlere göre daha çok, doğal frekansların ise daha az aşınma/bozunma gösterdiği gözlenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Polimer kompozitler, yeni fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikler sunduğu için her geçen gün popülerlik kazanan ve hızla gelişen bir alandır. Ancak bu malzeme grubuna ait özelliklerin anlaşılması, mümkünse kontrol edilmesi ve özelliklerinden maksimum fayda sağlanması araştırmacılar için önem arz eden bir durumdur. Ağırlık probleminin kritik olduğu uygulamalarda kompozitlerin popülerliğinin artmasının nedenleri, sahip oldukları yüksek özgül rijitliliği ve mukavemetidir (Wicaksono ve Chai, 2013). Spor malzemeleri, uçak ve uzay araçları, otomobil ve denizcilik gibi sanayi alanları, kompozitlerin vazgeçilmez bir yere sahip olduğu bazı mühendislik uygulamalarına örnek olarak gösterilebilir.

2.1. Elyaf Türleri

ETPlerin (Elyaf Takviyeli Plastik) imalatında kullanılan üç temel elyaf sırasıyla; cam elyafları, karbon elyafları ve aramid elyaflarıdır. Bahsi geçen elyaflar arasında karbon elyaflar, en yüksek mukavemet ve rijitliğe sahiptir. Ayrıca bu elyaflar düşük aşınma direncine sahiptirler ve sulu ortam ile metallerin ve alaşımların varlığında galvanik korozyona maruz kalmaktadırlar (Sloan ve Talbot, 1992; Alias ve Brown, 1993). Ayrıca karbon elyaflar kısmen gevrekli, bu durum darbe enerjisini sönümleme kapasitesini düşürmektedir. Öte yandan, poli parafenila terafatalamit'ten (Poly-paraphenylene terephthalamide) üretilen aramid elyaflar, karbon veya cam elyafa göre daha düşük mukavemete sahiptir, ancak büyük darbe enerjilerini emebilirler. Yaklaşık olarak 50 yıl önce icat edilmiş aramid elyafların bir türü olan kevlar elyaflar, sahip olduğu yüksek çekme mukavemeti/ağırlık oranı sayesinde bisiklet lastikleri ve yarış yelkenlerinden vücut zırhlarına kadar birçok uygulama alanına sahiptir (URL-1). Bu elyafların enine ve basma mukavemeti nispeten düşüktür ve suyu emme konusunda güçlü bir eğilimleri mevcuttur. Ayrıca, polimerik matrislere yapışmaları bazen zayıftır ve bu elyaf temel alınarak imal edilen kompozitlerin kesilmesi ve işlenmesi zordur. Bu üç büyük elyaf türüne ilaveten,

çoğunlukla havacılık endüstrisi için geliştirilen bor ve metal elyafları gibi gelişmiş elyaflar da piyasada mevcuttur.

Doğal elyaflar (kabuk, yaprak, meyve ve tohum), insan yapımı inorganik (cam, karbon vb.) veya organik (aramid, ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen, vb.) muadillerinden farklıdır. Doğal elyaflar, basit elyaf demetlerinden oluşur (dolayısıyla süreksizdir), boşluklar ve kusurlar içerir, kesit alanları düzensizdir ve kalitesi (bitki örtüsüne, toprak türüne ve iklime bağlı olarak değiştiğinden) tutarsızdır. Tercihen polimer kompozitlerde kullanılan bitki elyaflarının başlıca bileşenleri; çeşitli miktarlarda selüloz, hemiselüloz ve lignindir. Bitki esaslı elyafların mekanik özellikleri selüloz içeriği ile kontrol edilir. Bitki elyafları suseverdir (polar). Doğal elyaf takviyeli kompozitlerdeki elyaf/matris yapışmasını geliştirmek için çok sayıda yüzey işlemi araştırılmıştır. Bu yüzey işleme yöntemleri fiziksel ve kimyasal uygulamalara göre derleme bir çalışmada sınıflandırılmıştır (Fuqua vs., 2012).

2.2. Matris Türleri

Matris, kompozit malzemelerde yüklerin elyafa aktarılması ve gerilmelerin elyaflar arasında dağıtılması görevini üstlenmektedir. Matris, elyafların mümkün olabildiğince homojen bir yapının eldesi için gerekli yerleştirilmelerine imkan verir ve bir kompozit sistemde elyaf malzemesini çevresel faktörlerden korur (Karger-Kocsis ve ark., 2015). Polimerik matrisler, sırasıyla termoset polimerler ve termoplastik reçinelerden oluşan iki geniş sınıfa ayrılabilirler. Termoplastik reçineler genellikle termoset polimerlere kıyasla daha yüksek gerilme mukavemetine, daha iyi darbe direncine ve daha yüksek ısıl çarpılma sıcaklıklarına sahiptirler. Ancak, termoplastik matrislerin maliyeti, termoset matrislerden çok daha yüksektir (Sih ve ark., 1990). Dolayısıyla, termoplastik matrisler yüksek performans özelliklerine ihtiyaç duyulan havacılık endüstrisi, özellikle de karbon elyaf takviye ile beraber, mühendislik uygulamaları için daha uygundur (Jones ve ark., 1985).

Önemli termoset matrisleri arasında vinil ester, epoksi, polyester ve fenolik reçineler bulunur. Vinil ester ve epoksi matrisleri diğer iki polimer türden biraz daha

pahalıdır ancak bu polimerler daha yüksek çekme mukavemetine sahiptir ayrıca, su ve çeşitli kimyasal solüsyonların nüfuzuna karşı da daha iyi direnç gösterirler (Karbhari, 2006). Epoksi reçineler; yapıştırıcılarda, boyalarda, kaplamalarda, tıbbi implantlarda ve elektrikli cihazlarda yaygın olarak kullanılan termoset polimerlerdir. Epoksiler, havacılık endüstrisi, rüzgâr türbinleri ve elyaf takviyeli kompozitler için matris malzemesi olarak da yaygın şekilde kullanılır. Epoksiler, yüksek özgül rijitliği, yüksek özgül mukavemeti, yalıtkan özellikleri, korozyon direnci, takviye elyaflar ile kimyasal uyumluluğu ve imalatlarının nispeten kolay olması nedeniyle tercih edilmektedir (Odegard ve Bandyopadhyay, 2011).

2.3. Elyaf/Matris Arafazı/Arayüzü

Arafaz, kompozit malzemede homojen matris malzemesi ile homojen elyaf materyali arasında kalan bölgede yer alır. Elyaf ve matris arasında kendine has fiziko-kimyasal özelliklere sahip arafaz terimi 1970'lerde tanıtılmıştır (Papanicolaou ve ark., 1978). Bu kavramın önemi, elyaf takviyeli kompozit malzemelerin büyük ölçüde matris yüzeyleri ile arasındaki yapışma etkileşiminin doğasına ve yoğunluğuna bağlı olduğunun anlaşılması ile daha da artmıştır. Bu nedenle kompozitlerin istenilen özellikleri elde etmek için elyaf ve polimer arasındaki yapışkan bağlanmanın oluşum mekanizmalarını ve mekanik yük altında bu bağlanmanın davranışlarını bilmek gereklidir. Kompozit malzemelerin servis ömrü boyunca güvenilirliğini ve dayanıklılığını arafaz/arayüzlerin sağlamlığı belirler (Sethi ve Ray, 2015).

Elyaf/matris arafazı, nispeten zayıf matristen güçlü elyafa ve elyaftan da matrise gerilme transferinin sağlanmasını temin eder. Bu nedenle takviye malzemesi ile polimer matris arasındaki yapışma, kompozit bileşenleri arasında yük transferi için hayati öneme sahiptir. Kompozitlerde, yüksek bir rijitlik ve mukavemet elde edebilmek için elyaf ve matris arasında kuvvetli bir bağ kurma istenirken darbe koşulları altında ise malzemenin enerji sönümleme performanslarını geliştirmesi sebebiyle nispeten zayıf bir arayüzey bağı tercih edilmesi daha uygundur (Karger-Kocsis ve ark., 2015). Güçlü bir arayüz, örnek bir mukavemet ve rijitlik sergileyen

bir malzeme oluşturur ama bu durum materyali, matris ve elyaf boyunca kolay bir çatlak ilerlemesine sebebiyet verecek şekilde gevrek hale getirebilir. Nispeten daha zayıf bir arayüzün ise mukavemet ve rijitliği yüksek değildir ve matristen elyafa doğru gerilme transferi etkinliği daha düşüktür. Elyaf ve matris arasındaki arayüz bağlanmasının davranışı, artık gerilmelerin varlığından büyük ölçüde etkilenir. Arafaz bölgesinde, elyaf ve matris arasındaki bağlanma (yapışma) mekanizmaları Brady ve Porter (1990) tarafından araştırılmış ve arayüz bağında, matris kristallliği ve emilimin (absorpsiyon) önemi belirtilmiştir.

2.4. Çevresel Koşullar

Günümüzde cam, karbon ve aramid elyaf takviyeli plastikler gibi elyaf takviyeli kompozit malzemeler, geleneksel malzemelere göre daha yüksek özgül rijitlik ve mukavemet, yorulma ve aşınma direnci göstermesi nedeniyle teknolojik uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak kompozit malzemeler bazı ciddi çevresel koşullardan etkilenmektedir. Bu çevresel koşullar arasında sıcaklık, nem, radyasyon, UV ve diğer çeşitli alkali ortamlar sayılabilir. Belirli bir süre boyunca bu çevresel koşullara maruz kalma (şartlandırma) yüzünden kompozit malzemelerin mekanik ve/veya fiziksel davranışında, elyaf/matris arayüz bölgeleri arasındaki yapışma/bağyapı özelliğinde bozulmalar meydana gelir (Sethi and Ray, 2015; Wang ve ark., 2016b).

Kompozitin performansını belirleyebilmek için bu malzemeler, hassas ve kontrollü bir şekilde belirli ortama maruz bırakılır. Kompozitlerin çevresel koşullara maruz bırakılma işlemi sırasında, hızlandırılmış yaşlandırma için çevresel etkilerin gerekli süre boyunca kontrol altında tutulabilmesi için üretilmiş özel ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır (Bank ve ark., 1995). Kompozitler, uygulama alanlarında genel olarak birden fazla şartlandırmaya maruz kalırlar, bu nedenle literatürde farklı çevresel koşulların sinerjik etkilerini değerlendirmek amacıyla farklı çevresel koşulların kombinasyonları kullanılmıştır. Bunların en yaygın olanı, belirli bir süre boyunca kompozitlerin yükseltilmiş veya düşürülmüş sıcaklık ve neme maruz bırakıldığı kombine sıcaklık ve nem testleridir. Diğer testler de ise kompozitler

çoğunlukla değişen sıcaklıklarda, tamamen sıvı veya gaz karışımlarında şartlandırılır. Bazı durumlarda ise, çevresel maruziyet döngüseldir: maruz kalma türü, ıslak/kuru veya don/çözülme gibi periyodik bir tarzda değişebilmektedir.

En belirgin çevresel şartlandırma yöntemi sıcaklık değişiklikleridir. Çünkü sıcaklığın, reçine malzemesinin mekanik özelliklerini bozduğu ve yaşlandırdığı bilinmektedir. Kompozitler camsı geçiş sıcaklığı (T_g) aralığındaki sıcaklıklara ısıtıldığında, polimerin yumuşaması ve/veya parçalanması gibi durumlardan kaynaklı termomekanik etkiler ortaya çıkabilir. Materyaller, vakum veya inert atmosfer yerine oksitleyici bir ortamda ısıtıldığında bozulma daha da kritik bir seviyede gerçekleşir (Tsotsis, 1995; Fan ve ark., 2003). Uzun süreli camsı geçiş sıcaklığı altındaki sıcaklıklara maruz kalınan çevresel ortamlar, epoksi reçinelerin ve epoksi esaslı malzemelerin moleküler yapısında fiziksel değişiklikler meydana gelmektedir. Bu fiziksel yaşlanma mekanizmaları, kompozitlerdeki boş hacimde azalma ve moleküler düzenlenme biçiminde değişikliklerini içermektedir (Odegard ve Bandyopadhyay, 2011). Sonuç olarak bu mekanizmalar, epoksi esaslı üretilmiş bileşenlerin ve yapıların mekanik, termodinamik ve fiziksel özelliklerinin güvenilirliğini tehlikeye atabilecek şekillerde etkilemektedir.

Çevre şartlarına bağlı olarak bozulmanın, farklı yüzeylerden farklı oranlarda gelen kütle kaybıyla ilişkili olduğu ifade edilmiştir (Bowles ve ark., 1997; Hancox, 1998). Kompozit materyallerde termal koşullara maruz bırakma sonrası, matris çatlakları ve elyaf ayrılmasının ortaya çıktığı literatürde gösterilmiştir (Mascia ve Zhang 1995). Aşırı sıcaklıklar, matris malzemenin plastikleşmesine ve daha sonra ise polimerin türüne bağlı olarak proliz erimesine neden olduğu aktarılmıştır (Bank ve ark., 1995). Ayrıca yüksek sıcaklığın reçine esaslı kompozitlerin yorulma performansını etkilediği bildirilmiştir (Kawai ve ark., 2001).

Kompozitlerin maruz kaldığı ve literatürde en yaygın olarak incelenmiş diğer bir çevresel şartlandırma ise nemdir. Nem, matris reçinenin özelliklerini etkilemesine rağmen genel olarak elyaf malzemenin özelliklerini etkilemez. Termoset reçineler, termoplastik reçinelere nazaran neme karşı daha duyarlıdır. Nem, reçine ağının

termomekanik özelliklerini plastikleştirilme, hidrolitik tepkimeler veya kimyasal bozulma yoluyla etkiler. Bu durum, kompozit sistemin ömrünü ve hizmet verdiği maksimum servis sıcaklığını azaltacaktır (Jones, 2003). Nem, difüzyif ve/veya kılcal nem alma gibi işlemlerle kompozit malzemelerin iç bölgelerine nüfuz edebilir (Gaur ve Miller, 1990). Su absorpsiyonlarının bir sonucu olarak, termoset polimerlerin mekanik özelliklerinde hem tersinir hem de tersinmez değişikliklerin ortaya çıktığı belirtilmiştir (Ray, 2006a). Nem emilimine bağlı hasar mekanizması, malzeme yüzeyinin yakınında başlar ve zamanla içeri doğru yayılır. Daha sonra bu hasar, malzeme yapısındaki zaten var olan veya nem emilim sonucu oluşan çatlaklar sayesinde serbest yüzeye paralel büyüme eğilimi gösterir (Böer ve ark., 2013). Kompozitlerde elyaf yönü boyunca nem difüzyon oranı, elyaf yönüne dik gelişen difüzyon oranından daha büyük olduğu aktarılmıştır (Ray ve Rathore, 2014). Yine bu çalışmada kevlar/epoksi kompozitlerindeki nem difüzyonunun sade reçineden iki kat fazla olduğu bildirilmiştir.

Polimer ve kompozitlerde emilen nemin en önemli sonucu, polimer zincirlerinde Van Der Waals bağlarının (OH içeren moleküllerdeki hidrojen bağı) kesilmesinin matris plastikleşmesine neden olduğu ifade edilmiştir. Polimer matrisin bağ yapılarında meydana gelen bu değişiklik, camsı geçiş sıcaklığının azalmasına sebebiyet vermektedir (Allred, 1981; Hoa ve ark., 1992; Pegoretti 2012; Wolfrum ve ark., 2014; Sethi ve Ray, 2015). Bu durum, kompozitlerin matris esaslı bölgelerinde rijitlik ve mukavemet özelliklerinde azalmaya neden olur. Bu nedenle bir kompozitin maksimum nem içeriğinin belirlenmesi, bu materyalin maksimum nem konsantrasyonunda test edilmesi gerekmektedir (Bunsell ve Renard, 2005). Literatür çalışmalarında genel olarak nemli ortam şartlandırılması, suya daldırma veya çeşitli sıcaklıklarda nemli havaya maruz bırakma şeklinde gerçekleştirilmektedir.

Kompozitlerin maruz kaldığı diğer bir çevre koşulu, Ultraviyole (UV) ışınlarıdır. Çünkü çoğu polimer güneş ışığının UV radyasyonunu absorbe etmektedir. Bu durum polimer yapıların bozulmasına, yozlaşmasına neden olan fotolitik, foto-oksitatif ve termo-oksitatif reaksiyonlara neden olduğu aktarılmıştır (Rabek, 1995; Khajeh ve ark., 2015). Matrisin yapısı nedeniyle polimer matris esaslı kompozit

materyaller bu bozulmaya duyarlıdır. Bu malzemelerin bozunması, basit bir renk değişimi ile mekanik özelliklerde kayda değer kayıpların yaşanması arasında değişebileceği bildirilmiştir (Pegoretti, 2012).

Literatürde, yapısal uygulamalarda kompozitlerin maruz kaldığı asidik aşındırıcı (korozyon) ve bazı kimyasal solüsyon (tuzlu su, dizel yakıtı, motor yağı, antifriz, benzin, transmisyon sıvısı, fren sıvısı ve indolene yakıtı vb.) ortamlarındaki yaşlanmaları ile ilgili çalışmalar da mevcuttur (Bank ve ark., 1995).

2.5. Çevresel Performans Değerlendirmesi için Uygulanan Deneysel Teknikler

Çevresel maruziyete bağlı olarak Young Modülü, gerilme ve katmanlar arası kesme mukavemeti ve bağ kuvveti gibi mekanik özellik parametrelerinde meydana gelen değişiklikler, ETPnin performans değişikliklerinin en iyi göstergeleridir. Performans değerlendirilmesinde termo gravimetrik analiz (TGA), taramalı elektron mikroskopisi (TEM), DMA (dinamik mekanik analiz), DMTA (Dinamik mekanik termal analiz), Diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC), potansiyodinamik polarizasyon taramaları, galvanik kaplin testi ve Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi gibi teknikler kullanılarak fiziksel ve mikroyapısal özelliklerin belirlenmesi ile bu parametrelerin incelenmesi tamamlanır (Byars ve ark., 2003).

TGA, çevresel etkiye maruz kalmaya bağlı yaşlanma etkilerinin değerlendirilmesinde çok yararlı bir tekniktir. Bu metot ile önceden çeşitli sulu ortamlarda yaşlanmaya bırakılan polimerik kompozitlerin, oda sıcaklığından 150°C ye 10°C/dakikalık bir ısıtma hızı ile yapılan TGA ölçümlerinde gözlemlenen ağırlık kaybının kompozit tarafından emilen suyun dışarı atılmasını yansıtmaktadır. Ayrıca 150°C ile 300°C arasındaki ısıtma sonucu gözlemlenen ağırlık kaybı ise monomer buharlaşma miktarını ve dolayısıyla çevresel yaşlanma sırasındaki polimer bozulmasını /yozlaşmasını göstermektedir (Jones, 2001).

DTK, kompozit bir materyalde bulunan artık reaksiyonların ekzotermik enerjisini ölçtüğü için yararlı deneysel bir tekniktir. Bir numunenin sıcaklığını

yükseltmek için gereksinimin duyulan ısıнын gözlemlenebildiği bir termoanalitik tekniktir. Bu metodun ardında yatan temel prensip; sıcaklık değişiminden dolayı materyalde bir faz dönüşümü meydana gelirse daha fazla (ya da daha az) ısıya ihtiyaç duyulacak ve böylelikle materyale ısı akacaktır. Bu teknik geçmişte, havacılık endüstrisi tarafından PMK (Plastik Matrisli Kompozit)'larda geri kalan kür yüzdesini tahmin etmek için kullanılmıştır (Dao ve ark., 2006a).

DMTA, nem absorpsiyonun polimer ve polimer kompozitlerin viskoelastik davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için yararlıdır (Wang ve Ploehn, 1996; Karbhari, 2006). Ayrıca tanjant kaybı ($\tan\delta$) eğrisi karakteristiği, yapıların bozulması ve zincir hareketliliği ile ilgili önemli bilgiler vermektedir.

Raman spektroskopisi, kompozitlerin mikromekanik çalışmalarında çeşitli sistemlerin elyaf/matris arayüzü boyunca noktadan noktaya gerilimin belirlenmesini sağladığı için çok güçlü bir yöntemdir. Üstelik bir materyal için nihai işgörmezlik yaşanmadan önce tüm gerilim seviyelerinde, elyaflarda ve arayüzlerde gerilmeler haritalanabilir. Raman tekniği, elyaf/matris arayüzü boyunca arayüzey kesme gerilmesi değişiminin belirlenmesini sağlarken mikromekanik test yöntemleri ise yalnızca elyaf/matris arayüzünün işgörmezliği ile elde edilen tek noktadaki değerleri verir (Guetta ve ark., 1989; Chaudhuri ve ark., 2006; Feng ve ark., 2017).

Optik spektroskopi, çevresel yaşlanmaya maruz kalmanın ETPLerde yol açtığı büyük hasarın belirlenmesi için kullanılmıştır (Hoa ve ark., 1992). Ayrıca bu yöntemde TEM, mikroyapısal hasarın daha hassas bir şekilde karakterize edilebilmesi, işgörmezlik mekanizmalarındaki hata modlarını ve değişiklikleri incelemek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Guetta ve ark., 1989; Hoa ve ark., 1992). Geleneksel TEM teknikleri, gerçek hasarı artırarak hızlı ve aşırı kurumaya sebebiyet veren yüksek vakuma maruz bırakılmasını gerektirdiği için numunelerde büzülme, çatlama ve parçalanmayı kolaylaştırıcı bir dezavantaja sahiptir (Tucker ve Brown, 1989).

Bu araştırma teknikleri göz önüne alındığında, kompozitlerin çevresel koşullara maruz kalmalarından dolayı mekanik özelliklerinde meydana gelen bozulma ya da yozlaşma, genellikle statik testlerle değerlendirilmektedir. Maruziyetten sonra kompozit malzemelerin özelliklerini belirlemek için birçok mekanik testler kullanılmaktadır. Bu testler, genellikle ASTM standartlarına göre küçük kuponlar üzerinde yapılmaktadır. Bu çalışmada ise mekanik testler yerine dinamik test uygulanacak ve bu materyallerin dinamik özelliklerindeki değişim incelenecektir.

2.6. Yaşlandırma Mekanizmaları

PMKlar; sadece sıcaklık, nem, radyasyon veya bunların kombine uygulamasına maruz bırakıldığında farklı bozunma/yozlaşma mekanizmaları ortaya çıkmaktadır. PMKların performansını düşüren veya gerileyen fiziksel, kimyasal ve mekanik gerilme kaynaklı üç ana yaşlanma mekanizmaları tanımlanmıştır (Schoeppner ve ark., 2008).

Fiziksel yaşlanma, polimerin Tg'sinin oldukça altında malzemenin dengede olmama halinin hâkim olduğu sıcaklıklarda gerçekleşir ve materyal bu şartlarda termodinamik dengeye doğru değişiklikler geçirir. Bu durum polimerik malzemelerde rijitlik, akma gerilmesi, yoğunluk, viskozite, difüzivite ve tokluk ile birlikte gevrekleşme gibi parametrelerde değişikliklere sebebiyet verir (Schoeppner ve ark., 2008). Fiziksel yaşlanma, tüm amorf polimerler için polimerin Tg'nin üstünde ısıtılması ve daha sonra malzemenin hızla soğutulması yoluyla ısıl tersinirdir. Bu ısıl-tersinir davranış, yüksek sıcaklıkların çapraz bağlanmanın derecesini ve/veya zincirin kesilmesini etkileyen eğiliminden dolayı termoset malzemelerinde oluşmadığı varsayılmaktadır. Fiziksel yaşlanma oranı üzerinde, işletme ortalama sıcaklık ve ömür boyunca gerçekleşen termal geçmiş, kuvvetli bir etkiye sahiptir. Fiziksel yaşlanma, malzemenin Tg'sine yakın sıcaklıklarda kullanılan PMKler için zamana bağlı mekanik özellikleri (sürünme ve gerilme gevşemesi) ve bu özelliklere bağlı işgörmezlik süreçlerini önemli ölçüde etkiler (Schoeppner ve ark., 2008).

Kimyasal yaşlanma, zincir kesilme reaksiyonları ve/veya ilave çapraz bağlanma, hidroliz, depolimerizasyon (polimer bozunması) ve plastikleştirme içeren tersinmez bir süreçtir. Yüksek sıcaklık altında işlem gören PMKlerde, kimyasal bozunmanın birincil formları hidroliz ve oksidasyondur. Oksidasyon, kimyasal bağ kopmalarına, diğer bir deyişle moleküler ağırlığın azalmasına, mekanik tepki değişikliklerine ve ürünlerin oksidasyon gazının giderilmesine bağlı kütle kaybına neden olur (Schoeppner ve ark., 2008). Çapraz bağlanma ve oksidasyon, özgün PMK işletme sıcaklıklarında başat kimyasal yaşlanma mekanizmalarıdır. Şartlandırma sıcaklığı ve zamanı arttıkça termo-oksidatif bozunma artan bir şekilde önem kazanmaktadır. Genellikle bu yaşlanma türü, yoğunlaştırma ve Tg'yi artırma yoluyla mekanik özellikleri ciddi şekilde etkileyen çapraz bağlanma yoğunluğunda bir artışa neden olur. Termo-oksidatif yaşlanma, polimer matris bileşiklerinin kimyasal yapısını tersinmez biçimde değiştirebilir. Termo-oksidatif bozunum sırasında kimyasal yapıdaki değişiklikler; post kürleme, uçucu kaybı, dehidrasyon, zincir kesilmesi, ilave çapraz bağlanma ve karbonil büyümeyi içerir (Khajeh ve ark., 2015).

Mekanik bozunma mekanizmaları, makroskopik ölçekte görülebilen tersinmez işlemlerdir. Eğer bu bozunum fiziksel ve/veya kimyasal yaşlanmayla birleşirse, bozunma daha da şiddetli hale gelir. Sürünme-gevşeme ve termomekanik çevrim testleri, yüksek sıcaklıklardaki PMKler üzerinde uzun vadeli mekanik yüklenmenin etkilerini değerlendirmek için sıklıkla kullanılır. Bu yaşlanma mekanizmaları öncelikle polimer esaslı özelliklerde değişikliklere yol açmasına rağmen elyaf esaslı özellikler, matrisin bozunması ve elyaf/matris arafazının bozunması tarafından etkilenebilir (Schoeppner ve ark., 2008). Bozunma mekanizmaları, matris çatlaması, delaminasyon, arayüz bozunması, elyaf kopmaları ve inelastik deformasyonu içermektedir. Mekanik bozunma mekanizmaları, ancak kimyasal veya fiziksel yaşlanma mekanizmaları polimer özelliklerini değiştirdikten sonra bazı durumlarda baskın hale gelir.

2.7. Çevresel Şartlandırmanın Elyaflara Etkisi

Cam elyaflar, düşük maliyetlerinden dolayı yapısal kompozitlerde halen kullanılan en yaygın takviye malzemesidir. Cam elyaf malzemeler, elyaf ve korozyon direnci, yüksek mukavemet, nispeten düşük yoğunluk, mükemmel optik ve elektriksel özellikler, iyi termal ve ses yalıtımı gibi pek çok yararlı özelliğe sahiptir. Cam elyaflar, sürekli ve kesik cam elyaflar olmak üzere iki ana şekilde bulunmaktadır. Cam eriyiğinden çekilerek üretilen sürekli elyaflar, belirsiz bir büyüklükte uzun, doğrusal ve ipliklerin elyaf tomarlarında (sürekli liflerin oluşturduğu bir demetteki sayı) paralel düzenlenmesi ile karakterize edilirler. Kesik elyaflar ise cam eriyiği buharının hava, buhar veya gaz akışı sayesinde parçalanmasıyla üretilen, küçük uzunluklu, bükümlü ve gelişigüzel düzenlenme ile karakterize edilmektedir (Ray ve Rathore, 2015). Cam elyaflarının yaygın kullanımı ve özellikleri yüzünden bu elyafların yaşlandırılması literatürde birçok çalışmada incelenmiştir. Ancak bu bölümde mevcut araştırma konusu ile bağlantılı olarak daha çok yaşlandırmanın karbon ve aramid elyaflar üzerine olan etkisi verilmiştir.

Karbon elyafların üretim teknolojileri, başta elyafı polimer malzemeler olmak üzere organik bileşiklerin pirolizi (organik maddelerin sıcaklık etkisiyle parçalanması işlemi) uygulamasına dayanmaktadır. Organik bileşiklerin piroliz işlemi inert bir ortamda gerçekleştirilmektedir. Günümüzde yapısal şekilleri, özellikleri, üretim teknolojileri ve başlangıçtaki hammaddelerin kaynakları bakımından değişkenlik gösteren çok sayıda farklı karbon elyaf üretilmektedir. Karbon elyafların sınıflandırılması, bu elyafların üretimi sırasında kullanılan son ısı işlem sıcaklığına (İİS) dayanır (Rahaman ve ark., 2007; Figueiredo ve ark., 2013; Ray ve Rathore 2015). Piroliz sıcaklığı arttıkça, elde edilen ürünler gittikçe karbon bakımından zenginleşmektedir. İİS 500°C iken kısmen karbonize elyaflar elde edilirken 500-1500°C arasında karbon elyaflar ve 2000-3000°C arasında grafit elyaflar elde edilmektedir (Ray ve Rathore 2015). Karbon elyaflar, mükemmel mekanik ve termal özelliklere sahiptirler ancak birçok uygulama alanında karbon elyaf takviyeli kompozitlerin kullanılmasını engelleyen durum ekonomik gerekçelerdir.

Aramid elyaflar, karbon veya cam elyafa göre daha düşük mukavemete sahiptir ancak büyük darbe enerjilerini sönümleyebilirler. Bu elyafların enine basma mukavemetleri nispeten düşüktür ve su emmeye kuvvetli eğilim gösterirler (Allred ve Roylance, 1983). Buna ek olarak, bu elyafların polimerik matrislere yapışmaları zayıftır ve bu kompozitlerin kesilmesi ve işlenmesi zordur. Ayrıca, aramid elyaf kompozitleri polimerik elyaf olduğu için neme karşı duyarlıdır ve nemi emdiği literatürde yaygın olarak bildirilmiştir (Aronhime ve ark., 1987; Haque ve ark., 1991; Bank ve ark., 1995). Bu durum, mekanik özelliklerde şartlandırma sıcaklığına bağlı olarak mukavemette % 40-70 oranında bir düşüşe neden olabilir (Allred, 1981; Doozee ve ark., 1991). Aditya ve Sinha (1992), aramid/epoksi, karbon/epoksi ve cam/polyester gibi çeşitli kompozitlerin difüzyon katsayılarını bildirmiştir.

Sıvı kristal organik aramid elyaflar (Kevlar gibi), belirli bir miktarda nemi emer ve nem emme denge değeri ortamın bağıl nemine bağlı olarak değişir. Bu malzeme grubu silikat cam ve karbon elyaflarının aksine önemli miktarlarda su emerler (Sethi ve Ray, 2015). Bu nedenle, sıvı kristal organik elyaflar uzun süre neme ve yüksek sıcaklıklara maruz kalmadan olumsuz etkilenirler (Pegoretti ve Traina, 2009). Ayrıca emilen nemin oranı kimyasal kompozisyon ve elyafların mikroyapısı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Kevlar-49 elyafının yorulma mukavemetinin, ortamdaki su içeriği düzeyindeki artış ile azaldığı Minoshima ve ark. (2000) ve Menail ve ark. (2016), tarafından deneysel olarak belirlenmiştir. Bu durum su moleküllerinin elyafın mekanik özellikleri, yanal ve eksenel elastik modülleri ve hem eksenel elyaf mukavemeti hem de eksenel yorulma mukavemetinde azalmaya sebep olduğu bildirilmiştir. Öte yandan, aramid elyafları birçok aşındırıcı ortamda olağanüstü derecede stabildir (Bunsell ve Renard, 2005).

2.8. Çevresel Şartlandırmanın Epoksi Matrislere Etkisi

Yüksek nem ve sıcaklık, servis sırasında polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini bozarak, kullanımını sınırlayabilir (Wang ve ark., 2016b). Kompozit malzemeler homojen bir yapıya sahip olmadığından farklı özellikler gösterebilen ve bölgesel olarak etkileşim içinde olan çeşitli hasar başlama ve ilerleme modları

mevcuttur. En yaygın hasar modları; matris çatlakları, katman ayrılmasında büyüme ve elyaf kopmasıdır (Dewimille ve Bunsell, 1983; Jones, 2001; Wicaksono ve Chai, 2013; Naebe ve ark., 2016).

Yapısal kompozitler için en yaygın kullanılan termoset matrisler; doymamış poliestere ve epoksi reçinelerdir (Pegoretti, 2012). Epoksilerin başlıca yapısal uygulaması elyaf takviyeli kompozitlerdedir. Matris elemanları, matristen rijit ve kuvvetli takviye elemanına olağanüstü yük aktarma olanağı sağlar. Bu yük transferi durumu materyalin servis ömrü boyunca sürdürülmesi zorunlu olduğundan, bu malzemelerin niteliklerinde meydana gelebilecek değişikliklerden dolayı epoksilerin fiziksel yaşlanması literatürde sıklıkla araştırma konusu olmuştur. Elyafli epoksi kompozitlerin ve bağlantılarının fiziksel yaşlanmasına ilişkin çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Mendels ve ark., 2000; Stocchi ve ark., 2006; Hu, 2007). Fiziksel yaşlanmanın elyaf/epoksi arayüzünün mukavemeti üzerinde çok az etkisi olduğu, bu nedenle fiziksel yaşlanmanın elyaf takviyeli kompozitlerin yük aktarma özelliklerini değiştirmedığı ifade edilmiştir (Mendels ve ark., 2000).

Zhou ve Lucas (1999a; 1999b) epoksi içindeki suyun hareketliliğini araştırarak, ETP kompozitlerin desorpsiyon (suyu dışarıya atma) sürecini analiz etmiş ve emilen suyun derecesini belirlemiştir. Araştırmacılar, bağın karmaşıklığına ve aktivasyon enerjisindeki farklılığa bağlı olarak epoksi yapılarda, desorpsiyon işleminde iki türlü bağlanmanın olduğunu ve bunların birbirinden farklılık gösterdiğini aktarmışlardır. Uzun süre hidrotermal şartlandırmanın bir sonucu olarak epoksi reçinelerinde en az iki şekilde bağ yapmış su-epoksi reçine bloğunun bulunduğunu belirtmişlerdir. Desorpsiyon işleminde, Tip I bağlarının daha düşük aktivasyon enerjisine sahip olduğunu ve esas etkisinin zincirler arası Van Der Waals bağlarını parçaladığı ifade edilmiştir, Tip II bağlarının ise reçine ağı ile ikincil çapraz bağlanma yoluyla çoklu hidrojen bağları oluşturduğu bildirilmiştir. Sisteme Tip I ve II şeklinde bağ yapmış suyun aktivasyon enerjilerinin sırasıyla 10 ve 15 kcal/mol olduğunu ifade etmişlerdir. Daha düşük sıcaklıklarda termal desorpsiyonla kolayca sistemden uzaklaştırılabilen absorbe su moleküllerinin Tip I bağlı su bloğu olarak ve termal desorpsiyonla uzaklaştırılması epey zor olan absorbe su moleküllerinin ise Tip II bağlı su bloğu

olarak sınıflandırılmıştır. Tip II bağlanmış suyun epoksi reçine ağından çıkarılması için daha yüksek sıcaklıklar gerektiği aktarılmıştır.

Polimer esaslı kompozit yapıların nemli ortamlarda, nemi emebildiği ve bu durumun uzun vadeli yapısal dayanıklılığı ve kompozitin özelliklerini etkilediği aktarılmıştır (Shen ve Springer, 1977a; 1977b). Kompozit materyallerde nem nüfuzu, difüzyon hâkimiyetinde gerçekleşirken bunun yanında kapilarite (kılcal çekme) ve mikro çatlaklar taşınma mekanizmaları yoluyla gerçekleşmektedir (Gaur ve Miller, 1990; Herrera-Franco ve Drzal, 1992; Jones 2001; Ray 2006a; Ray ve Rathore, 2015). Nem emilimi oranı, büyük ölçüde matrisin türüne, elyafların difüzyon yönüne göre yönlendirilip yönlendirilmediğine, suyun sıcaklığına ve bağlı nem oranına bağlıdır (Ishak ve Berry, 1994). Nem absorpsiyonu, plastikleşme ve hidroliz yoluyla matrisin termofiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinde değişikliklere yol açar. Ayrıca, nemin elyaf/matris arayüzü boyunca kılcal kuvvetler yoluyla çekilmesi, elyaf/matris bağına bozmakta ve bu da yapısal bütünlüğün kaybı ile sonuçlanmaktadır. Bu durumdan katmanlararası kesme ve darbe direnci gibi matris esaslı olan özellikler en çok etkilenmektedir (Zheng ve Morgan, 1993; Reifsnider, 2012).

Epoksi sistemlerine absorpsiyon ile giren suyun, epoksi matrisin susever gruplarıyla etkileşime girdiği veya sistemdeki mikroboşluklar içerisinde "serbest su" olarak kümелendiği varsayılır (Haque ve ark., 1991; Robert ve ark., 2010). Bu nedenle kompozit yapılarda su emme davranışı, serbest hacmin özelliklerine ve sistemindeki polar grupların türüne ve konsantrasyonuna bağlı değiştiği düşünülmektedir.

Hidrotermal yaşlanma etkisinden dolayı, epoksi reçinelerin çekme elastisite modülü ve mukavemeti azalmaktadır. Epoksi sisteminin nem difüzyon katsayıları, numunenin kalınlığından bağımsızdır (Lin ve Chen, 2005). Ayrıca emilen nemin, polimerin kırılma mekanizmalarını değiştirebileceği ve yaşlandırılmamış ancak nem bakımından doyurulmuş numuneler üzerinde gevrekten sünek davranışlara geçiş göstermesine sebebiyet verdiği ve doymuş halde iken suyu dışarı atma işlemi

gerçekleştirilen numunelerin ise sünekten gevrek duruma geçtiği bildirilmiştir (Lin ve Chen, 2005).

Vaddadi ve ark. (2003), nemli bir ortamda epoksi tarafından absorbe edilen suyun, epoksinin ana özelliklerinde azalmaya yol açtığını bildirmiştir. Wan ve ark. (2006), hidrotermal ortamdan kaynaklanan bozunmanın çoğu zaman elyaf/matris arayüzüne zarar verdiğini ve şartlandırılan kompozitin mukavemet ve modülünde bir azalmaya yol açtığını ifade etmiştir. Tang ve ark. (2000) tarafından nemin matris çatlamasını hızlandığı ve kompozitlerin yorulma ömrünü azalttığı gösterilmiştir.

Matrisler çevresel şartlandırma ve gerilme korozyonu koşullarına maruz bırakıldığında hâkim olan işgörmezlik, matris çatlak oluşumları mekanizmasıdır. Ancak genelde kompozitin işgöremez hale gelmesine matris çatlamaları neden olmaz çünkü elyafların bozunmasına yol açan kompozitin içine nemin giriş yaptığı izyoludur (Guetta ve ark., 1989; Barkoula, 2013; Wolfrum ve ark., 2014). Ayrıca matris çatlaması, katman ayrılması gibi başka hasarlar için zemin hazırlayıcı olarak görev yapar ve mekanik yorulma, yüzey kırılması, termo-mekanik gerilme, UV maruziyet ve hidrotermal yaşlanma gibi çeşitli çevresel faktörlerin bir sonucu olarak ortaya çıkabilir (Naebe ve ark., 2016). Çatlamalar dolayısıyla matrisin bozunması sonucu sıkça oluşan kompozit işgörmezliği, matris ile elyaf arasındaki arafazlar bölgesinden kaynaklanmaktadır çünkü bu bölgede kompozit fiilen kopmuş durumdadır. Katmanlar arası kesme işgörmezliği, bir matris mekanizması olarak değil genellikle bir arafaz/arayüzey işgörmezlik mekanizması olarak kabul edilir (Doxsee ve ark., 1991; Sethi ve Ray, 2015).

Çevresel koşullandırma; matriste plastikleşmeye, kimyasal değişikliklere ve mekanik bozunmaya bağlı olarak arayüzeyin gerilme iletebilirliğinde azalmaya neden olur. Kimyasal bozunma, bağların hidrolizine sebebiyet verirken mekanik bozunma ise matris yapılarda şişme deformasyonu ile sonuçlanmaktadır. Mekanik bozunma ve nem emme oranı arasındaki kuvvetli ilişki göz önüne alındığında, polimerik malzemelerdeki nem difüzyon işlemini anlamak, hasarın yerini belirlemek,

mekanik bozulmayı analiz etmek ve ETP yapılarının servis ömrünü ve kalan dayanımını tahmin etmek için kullanılmasında büyük önem taşımaktadır.

2.9. Çevresel Şartlandırmanın Elyaf/Matris Arafazına Etkisi

Matris ile takviye elemanı arasındaki bağı oluşturan ve kimyasal formasyonu, bu materyallerden farklı bir bölge olan elyaf/matris arafazı, ETPlerin özelliklerini kontrol etmekte ve bu özelliklerin bozunmasında kritik öneme sahiptir (Kim ve Mai, 1998). Kompozitler için arayüz kimyası ve karakteri hayati önem taşımaktadır çünkü elyaf takviyeli kompozitlerin performansı, büyük ölçüde elyaf/matris arayüzünün özellikleri tarafından belirlenmektedir. Matrislerden takviye elemanına etkili yük transferi sağlamak ve mekanik özelliklerin sürdürülebilirliğini artırmak için iyi arayüzey özellikleri gereklidir. Dolayısıyla kompozit malzemelerin yapısal bütünlüğü, mukavemeti sadece kompoziti oluşturan tabaka mukavemetine değil aynı zamanda arayüz mukavemetine de bağlıdır. Homojen malzemelerden farklı olarak bu malzemelerde arayüzün özgün bir kırılma enerjisi bulunmamaktadır (Bockenheimer ve ark., 2004). Bu nedenle, elyaf/matris arayüzünün mukavemetini uygun hale getirmek için yeni araştırma çalışmaları yapılmaktadır (Bank ve ark., 1995; Sethi ve Ray, 2015; Karger-Kocsis ve ark., 2015).

Elyaf/matris arayüzey kararlılığı üzerindeki çevresel etkilere ilişkin veriler; hem model mikrokompozitler üzerinde yapılan doğrudan test yöntemleri ile hem de reel kompozitler üzerinde yapılan dolaylı test yöntemleri yoluyla toplanmıştır. En yaygın doğrudan test yöntemleri; tekil elyaf basma, elyaf parçalanma, elyaf çekme, mikroindentasyon (veya elyaf itme) ve parça basma testidir (Kim ve Mai, 1998). Dolaylı test yöntemleri, tabakalar arası/tabaka içi özelliklerini ölçmek için genellikle dökme laminat kompozitler kullanılarak yapılır. Bu yöntemler, kısa kırılgan kesme testi, Iosipescu kesme testi, $[\pm 45^\circ]$ S çekme testi, $[10^\circ]$ eksen dışı çekme testi, ray kesme testi, düzlem kaydırma kesme testi ve enine çekme testidir (Kim ve Mai, 1998).

Kompozitlerin mekanik davranışındaki başarı; arayüzeyin, gerilmeleri matristen takviye elyafına aktarabilme kabiliyetine bağlıdır. Bu nedenle elyaf/matris

arayüzü yaşlandırma araştırmaları önem arz etmektedir. Kuru ve hidrotermal ortamlarda elyaf/matris arayüzü performanslarını değerlendirmek için; enine gerilme deneyi (Wood and Bradley 1997; Koyanagi ve ark., 2010), eğilme testi (Koyanagi ve ark., 2010; Haque, 2014; Wang ve ark., 2016a), katmanlararası kesme testi (Park ve ark., 2010; Koyanagi ve ark., 2010; Sun ve ark., 2011), mikro bağ testi (Yu ve ark., 2015), elyaf dağılma testi, tek elyaf kompozit testi ve fiber çekme testi gibi makroskopik mekanik yaklaşımlar sıklıkla kullanılmaktadır (Park ve ark., 2010; Yu ve ark., 2015). Elyaf/epoksi kompozitler suya daldırıldığında, su absorpsiyonu dolayısıyla kademeli şişme etkisine maruz kalır (Wang ve Hahn, 2007; Guermazi ve ark., 2016). Bu hacimsel genişleme kompozitte malzemenin dayanıklılığını düşüren gerilmeler üretir. Arafaz bölgesinde su difüzyonu katsayısı, matrise kıyasla yaklaşık beş kat daha fazladır (Sethi ve Ray, 2015). Matris malzemelerinin neme direnci, kompozitlerin geometrik özelliklerinden etkilenmektedir (Li ve ark., 2014; Yu ve ark., 2015).

Hidrotermal koşullandırmanın, E-cam/epoksi (Gaur ve ark., 1994; Schutte ve ark., 1994; Ray, 2006a; Ramirez ve ark., 2008), E-cam/vinilester (Ramirez ve ark., 2008), karbon/epoksi (Gaur ve ark., 1994; Amer ve ark., 1996; Amer ve Schadler, 1998; Ramirez ve ark., 2008), karbon/vinilester (Ramirez ve ark., 2008), aramid/epoksi (Gaur ve ark., 1994; Cervenka ve ark., 1998; Tanaka ve ark., 2002) gibi çeşitli kompozit materyal sistemlerinde, arayüzeye ilişkin gerilme aktarımını belirgin şekilde etkilediği aktarılmıştır.

Brady ve Porter (1990), bir karbon/polikarbonat (termoplastik) kompozit içinde fiber matris arayüzündeki yapışma (bağlanma) mekanizmasını araştırmış ve tavlamanın kompozitin enine özelliklerinde meydana getirdiği değişiklikleri göstermiştir. Nemli ortamda şartlandırılan aramid/epoksi kompozitlerde, farklı arayüzey uygulama işlemlerinin tabakalar arası kesme mukavemeti üzerindeki etkisi Doxsee ve ark. (1991) tarafından incelenmiştir. Aramid elyaflara ön işlem uygulanması ile tabakalar arası kesme mukavemetinde belirgin bir iyileşme sağlandığı ifade edilmiştir. Bu iyileşmenin, arafaz özelliklerinin geliştirilmesi sonucu oluşan bir durumdan kaynaklandığı belirtilmiştir. Skourlis ve McCullough (1993),

tarafından sıcaklığın karbon/epoksi kompozitlerin arafazları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kütle matrinden farklı mekanik ve termal özelliklere sahip bir arafaz bölgesinin varlığı ve arafazın çevresindeki reçineye göre daha düşük bir camsı geçiş sıcaklığına sahip olduğunu göstermek için tekil elyaf parçalanma testi ve dinamik mekanik analiz testlerini kullanmıştır. Arafazların farklı camsı geçiş sıcaklığına sahip olması sebebiyle, kompozitlerin yüksek sıcaklıklara maruz kalması durumunda arafazların hızlı bir şekilde bozunmasına neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Elyaf ve polimer arasındaki farklı ısıl genleşme katsayıları arayüzde artık gerilmelerin oluşmasına sepeb olur ve bu termal gerilmeler yüzünden kompozitler sıcaklık değişimlerine karşı daha fazla hassaslaşmaktadır (Etches ve ark., 2009). Kompozitlerdeki bu gerilmeler, termoset epoksi reçineyi ve/veya kompozit arayüzey bölgesini zayıflatabilir. Elyaf ve matrisin farklı olarak ısıl genleşmesi, yüksek sıcaklıklarda elyaf/polimer arayüzünde mikro çatlakların oluşmasına neden olabilir (Drzal ve ark., 1983). Bu durum kompozitlerin sağlamlığını etkiler, çünkü kompozit yapılarda termal ve mekanik yüklerin matrinden elyaflara doğru aktarımını sağlayan arayüzdür.

Sıcaklık değişiklikleri, elyaf/matris arayüzündeki gerilme aktarma kapasitesini belirgin şekilde etkileyebilir (Buxton ve Baillie, 1994; Detassis ve ark., 1995; Pegoretti ve ark., 1996). Sıcaklık etkisi, elyaf takviyeleri çevreleyen matris bileşenin camsı geçiş sıcaklığına yaklaştığında arayüz kesme mukavemetinin hızla düştüğü karbon/epoksi mikro kompozitleri üzerine yapılan çalışmalarda parçalanma testi ile ortaya konmuştur (Detassis ve ark., 1995; Pegoretti ve ark., 1996). Amer ve Schadler (1998), karbon/epoksi kompozitlerindeki arayüzey bozulma mekanizmasının çoğunlukla su absorpsiyonu ile başlayan ve matris şişmesi ile gelişen arayüzey gerilmelerine bağlı mekanik bozulmadan kaynaklandığını ifade etmiştir. Öte yandan, arayüzey bozunmasının daha yüksek elyaf hacimsel oranlı kompozitlerde daha düşük hacimsel oranlı kompozitlere ve basma gerilimi altında olan kompozitlerin ise çekme gerilimi altında olan kompozitlere göre daha şiddetli olduğu gözlemlenmiştir.

Sloan ve Talbot (1992), grafit/epoksi kompozitlerde matris/elyaf arayüzünün bozulmasına neden olan tabakalararası kesme mukavemetindeki azalmayı galvanik korozyona bağlamıştır. Elyaf/matris arafazı bağlanmasının gerilemesinin elyaf köprüleme mekanizmalarına bağlı olarak meydana geldiği bildirilmiştir. Basınca maruz kalan grafit kompozitlerde artan nem içeriği, elyaf/matris arayüzü boyunca basınç nedeniyle kılcal akışın artışına bağlanmıştır (Tucker ve Brown,1989). Amer ve ark. (1996), mekanik bozulma mekanizmasının olası tüm hacim fraksiyonlarında ve homojen olmayan elyaf dağılımında çalışabileceğini, ayrıca hem çok yüksek hem de çok düşük elyaf içeriğine sahip bölgelerin çevresel bozulmaya daha yatkın olduğunu Sonlu Elemanlar Metodunu (SEM) kullanarak göstermiştir. Dökme karbon/epoksi kompozitlerden elde edilen deney sonuçlar, SEM sonuçlarını doğrulamıştır ve bu durumda arayüzeydeki bozulmanın tekil elyafli kompozitlere göre daha şiddetli olduğunu göstermiştir.

Kompozitlerde artık gerilmelerin, hem reçinenin hem de fiberin kürlenme sıcaklığından oda sıcaklığına soğutulması sırasında termal olarak büzülmesi ile oluşması beklenir. Artık gerimeler, kompozitlerin mekanik davranışları üzerinde oldukça etkilidir (Koyanagi ve ark., 2010) ve bazen yüklemmeden önce arayüzey ayrılması ve matris mikro çatlakları gibi materyal hasarını başlatacak kadar yüksek olabilmektedir (Zhang ve ark., 2012; Zhao ve ark., 2012).

2.10. Çevresel Şartlandırmanın Kompozit Yapılara Etkisi

Polimer kompozitlerin çevresel ortamlara karşı duyarlılıkları giderek önem arz etmektedir. Bu nedenle, kompozitlerin nem ve/veya yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kalması sonucu özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri araştırmak için önemli çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Wang ve ark., 2016b). Bank ve ark. (1995) çevresel faktörlerin kompozit malzemeler, maruz kalma koşulları, deney teknikler ve işgörmezlik mekanizmalarına etkileri üzerine derleme bir çalışma yapmışlardır.

Karbon elyaf takviyeli plastiklerin (KETP) sulu ortamlardaki çevresel bozunması (Bowles ve ark., 1997; Dao ve ark., 2007a; Wolfrum ve ark., 2009)

üstüne yapılan çalışmalar, yüzeyden içe doğru malzeme boyunca oksijenin difüzyonu nedeniyle özelliklerin değiştiği bildirilmiştir. Nem, malzemenin nem yayınganlığı ile doğru orantılı bir hızda malzemeye girer. Sıcaklığın sabit kaldığı durumlarda, numunenin iç kısmı yavaş yavaş ortam bağıl nemine göre bir denge nem derişimine yaklaşır.

KETPlerdeki yaşlanma mekanizmaları; reçine sistemin nem emme seviyelerine, neme karşı reaksiyonlarına ve aynı zamanda kürleşme kimyasına bağılı olarak değışiklik gösterebilir. Epoksi reçine esaslı kompozitlerde kürleme işlemi tamamiyle gerçekleştirilmemiş ise bu yapıların yaşlanma davranışları, kürlenmiş yapılara göre farklıdır (Xiao ve Shanahan 1997; Xiao ve ark., 1997). Bu da, kısmen kürlenmiş kompozitlerin hızlandırılmış yaşlandırma koşulları ile test edilmesi amacıyla kullanılan yöntemlerin, servis koşullarında görülenlerden çok farklı özelliklere sahip malzeme davranışları gösterebileceğı aktarılmıştır (Dao ve ark., 2007b). Kompozitlerin bozunma yolları elyaf/matris arasındaki etkileşiminden dolayı çok karmaşıktır, ayrıca daha önce de ifade edildiğı gibi sıcaklık ve neme bağımlıdır (Dao ve ark., 2006b).

Kompozitler, özellikle yüksek sıcaklıklarda sade reçine veya tekil elyaflı kompozitlerden daha fazla su alır ve bu durumda elyafların matristen ayrılmasının daha belirgin olduğı ve lokalize su tutulmasına neden olduğı görülür (Apicella ve ark., 1982). Su absorpsiyonunun polimer özelliklerine etkisi, birçok çalışmada araştırılmış ve bu etkilerin; plastikleşme, camsı geçiş sıcaklığında azalma, sürünme ve gerilme gevşemesinde artış ve mekanik mukavemette ve elastik modülde azalma gibi neticeleri kapsadığı bildirilmiştir (Dao ve ark., 2006a; Tian ve Hodgkin 2010). Kompozit yapılardaki emilen nem, epoksi reçine yapısında reaksiyona girmemiş gruplarla reaksiyona girebilir ve bu nedenle yaşlanma sürecini etkileyebilir (Dao ve ark., 2006b).

KETPlerin nemli ortamda veya suya daldırarak şartlandırması, malzeme özelliklerinde hem tersinir hem de tersinmez değışimlere neden olur. Matris elemanı tarafından absorbe edilen nem miktarı, takviye elemanı tarafından emilen nem

miktarından önemli derecede farklıdır. Havacılık uygulamalarında kullanılan epoksi reçineleri, tam doyuma kadar ağırlıkça yaklaşık % 5-6 oranında nem absorpsiyonu gerçekleştirmektedir (Mangalgiri, 1999). Kompozit yapıda neme bağlı genişleme ile beraber oluşan gerilmenin varlığı, matrise ait olan özellikleri bozabilir ve bu durum yapısal stabilite üzerinde olumsuz bir etkiye sebep olabilir. Ayrıca sıcaklık arttıkça kompozitlerin nem absorpsiyon oranı ve delaminasyon başlangıcının ortaya çıkmasının da o kadar yüksek olacağı bildirilmiştir (Joshi 1983; Lai ve Young 1995; Selzer ve Friedrich, 1995; Ogi ve Takeda, 1997; Wood ve Bradley, 1997; Asp 1998; Chou ve Ding, 2000; Wang ve ark., 2002; Botelho ve ark., 2006, 2007; Ray 2006a). Arayüzey yapışma özellikleri ve bozulması, şartlandırmanın sıcaklığına ve süresine bağlıdır. Nem absorpsiyonu sırasında, elyaf/matris arayüzün zayıflaması (Joshi 1983, Selzer ve Friedrich, 1995; Botelho ve ark., 2006; Ray 2006a), matrisin plastikleşmesi ve şişmesi hatta bazı durumlarda yumuşaması (Selzer ve Friedrich, 1995) gibi bazı mekanizmalar oluşmaktadır. Literatürde polimer matrisli kompozitlere nem nüfuzu ile olumsuz etkilenen özellikler; rijitlik (Ogi ve Takeda, 1997; Chou ve Ding, 2000), arayüzey mukavemeti (Wood ve Bradley, 1997), tabakalar arası arayüzey kararlılığı (Joshi 1983; Selzer ve Friedrich, 1995; Asp 1998; Wang ve ark., 2002; Botelho ve ark., 2006, 2007; Ray 2006a) ve sönüm oranı (Lai ve Young, 1995) olarak sıralanabilir.

Wright (1981), nem içeriğinde meydana gelen %1'lik bir artışın Tg'de yaklaşık 20°C'lik bir düşüşe neden olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca farklı reçineler için tam doygunlukta su absorpsiyon miktarının birbirlerine göre farklılık gösterebileceğini ve belirli bir reçine için kürleşme döngüsündeki değişikliklerin ise su absorpsiyonunda farklılıklara neden olabileceğini belirtmiştir. Joshi (1983), nem oranının tek yönlü laminatlarda tabakalararası kesme mukavemetine ve ($\pm 45^\circ$) karbon elyaf takviyeli epoksi reçine laminatlarda ise çekme mukavemetine olan etkisini incelemiştir. Hidrotermal koşullandırmada başlangıçta çekme mukavemetinde bir artış gözlenirse de bu şartlandırmaya daha fazla maruz kalınmasının ($\pm 45^\circ$) laminatın çekme mukavemeti üzerinde zararlı etkilere neden olduğu aktarılmıştır. 130°C'de ağırlıkça %1 nem emilimine bağlı olarak çekme mukavemetindeki kayıp %35 olarak bildirilmiştir. Kevlar 49, AS4 karbon ve E-cam elyaflarının Epon 828 termoset

reçinesine ile oluşturulan kompozitlerinde, 88°C de 24 saat boyunca suda şartlandırılmada nem absorpsiyonunun tersinmez bir şekilde %36 ile 46 oranında arttığı gözlenmiştir. Bu durum hidrotermal şartlandırmada, elyafların ve reçinelerin çeşitli kombinasyonları için farklı olabileceğini ortaya koymuştur (Gaur ve ark., 1994).

Sıcaklık ve nemin, karbon/epoksi 0°, 90° ve (0°/±45°/90°) laminatların elastik modülü ve mukavemeti üzerindeki etkileri, Shen ve Springer, (1977a; 1977b) tarafından araştırılmıştır. 0° ve (0°/±45°/90°) karbon/epoksi sistemlerin şartlandırılmasında kuru halden tam doygunluğa ulaşana kadar elastik modülde çok az değişiklik oluyorken bu kompozitlerin çekme mukavemeti, nem içeriği %1'in altında olduğu zaman nem etkileri önemsiz gibi gözükmemektedir ancak nem içeriği %1'in üzerine çıkınca çekme mukavemeti azalmakta, nem içeriği oranı arttıkça maksimum % 20'lik bir azalma bildirilmiştir.

Karbon/epoksi kompozitleri; hidrotermal yaşlanma (Chiou ve Bradley, 1995; Wood ve Bradley, 1997; Shan ve Liao, 2002; Kootsookos ve Mouritz, 2004; Wan ve ark., 2005; Ray, 2006a; Botelho ve ark., 2006; 2007, Wang ve Hahn, 2007; Candido ve ark., 2008; Karbhari ve Ghosh, 2009; Karbhari ve Xian, 2009), UV radyasyonu (Nakamura ve ark., 2006), donma koşullarına maruz bırakılma (Karbhari ve Ghosh, 2009) veya aşırı ısıtma (Siddiqui ve ark., 2013) gibi bazı ortamlarda şartlandırılmıştır. Wang ve Hahn (2007), KETP hidrotermal şartlandırmanın kompozit arayüzeyine olan etkisini karakterize etmek için Atomsal Kuvvet Mikroskopunu kullanarak bir araştırma yapmıştır. Bu işlemin elyaf ve matris arasında, nemin emilmesi yoluyla matrisin şiştiğini ve bununla beraber elyaf/matris arayüzünün mekanik kuvvete ve ısı işleme karşı korunmasız olduğunu bildirmiştir.

Literatürde nemin Tg üzerine etkisi hakkında farklı eğilimler bildirilse de birçok çalışma neme maruz kalma ile Tg nin azaldığını aktarmıştır (Weitsman 1991; Li ve ark., 2001; Zafar ve ark., 2012). Maggana ve Pissi (1999), epoksi kaplamalarda sıcaklık 20°C nin altındayken su difüzyonunun Fickian (Kompozit malzemede nem içeriği değişiminin, zamanın karekökünün bir fonksiyonu olarak ifade eden

yaklaşım) olmayan bir davranış gösterdiğini ifade etmiştir. Bu nedenle, farklı sıcaklıklarda kullanılacak olan polimerlerin uygulama öncesi difüzyon özelliklerinin bilinmesi önem taşımaktadır. Ayrıca Zhou ve Lucas (1999a, 1999b) ve Papanicolaou ve ark. (2006) tarafından bu absorpsiyon durumunun tersi bildirilmiştir. Çalışma bulgularına göre; Tg'deki değişimin yalnızca epoksi reçinelerde emilen su içeriğine bağlı olmadığı ve Tg'nin malzemelerin hidrotermal geçmişine bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca normal koşullarda nemin plastikleştirici etkisinden dolayı Tg'de bir düşüş beklenirken malzemenin yüzeyinden merkeze doğru gidildikçe kompozitin Tg değerinde belirgin bir artış olduğunu tespit edilmiştir. Yüzey oksidasyonunun neden olduğu moleküler zincir sertleşmesi, bu durumun muhtemel nedeni olarak bildirilmiştir (Tian ve Hodgkin, 2010).

Hidrotermal şartlandırma altındaki karbon/epoksi kompozitlerde statik ve yorulma mukavemetinde meydana gelen azalmalar incelenmiştir (Ray ve Rathore, 2014). Üretim sırasındaki yatırma şekline ve sırasına bağlı olarak dokunmuş laminatlar için maksimum statik taşıma mukavemetinin % 8 ila % 22 oranında azaldığı aktarılmıştır. Hidrotermal şartlandırma koşullarının elastik modül ve mukavemet değerlerinin yanı sıra, yorulma direnci (Chiou ve Bradley, 1995; Shan ve Liao, 2002), tabakalar arası kesme mukavemeti (Botelho ve ark., 2006; Ray 2006a), sönümleme davranışı (Botelho ve ark., 2007) vb. gibi karbon/epoksi kompozitlerin diğer önemli mekanik özelliklerini de etkilediği vurgulanmıştır.

Shan ve Liao (2002), cam/karbon hibrit kompozitlerin cam kompozit numunelerine göre yorulma ömrünü daha iyi muhafaza ettiğini gözlemlemişlerdir. Bu nedenle, cam/epoksi kompozitlerin çevresel yorulma bozunmasına karşı direnci uygun bir miktar karbon elyaf ile hibridizasyonu ile önemli ölçüde artırılabilir. Akay ve ark. (1997), kevlar 49 elyaf takviyeli epoksi matrislerden oluşan bir dizi laminat sisteminin nem altındaki statik ve dinamik yük altındaki pim yatakların termal ve mekanik davranışını araştırmışlardır.

Şartlandırma faktörü olarak sıcaklık, polimer kompozitlerdeki nem emilimi/toplama kinetiğini karmaşık bir biçimde etkilemektedir (Ray ve Rathore,

2015). Elyaf takviyeli polimer kompozitlerdeki nem içeriği dengesinin sıcaklığa bağlı olduğu veya sıcaklığa bağlı olmadığı durumlar gözlemlenmiştir (Ray ve ark., 1991; Ray ve ark., 2006). Kompozitlerde su absorpsiyonu nadiren homojen bir dağılım gösterir ve yapıdaki homojen olmayan bu nem dağılımı yüzünden su emilimine bağlı olarak farklı iç gerilme dağılımları oluşabilir (Ray ve ark., 2006b; Ray ve Rathore, 2014).

Termal oksidasyon, organik reçine sistemlerini matris malzemesi olarak kullanan ETPLerde görülen tersinmez bozunma mekanizmalarından biridir. Yeterince yüksek sıcaklıklarda şartlandırılmış reçinede bozunmaya neden olduğu bildirilmiştir. Karbon elyaflar, polimer matrislere göre daha fazla oksidasyona dirençlidir ancak oksidasyon işleminden elyaf/matris arayüzünün özellikleri etkilenir ve kompozitin oda sıcaklığında mekanik mukavemet özelliklerinde bir azalma olması beklenir (Schoeppner ve ark., 2008; Barkoula, 2013). Oksidasyonun Tg üzerindeki etkisi polimer yapısına bağlıdır. Bu durumun nedeni, birbiri ile etkileşimli yapısal bütünlüğü etkileyen kimyasal ve fiziksel yaşlanma olgusu veya oksidasyon reaksiyonu mekanizmalarındaki farklılıklar olabilir (Schoeppner ve ark., 2008). Oksidasyona maruz kalan kompozitlerin özelliklerinde belirgin kayıplar oluşmaktadır. Malzemenin mukavemetinde ciddi düşüşler olabileceği gibi aynı zamanda malzeme yüzeyinin gevrekleşmesi ve çatlakların oluşması nedeniyle malzemenin darbe mukavemetinde düşüş görülebilir. Bu nedenle aşırı ısınma koşullarına maruz kalan KETPLer çok kısa süre içerisinde tersinmez ve yıkımsal zarar görebilirler (Barkoula, 2013). Yaşlanma sürecinde sıcaklığın, genel olarak kompozit matrisin yüzeyinde bozunma kimyası üzerinde büyük bir etkisi olabileceği vurgulanmıştır. Ancak, meydana gelen kimyasal değişikliklerin doğru bilgisi olmaksızın hızlandırılmış mekanik özellik ve yaşlandırma çalışmaları yanıltıcı olabilir (Dao ve ark., 2006a).

Sivil, denizcilik, savunma ve ticari sektör uygulamaların birçoğunda yaygın kullanım alanı bulan E-cam/doymamış polyester ve E-cam/vinilester reçine kompozitlerinin, değişken ortamlarda minimum denetim ve bakım ile servis ömrünü tamamlaması beklenir (Karbhari, 2006). Bu nedenle, E-cam elyaf takviyeli

doymamış polyester (Springer ve ark., 1980; Apicella ve ark., 1982; 1983; Ghorbel ve Valentine 1993; Huang ve Sun, 2007; Cerný ve Mayer, 2010) ve vinilester (Springer ve ark., 1980; Chu ve ark., 2004; Karbhari ve Wang, 2004; Karbhari, 2006; Helbling ve Karbhari, 2008; Bazli ve ark., 2016) reçineleri ile güçlendirilmiş kompozitlerin çevresel kararlılığı üzerine birçok araştırma yapılmıştır.

Dewimille ve Bunsell (1983), cam elyaf/epoksi kompozitlerin suda hızlandırılmış olarak yaşlandırılmasını araştırmıştır. Suda yaşlandırmanın, tersinir veya tersinmez ve termal olarak etkinleştirilmiş çeşitli hasar ve absorpsiyon mekanizmalarına neden olabileceği gözlemlenmiştir. Daldırma sıcaklığı arttıkça, absorbe edilen su miktarı ile aynı zamanda üretilen hasar derecesinde de büyük ölçüde bir artışa neden olduğu ve su emiliminin matris çatlaması, elyaf gerilme aşınması ve elyaf/matris ayrılması gibi hasar mekanizmalarından birine veya kombine etkilerine sebep olabileceği aktarılmıştır. Bu mikro hasar mekanizmaları cam/epoksi kompozitlerin rijitliğinde (Kootsookos ve Mouritz, 2004; Botelho ve ark., 2005a; Stocchi ve ark., 2006) ve çekme ve eğilme mukavemeti (Chateauminois ve ark., 1993; Kootsookos ve Mouritz, 2004; Stocchi ve ark., 2006), dinamik yorulma direnci (Shan ve Liao, 2002; Jones, 2003), statik yorulma (sürünme) kararlılığı (Chateauminois ve ark., 1993), darbe direnci (Strait ve ark., 1992; Stocchi ve ark., 2006), ve tabakalararası kayma mukavemeti (Gautier ve ark., 1999; Ray, 2006a) gibi nihai dayanım özelliklerinde eşzamanlı olarak belirgin bir azalmaya neden olmaktadır. Sethi ve Ray (2014), termal ve dondurucu ortamlarda cam elyaf/epoksi kompozitlerin farklı yükleme hızlarındaki işgörmezliğini incelemiştir. Her bir yükleme oranı aralığında, ortam sıcaklığının üstündeki test koşullarında ısıl şartlandırma etkisinden dolayı matris reçinesi işlem bölgesi yayılmış ve bu durum elyaf/matris ayrılmasına yol açarak katmanlararası kesme mukavemetinin azalması ile sonuçlanmıştır.

Dış ortam; nem, asit yağmuru, sıcaklık döngüsü gibi organik polimerlere zarar veren birkaç unsurun yanında UV radyasyonunu da içermektedir (Shokrieh ve Bayat, 2007). Özellikle kompozit yapılarda polimer matrisler için ısı ve nem gibi çevresel şartlandırılmanın yanı sıra UV bozunma da önem kazanmaktadır. UV radyasyon

şartlandırması, UV ve oksijenin kombine etkisini gerektiren karmaşık bir süreç ile oluşmaktadır. Güneş spektrumundan UV ışık ile atmosferik oksijenin birleşmesi sonucu gerçekleşen yaşlandırma foto-oksidasyon olarak adlandırılmakta ve bu reaksiyonlar, polimerlerin UV ışınlarına maruz bırakılması sırasında gerçekleşmektedir. Bu durum, moleküllerde zincir kesilmesi veya zincirin çapraz bağlanması sonucu kimyasal yapıyı değiştirmekte ve malzemede bozulmaya/yozlaşmaya neden olmaktadır (Rabek, 1995; Awaja ve ark., 2011). Shokrieh ve Bayat (2007), UV radyasyona maruz kalan polyester reçineli kompozitlerin yaşlandırmasını incelemiş ve şartlandırma sonucunda ortalama kırılma uzamasında, kopma mukavemetinde ve çekme modülünde düşüş olduğunu aktarmıştır. Tek yönlü Kevlar-49 epoksi laminatın her iki yüzeyinde UV maruziyetinden sonra mukavemet muhafaza oranının ciddi oranda azaldığı bildirilmiştir (Liau ve Tseng, 1998). Dolayısıyla, UV radyasyonuna uzun süre maruz kalan kompozitlerin tabakalar arası kayma mukavemeti, eğilme mukavemeti ve eğilme rijitliği gibi matris hakim özellikleri ciddi şekilde bozunmaktadır (Liau ve Tseng, 1998; Kumar ve ark., 2002; Rosu ve ark., 2008, 2009; Naebe ve ark., 2016). UV bozunma mekanizması, materyallerde sarı renk değişikliği ve mekanik bütünlüğün kaybı şeklinde aynı anda iki şekilde devam eder. UV bozunumunda hasar, ışık fotonlarının polimer yapılarını oluşturan moleküler zincirlerle etkileşime girmesi ile meydana gelmektedir (Shokrieh ve Bayat, 2007; Awaja ve ark., 2016).

Polimer matris kompozitlerin radyasyon şartlandırması üzerine birçok çalışma bildirilmiştir ancak UV radyasyonu ile diğer çevre koşullarının kombine etkileri ile ilgili çalışmalar sınırlıdır. Nem difüzyonu ve UV ışınları ile şartlandırmanın karbon elyaf takviyeli termoset matrisli kompozitler üzerine olan etkilerine ilişkin bazı araştırmalar yapılmıştır (Suh ve ark., 2001; Whitcomb ve Tang, 2002; Wan ve ark., 2002). UV radyasyon ile nem difüzyonu kombine şartlandırılması özellikle matrisin bozunma sürecini önemli ölçüde hızlandırabilir. Kumar ve ark. (2002), UV radyasyonu ve yoğunlaşmanın kombine şartlandırması ile fizikokimyasal bir işlem yoluyla epoksinin erimesi sebebiyle her iki materyalde kütle kaybı olduğunu bildirmiştir. Bu nedenle, hem UV radyasyonu hem de su buharı yoğunlaşmasına çevrimsel maruz kalma, sürekli bir malzeme bozulması ve erozyon sürecine yol

açmaktadır (Singh ve ark., 2010). Woo ve ark. (2007), nem varlığının serbest radikaller ve iyonların hareketliliğini arttırması yoluyla UV radyasyonunun foto-oksidadif etkilerini artırabileceğini öne sürmüştür. Lu ve ark. (2016), UV radyasyonu ve su yoğunlaşmasının sinerjik kombine etkilerini açıklayan bir model önermiştir.

Abdel-Magid ve ark. (2003), E-cam epoksi kompozitlerinin oda sıcaklığı ve 50°C'de çekme ve eğilme sürünme davranışını araştırmıştır. Sıcaklık artışı ile hem çekme hem de sürünme dayanımlarının azaldığı bildirilmiştir. Ellyin ve Rohrbacher (2000), E-cam/epoksi kompozit laminatların ortam ve yüksek sıcaklıktaki distile suda şartlandırılmasından sonra çekme testleri uygulayarak çevresel dayanıklılığını araştırmıştır. E-cam/epoksi kompozitlerinin ortam sıcaklığında damıtılmış suya daldırılmasının çekme özellikleri üzerinde önemsiz etkilere sahip olduğu belirtilmiştir.

Abdel-Magid ve ark. (2005), E-cam/epoksi kompozitlerin çekme özelliklerini oda sıcaklığı ile 65°C'de damıtılmış suda şartlandırılmasından sonra çeşitli zaman periyotlarında değerlendirmiştir. Buna göre, oda sıcaklığında uygulanan gerilme ve nem şartlandırmasının mukavemet ve şekil değiştirme özelliklerinde belirgin bir azalma sergilediğini göstermiştir. Kajorncheappunngam ve ark. (2002), damıtılmış su ve doymuş tuz çözeltisi içinde farklı sıcaklık ve maruz kalma sürelerinde şartlandırılmış E-cam/epoksi kompozit numunelerin mekanik dayanıklılığını çekme testleri uygulayarak araştırmıştır. Her iki sıvı ortamda şartlandırılan E-cam/epoksi kompozit numunelerin çekme mukavemetlerinde, sıcaklık artışı ile beraber elyaf/matris ayrılması ve matris çatlamasının neden olduğu azalmalar gösterdiği bildirilmiştir. Ellyin ve Maser (2004), nem emiliminin ve yüksek sıcaklık maruziyetinin cam elyaf takviyeli kompozit tüplerin mekanik özelliklerine etkilerini araştırmış ve artan su sıcaklığına bağlı olarak cam elyaf arayüzünde hasarlar oluştuğunu gözlemlemiştir. Helbling ve Karbhari (2008), E-cam/vinilester kompozitinin hidrotermal şartlandırma ile çeşitli gerilme ve sıcaklık seviyeleri altında eğilme şekil değiştirme davranışını araştırmıştır. Kompozitteki difüzyon davranışının Langmuir (adsorplanan maddenin isothermal koşullarda bir ideal gaz gibi davrandığını ifade eden başka bir model) tipi olduğunu ve daldırma süresince

sıcaklık arttıkça çekme mukavemetinde azalmalar olduğunu bildirmiştir. Rao ve ark. (2014), farklı çevre koşullarına maruz bırakılan cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerinin sabit sıcaklıktaki suya 60 gün boyunca maruz bırakılması ile mekanik mukavemetinde (çekme ve eğilme modülü) belirgin bir azalma olduğunu aktarmıştır. Deroine ve ark. (2014), deniz suyuna nazaran damıtılmış suda daha sert bir bozulma olmasına rağmen yaşlandırma sıcaklığının, mekanik özellik değişikliklerini etkileyen ana parametre olduğunu bildirmiştir. Garcia-Espinel ve ark. (2015), cam elyaf/epoksi kompozit malzemenin deniz suyu ortamındaki mekanik bozunmasının önem taşıdığını ancak, kompozitlerin nem doygunluğuna eriştikten sonra eğilme ve çekme mukavemeti değişikliklerinin dengelendiğini ifade etmiştir.

Literatürde cam/epoksi (Dewimille ve Bunsell, 1983; Strait ve ark., 1992; Chateauminois ve ark., 1993; Wood ve Bradley, 1997; Shan ve Liao, 2002; Kootsookos ve Mouritz, 2004; Ray, 2006a; Stocchi ve ark., 2006; Karbhari ve Ghosh, 2009), karbon/epoksi (Shen ve Springer, 1977a; 1977b; Wood ve Bradley, 1997; Shan ve Liao, 2002; Wang ve Hahn, 2007; Kootsookos ve Mouritz, 2004; Wan ve ark., 2005; Nakamura ve ark., 2006; Ray, 2006a, Botelho ve ark., 2006; Candido ve ark., 2008; Karbhari ve Xian, 2009; Karbhari ve Ghosh, 2009), ve aramid/epoksi (Allred 1981; Haque ve ark., 1991; Doxsee ve ark., 1991; Gaur ve ark., 1994; Cervenka ve ark., 1998; Minoshima ve ark., 2000; Tanaka ve ark., 2002; Imielińska ve Guillaumat, 2004) gibi epoksi esaslı yapısal kompozitlerin çevre koşullara olan direnci, farklı takviye edici elyafların kompozit kombinasyonuna göre oldukça geniş kapsamlı olarak araştırılmıştır.

2.11. Çevresel Şartlandırmanın Kompozitlerin Dinamik Özelliklerine Etkisi

Kompozitlerin dinamik karakteristikleri, malzeme özellikleri ve servis performansının doğru bir kombinasyonunu elde etmek için dikkate alınması gereken hususlardan biridir. Bir sistemin kararlılığını etkileyebilecek sakıncalı titreşimlerin sebep olabileceği yapısal hasarlardan kaçınmak için o sisteme ait doğal frekanslar (rezonansın engellenebilmesi için), mod şekiller (yapıya ait en esnek noktaları

güçlendirmek veya ağırlığı azaltmak) ve sönüm oranları belirlenmesi gereken özelliklerdir.

Tabakalı kompozitler ve sandviç yapılar, ağırlıklıklarına oranla yüksek mukavemet ve rijitlik değerleri nedeniyle havacılık, taşımacılık, inşaat ve diğer mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tabakalı kompozit yapıların titreşim karakteristikleri, nem absorpsiyonu ve sıcaklığa bağlı olarak çeşitli çevresel koşullardan önemli ölçüde etkilenmektedir. Yapıların servis ömrü sırasında termal çevreye maruz kalması halinde ortamda bulunan termal yükler, yapılarda termoelastik gerilmelerin oluşmasını başlatacak ve bu durum yapıların titreşim karakteristiklerini etkileyecektir. Bu koşullar altındaki malzemeler, çatlakların oluşması ve yayılımından ötürü ortaya çıkan yüksek gerilmeler nedeniyle tersinmez şekilde zarar görürler. Uygulamaya bakılmaksızın polimerik yapılar içerisinde çatlaklar olduğu vakit, yapının bütünlüğü tehlikeye girmektedir. Çevresel şartlar yüzünden indüklenen mikro çatlaklar, polimer kompozitlerinde eskiden beri süregelen bir sorundur. Çatlaklar, elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik olarak bozulmasına/yozlaşmasına yol açar (Talreja, 1989). Su absorpsiyonunun bir sonucu olarak termoset polimerlerin mekanik özelliklerinde hem tersinir hem de tersinmez değişiklikler ortaya çıkmaktadır (Ray, 2006a). Bu nedenle, potansiyel yaşlanma ortamlarındaki tabakalı kompozitlerin ve sandviç plakaların titreşim karakteristiklerini doğru bir şekilde ön görmek ve anlamak, bu yapıları verimli bir şekilde tasarlamak ve servis ömrü boyunca kullanmak için önemlidir. Bu nedenle, farklı yaşlandırma ortamına maruz bırakılan tabakalı kompozit yapıların titreşim karakteristiklerinin bilinmesi, bu tür materyallerin yapısal davranışlarının tahmini ve anlaşılması açısından uygulamada önem arz etmektedir.

Tauchert (1991), sıcaklığa maruz kalmış kalın plakların titreşimi üzerine yapılan araştırmaları derlemiştir. Ram ve Sinha (1992), sıcaklık ve nemin tabakalı tek yönlü kompozit plakaların doğal frekanslarının değişimini üzerine olan etkilerini SEM kullanarak basit mesnetli ve sabitlenmiş sınır koşulları için incelemiştir. Ayrıca Liu ve Huang (1996), sıcaklığa maruz bırakılmış tabakalı kompozit plakaların doğal frekanslarını sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak araştırmıştır. Patel ve ark.

(2002), hidrotermal şartlandırma için kompozit laminatların titreşim karakterisitiklerini SEM ile araştırmıştır. Huang ve ark. (2004), hidrotermal ortamlardaki lamine plakaların doğrusal olmayan titreşim ve dinamik davranışlarını incelemek için yüksek dereceli kayma deformasyonu teorisini kullanmıştır. Rao ve Sinha (2004), sıcaklık ve nemin tabakalı kompozitlerin serbest titreşim ve geçici davranışlarına olan etkilerini üç boyutlu sonlu elemanlar analizi kullanarak sunmuştur. Abot ve ark. (2005), dokunmuş elyaf karbon/epoksi kompozitlerin nem emme sürecini ve viskoelastik özelliklere etkisini deneysel olarak bildirmiştir. Shiau ve Kuo (2006), termal olarak buruşturulmuş sandviç plakaların serbest titreşim analizi için her düğümde, 24 serbestlik derecesine sahip üç düğümlü üçgen plaka elemanı geliştirmiştir. Matsunaga (2007), termal yük altındaki tabakalı kompozit sandviç plakaların serbest titreşim özelliklerini kuvvet serisi açılımı yöntemi ile sunmuştur. Pradeep ve Ganesan (2008), çok tabakalı dikdörtgen viskoelastik sandviç plakaların termal burkulma ve titreşim karakteristiklerini araştırmıştır. Lo ve ark. (2010), değişen hidrotermal ortam koşullarında malzeme özelliklerine ilişkin olarak tabakalı kompozit plakaların davranışlarını incelemek için global ve yerel yüksek mertebe teorisini önermiştir. Jeyaraj ve ark. (2011), harmonik uyarılmaya maruz bırakılmış laminat kompozit plakalar ve çok tabakalı viskoelastik sandviç plakalarda, sıcaklığın titreşim ve akustik davranış karakterisitikleri üzerine etkisini incelemek için klasik laminat kuramına dayanan dört düğümlü dörtgen bir levha eleman kullanmıştır. Rath ve Sahu (2012), dokunmuş elyaf tabakalı kompozit plakaların hidrotermal ortamda serbest titreşim analizini gerçekleştirmek için birinci mertebeden kayma deformasyon teorisine dayanan sekiz düğümlü izoparametrik plaka elemanını uygulamıştır. Fazzolari ve Carrera (2013a), termal ortamlardaki sandviç plakaların serbest titreşim analizini yapmak için bir hiyerarşik trigonometrik Ritz formülasyonunu kullanmıştır. Fazzolari ve Carrera (2013b), anizotropik kompozit plakaların burkulma öncesi/sonrası durumundaki titreşim davranışlarını incelemiştir. Natarajan ve ark. (2014), nem konsantrasyonu ve termal koşulların tabakalı kompozit plakaların serbest titreşim ve burkulma karakteristikleri üzerindeki etkisini incelemek için birinci mertebeden kayma deformasyon teorisine dayanan genişletilmiş bir sonlu elemanlar yöntemi kullanmıştır. Li ve Li (2015), termal ortam etkisini göz önüne alarak dikdörtgen tabakalı plakanın titreşim ve ses radyasyonu

karakteristiklerini incelemek için analitik çalışmalar yürütmüştür. Cui ve Hu (2016), homojen şekilde ısıtılmış ince dikdörtgen levhaların tutma-bırakma-durma sınırları için termal burkulma ve doğal titreşimi cevaplarını incelemiştir.

Burada verilen çalışmaların büyük bölümü, hidrotermal ve termal ortamlara maruz bırakılan tabakalı kompozitlerin titreşim karakteristiklerinin nümerik analizi ile ilgilidir. Bununla birlikte, yaşlandırılmış tabakalı kompozitlerin titreşim özellikleri konusunda deneysel çalışmalar literatürde nadirdir. Tabakalı kompozit plakaların doğal frekansları Anderson ve Nayfeh (1996) tarafından deneysel modal analiz kullanılarak belirlenmiş ve SEM sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Chakraborty ve ark. (2000), kompozit elyaf takviyeli polimer plakalarının serbest titreşimini SEM kullanılarak modal parametrelerin çıkarıldığı ilgili frekans tepki fonksiyonlarını belirlemek için kombine bir deneysel ve nümerik çalışma bildirmiştir. Chaudhuri ve ark. (2005), ince anizotropik elyaf takviyeli plastik dikdörtgen plakaların serbest titreşimleri üzerine kombine bir teorik ve deneysel araştırma sunmuştur. Botelho ve ark. (2005b), hidrotermal şartlandırma sırasında cam/epoksi kompozitlerin bazı viskoelastik özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. Botelho ve ark. (2007), depolama modülü (viskoelastik bir malzemenin enerjiyi koruma kapasitesi) ve modül kaybı gibi bazı viskoelastik özelliklerdeki değişikliği belirlemek için nem absorpsiyonunun karbon elyaf/epoksi laminatların sönümleme davranışı üzerinde çalışmıştır. Zai ve ark. (2009), nem emilimi etkisinin karbon/epoksi kompozit kırıx numunelerinin sönümleme oranı ve dinamik rijitliğini deneysel olarak ölçmüştür. Hidrotermal ortamda tabakaları ayrılmış dokunmuş elyaf kompozit plakaların serbest titreşim davranışı üzerine nümerik ve deneysel çalışmaları Panda ve ark. (2013) tarafından bildirilmiştir.

Literatür dikkate alındığında, kompozit malzemelerin bozunma davranışlarını etkileyen birçok çevresel koşul bulunmaktadır ve bu koşullardan en yaygın olarak araştırılanlar ise sıcaklık, nem, UV radyasyonu ya da bu koşulların kombine etkisidir. Öte yandan literatürde genel olarak hızlandırılmış yaşlandırma yöntemlerinin mekanik özellikler üstüne olan etkisi çokça çalışılmış iken dinamik özelliklere olan etkisi ise daha az çalışma konusu olmuştur. Bu nedenle bu tez çalışmasında, doğal

yaşlandırma koşullarından nem, sıcaklık ve bu iki koşulun kombine etkisi göz önüne alınmıştır. Ayrıca belirlenen doğal yaşlandırma koşullarının dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin doğal frekans ve sönümleme özellikleri üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Dolayısıyla bu çalışmada kompozitlerin yaşlandırılması hususunda literatürden farklı olarak daha az çalışılmış olan doğal yaşlandırma koşullarının etkisi ve dinamik parametrelerin değişimi incelenmiştir.

2.12. Yaşlandırılmış Kompozitlerin Literatürü için Sonuç Tespitleri

Polimerlerin yaşlanması 3 kategori altında incelenmektedir. Bu kategorilerinden biri olan fiziksel yaşlanma, moleküllerin yapısal bütünlüğünün değişmeden maddenin biçim/şekil yapısında meydana gelen değişikliklerle karakterize edilebilir (Odegard ve Bandyopadhyay, 2011). Bu nedenle bu yaşlanma sürecinin etkileri tersinirdir. Fiziksel yaşlanma, malzemeye ait Tg'nin altındaki yüksek sıcaklıklarda uzun süre şartlandırılması sürecinde oluşabilir. Kimyasal yaşlanma ise; zincir kesilmesi, çapraz bağlanma yoğunluğunda değişiklikler, oksidasyon ve depolimerizasyon gibi mekanizmaların neden olduğu moleküler yapının tersinmez bir şekilde bozulması ile oluşmaktadır. Çoğu şartlandırma uygulamasında bu iki yaşlanma durumu (fiziksel ve kimyasal) kombine bir şekilde sisteme etki etmektedir (Barbosa ve ark., 2017). Öte yandan mekanik bozunma mekanizmaları, makroskopik ölçekte görülebilen tersinmez işlemlerdir.

Elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri matris ve elyaf yüzeyleri arasındaki arayüzey/arafaz bölgesinin kararlılığına bağlıdır. Bir kompozitin bağ mukavemeti; sıcaklık, nem ve malzemenin maruz kaldığı gerilme durumu gibi faktörlerden etkilendiği için arafazın çevresel dayanıklılığı kompozit malzemelerin servis ömrünü tamamlaması için hayati derecede önemlidir (Jones, 2001). Kompozitlerde arayüzey etkileşiminin kalitesi, yapışma bağlantısına ve arayüzdeki kusurların varlığına şiddetle bağlıdır. Arayüzey yapışması, büyük ölçüde moleküler arayüz yapılarına ve etkileşimlerine bağlıdır (Sethi ve Ray, 2015). Çevresel maruziyet, matris plastikleştirilmesi gibi etkisi sebebiyle arayüzeyin gerilme aktarımında düşüşe, kimyasal değişikliklere ve mekanik bozulmaya neden olur.

Kimyasal bozunma, arayüzey bağının hidrolize olmasına neden olurken mekanik bozulma ise matris şişmesi/kabarmasına bağlı olarak deformasyona sebep olur. Arayüzeyde meydana gelen bu reaksiyonlar elyaf/polimer arayüzünde çeşitli morfolojik değişiklikler meydana getirebilir (Doxsee ve ark., 1991; Sloan ve Talbot, 1992).

Su molekülleri, bir proton ve bir hidroksil iyonu verecek şekilde kolayca çözündükleri için fazlasıyla reaktif bir yapıdadır ve ETP kompozitlerinde tersinir ve tersinmez fiziksel ve/veya kimyasal değişikliklere neden olabilirler. Bu değişiklikler arasında; matrisin plastikleştirilmesi ve hidroliz edilmesi, polimer zincir kırılmasına bağlı moleküler bozulma, şişme/kabarmadan kaynaklı iç gerilmeler, ozmoz nedeniyle çatlak oluşumu veya çatlak ilerlemesi bulunmaktadır. Nem, elyaf/matris arayüzüne emilerek elyaf/matris ayrılmasına ve kompozit mukavemetinin azalması ile daha hızlı nem absorpsiyonuna neden olan yolların açılmasına neden olmaktadır (Sethi ve Ray, 2015; Naebe ve ark., 2016; Sarlin ve ark., 2017). Robert ve ark. (2010), nemin üç farklı mekanizma ile kompozit malzemelere nüfuz ettiğini önermektedir. Bu mekanizmalar: (i) su moleküllerinin polimer zincirler arasındaki mikro boşluklara difüzyonu, (ii) boşluklara kılcal taşınması veya elyaf ile polimer arasındaki arayüzlerde bulunan kusurlara difüzyon ve (iii) kompozit üretim işlemi sırasında oluşan matris içinde mikroçatlaklara taşınması yoluyla difüzyon olarak sıralamaktadır.

Yüzeylerde farklı orandaki su emilimi, elyaflar ve matris arasındaki genişleme farkından dolayı iç gerilmelerin oluşmasına neden olur. Bu durum, emilen su moleküllerinin elyaf/matris bağını/yapışmasını zayıflatmasına neden olur. Çevresel koşullardan dolayı materyalde oluşan iç gerilmeler ve arayüz zayıflaması ile sonuçta arayüz hatalarının birleşerek arayüz ayrılmasına ve boşluklara neden olacaktır. Arayüz ayrılması ise sırasıyla su emiliminin artmasına ve böylece arayüz ayrılmasının daha çok yaşanmasına sebebiyet verecektir.

ETPlerde emilen nem genellikle kompozitin camsı geçiş sıcaklığını düşürür ve özellikle yüksek sıcaklıklarda rijitlik ve mukavemette önemli bir kayba neden olacak

şekilde malzemeyi plastikleştirir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklarda neme maruz kalan polimer esaslı kompozitler, eğer eksik olarak kürlenmiş ise sıcaklığın etkisiyle çapraz bağlanmanın artması nedeniyle polimerde, Tg artışı yaşanabilir (Prian ve Barkatt, 1999). Ayrıca Tg deki değişim, kayda değer bir değişimin gözlenmediği uzun bir dönemin ardından beklenmedik bir şekilde ortaya çıkabilir (Mijovic, 1985).

Uzun süreli nem emilimi, ETP kompozit yapı bileşenlerinin servis ömrünü önemli ölçüde azaltarak mekanik özelliklerinin bozulmasına yol açmaktadır (Allred, 1981; Brady ve Porter, 1990; Chateauminois ve ark., 1993). Absorbe edilen nem; modül, mukavemet ve maksimum şekil değiştirme gibi özelliklerde önemli değişikliğe neden olabilmektedir (Ellyin ve Rohrbacher, 2000). Nem emilimine bağlı olarak mukavemet ve rijitlikteki azalma; matris çatlakları, elyaf/matris ayrılması ve elyafların aşınması (özellikle cam elyaf durumunda) gibi çeşitli hasar oluşumlarına bağlanabilir. Ayrıca nem, kompozit yapılar üzerinde basma mukavemeti, tabakalararası kayma mukavemeti, yorulma direnci ve çarpma direnci gibi kompozitin uzun süreli dayanıklılığını ve performansını etkileyen matris ağırlıklı özelliklerin bozulmasını sağlamaktadır.

Sıvının kompozit yapılara etkisi genel olarak matrisin türüne, elyafın türüne, elyaf/matris arayüzey yapışmasına ve test numunelerindeki boşlukların veya süreksizliklerin varlığına bağlıdır. Sıvı parçacıklar malzemeye yayılarak boşlukların doldurulmasına ve numunelerinin kademeli olarak genişlemesine neden olur. Genişleme işlemi esnasında daha fazla sıvı madde içine nüfuz eder ve arayüzey bağ kuvvetinde azalmaya neden olur. Bu durumun bir sonucu olarak mukavemet ve rijitlik kaybı gerçekleşir (Dash ve Singh, 2011). Sıvı etkisi:

- Gerilme korozyon mekanizması vasıtasıyla takviye elyaflarında mukavemet kaybına,
- Arayüzey yapışma ve bağlar arası mukavemet kaybına neden olan elyaf/matris arayüzünün bozunmasına,
- Matris modülünün ve mukavemetinin, zaman ve sıcaklığa bağlı olarak değişimine,

- Sıcaklık ile birlikte etkisinin hızlandırılmış bozunmasına ve
- Polimerik matrisin camsı geçiş sıcaklığının genellikle azalmasına neden olur.

Kompozit malzemeler, biri elyaf diğeri polimerik matris olmak üzere iki bileşenden oluşmakta ve her bileşen malzemesi farklı termal genleşme katsayısına sahiptir. Bu durum bileşenlerin düşük ve yüksek sıcaklıklarda farklı büzülme ve genişleme oranları sergilemesine neden olmaktadır. Çevresel şartlandırma süresi arttıkça, termal karakteristik ağırlık kazanım veya kaybından daha fazla etkilenmektedir. Düşük sıcaklıkta, termoset polimerik matris gevrek bir malzeme gibi davranır iken yüksek sıcaklıkta materyalde az da olsa bir miktar sertlik artışı olur (Dash ve Singh, 2011). Sıcaklık, arayüz mukavemetini ve bağlarını önemli derecede etkileyebilmekte ve elyaf/matris bağının birleşme noktasında elyaf ayrılması, elyaf mikro burkulmasına ve arayüzey bölgesinde mikro çatlakların oluşmasına sebebiyet verebilmektedir. Düzlemsel kayma mukavemetinin büyük bir oranda bozunmasına neden olabilmektedir. Ayrıca sıcaklık ortamlarına maruziyet süresi arttıkça, mukavemetteki bozunma süreci de devam etmektedir. Kayma özelliği de orantılı olarak değişmektedir. Sıcaklık kompozit materyalde:

- Elyaf ve matris bileşenlerinde meydana gelen kimyasal reaksiyon sebebiyle rijitliğin azalmasına,
- Düşük sıcaklığın, elyafların veya matrisin veya her ikisinin de gevrek bir materyal gibi davranmalarına,
- Elyaf ve matris malzemelerinde genleşme ve büzülme karakteristiklerinin uyumsuzluğu nedeniyle iç gerilemelere,
- Nem ile birlikte kompozitin Tg değişimine sebebiyet vererek elyaf ve matris bileşenlerinin viskoelastik özelliklerini etkilemesine,
- Yüksek sıcaklıkta epoksi sertliğinin değişmesine neden olmaktadır.

Güneş spektrumundaki ultraviyole ışık ile atmosferik oksijenin kombine etkisi, potansiyel olarak polimerleri zararlı şekilde etkileyen en zararlı hava koşullarından biridir ve bu durum foto-oksidasyon olarak adlandırılmaktadır. UV ışınları, polimerlerde bulunan renk yapıcı gruplar tarafından emilmekte ve emilen enerji

serbest radikaller üretmek üzere polimer kovalent bağlarının ayrışmasına neden olmaktadır (Awaja ve ark., 2011). Bu durumu, moleküler zincir kesilmesi ve/veya çaprazlama izleyebilir. Foto-oksidasyon reaksiyonları sırasında polimer bağlarında meydana gelen çapraz zincir bağlama işlemi moleküler hareketliliği azaltmakta ve bununla beraber mikro çatlakların oluşumunda baş sorumlu olan polimer matrisinin aşırı gevrekleşmesine yol açmaktadır (Kumar ve ark., 2002; Woo ve ark., 2007). Oksidasyona maruz kalan kompozitlerin mukavemetinde ciddi düşüşler olabileceği gibi yüzey gevrekleşmesi ve çatlakların oluşması nedeniyle malzemenin darbe mukavemetinde de düşüşler görülebilir. Dolayısıyla oksidasyon koşullarına aşırı maruz kalan kompozitler tersinmez ve yıkımsal zarar görebilirler (Barkoula, 2013).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Tekniği ile Kompozit Plakaların Üretimi

Farklı termoset veya termoplastik matris yapıları ve takviye elemanlarından (sürekli veya süreksiz) oluşan kompozitleri üretebilmek için çok sayıda üretim yöntemi ortaya atılmıştır. Her yöntem, kendinden kaynaklı bazı avantajları nedeniyle belirli uygulamalara oldukça uygundur. Kullanılan matris ve takviyenin türüne bağlı olarak, bu imalat işlemleri genel olarak üç ana gruba ayrılabilir (Advani and Sozer, 2003). Örneğin, kısa veya süreksiz elyaf takviyeler için Basınçla Kalıplama, Ekstrüzyon ve Enjeksiyon Kalıplama uygun üretim yöntemi iken termoplastik matris ve uzun elyaf takviyeleri için Kompozit Plak Şekillendirme ve Pultrüzyon uygun yöntemlerdir. Öte yandan termoset bir matris ile uzun elyaf takviyeler için El Yatırma, Otoklav ile Kalıplama, Sıvı Kompozit Kalıplama (SKK) ve Filament Sarma temel üretim yöntemleridir. Ayrıca son üretim yöntemi açık (örn. El Yatırma) veya kapalı (SKK) kalıplama işlemleri olarak kategorize edilebilir.

SKK üretim yöntemi genel olarak, takviye elemanlarının kuru bir şekilde sert, yarı sert veya esnek bir kalıba yerleştirildiği genel kalıplama felsefesidir. Sıvı formdaki kürlenmemiş termoset reçine, bir kaynaktan enjekte edilir ve takviye sistemine nüfuz eder. Takviye elemanının tamamıyla infüzyonundan sonra reçinenin kürlenmesi sağlanır. Reçine kürleme işlemi sonunda bitmiş kompozit materyal elde edilir. Bazı SKK üretim işlemleri; Reçine Transfer Kalıplama (RTK), Vakum İnfüzyonu (Vİ) vb. olarak sıralanabilir (Modi, 2008).

Termoset esaslı matris kompozit plakaların büyük çoğunluğu açık kalıplama işlemleri kullanılarak imal edilir. Stiren, bazı polimerik malzemelerin üretiminde kullanıldığı için açık kalıplama üretim işlemleri sırasında kendiliğinden ortaya çıkmaktadır. Bu maddenin etkileri, kısa süreli tahriş, uyku hali, baş ağrısı ve mide bulantısından uzun vadeli nörotoksik ve genetik etkilere kadar uzanmaktadır. Bu nedenle, üretim aşamasındaki stiren emisyonunu azaltmak için, açık sistem kalıplama

işlemlerine uygun alternatifler geliştirilmiştir. RTK ve Vİ gibi kapalı kalıplama yöntemleri, üretim sırasında uçucu organik bileşikler emisyonlarının kaynağa kalmasına ve böylece emniyetli çalışma şartlarının sağlanmasına ve önemli mali yatırımlar olmaksızın iş sağlığı ile ilgili yükümlülüklerin yerine getirilmesine imkan vermektedir. RTK ve Vİ yöntemlerindeki ilk sermaye yatırımı genellikle El Yatırma gibi bir yöntemden daha yüksek iken, diğer birçok kapalı kalıplama yöntemine göre oldukça düşüktür. Bu nedenle, RTK ve Vİ yöntemleri tekne üretimi ve rüzgâr enerjisi gibi sektörlerde her geçen gün daha popüler hale gelmektedir (Broad 2012; Grimsley 2005).

RTK üretim yönteminde, reçine pozitif basınç altında sisteme enjekte edilirken, havalandırma atmosfere açık bir şekilde olabilir veya bir vakum pompasına bağlanabilir. Ayrıca bu yöntemde, üretimi gerçekleştirilecek parça şeklinde elyaf kumaşlarının yerleştirileceği bir kalıbı gerektirir. RTKdaki pozitif enjeksiyon basıncı, kalıbın düzgün şekilde sıkıştırılabilmesi için kalıbın esnemez ve dayanıklı olmasını zorunlu kılmaktadır. Kalıp, mekanik olarak örneğin bir pres kullanılarak sıkıştırılarak basınç altında kapalı şekilde tutulur. Reçine, enjeksiyon cihazından mevcut enjeksiyon yollarından sıkıştırılmış ön elyaf kalıbına enjekte edilir. Enjeksiyon işlemi sona erdiğinde reçinenin kürleşmesi sağlanır ve en sonunda kalıp bileşenleri açılır ve ürün elde edilmiş olur.

RTK, yüksek kaliteli ve performanslı yapısal kompozit malzemeler üretebilecek özelliklere sahiptir ve bu yöntem yetmişli yıllardan beri yapısal bileşenlerin imalatı için kullanılmaktadır (Polowick, 2013). Herhangi bir şekildeki yüksek performanslı kompozitler RTK ile otoklav kullanılmadan imal edilebilir. Bu yöntemde arzulanan elyaf hacmini elde edebilmek için kalıp bölmesine ölçülü miktarda dokunmuş elyaf kumaşlar konulur. Böyle bir durumda kalıptaki reçine geçirgenliği düşük olur, bu nedenle reçinenin kalıp sistemine hidrolik veya elektronik kontrollü enjeksiyon kullanılarak yüksek basınç altında enjekte edilmesini gerektirir.

Vakum İnfüzyonu (Vİ), diğer kapalı kalıplama tekniklerine göre düşük maliyetli bir işlemdir ancak sarf malzemesi fazla olan bir üretim yöntemidir ve

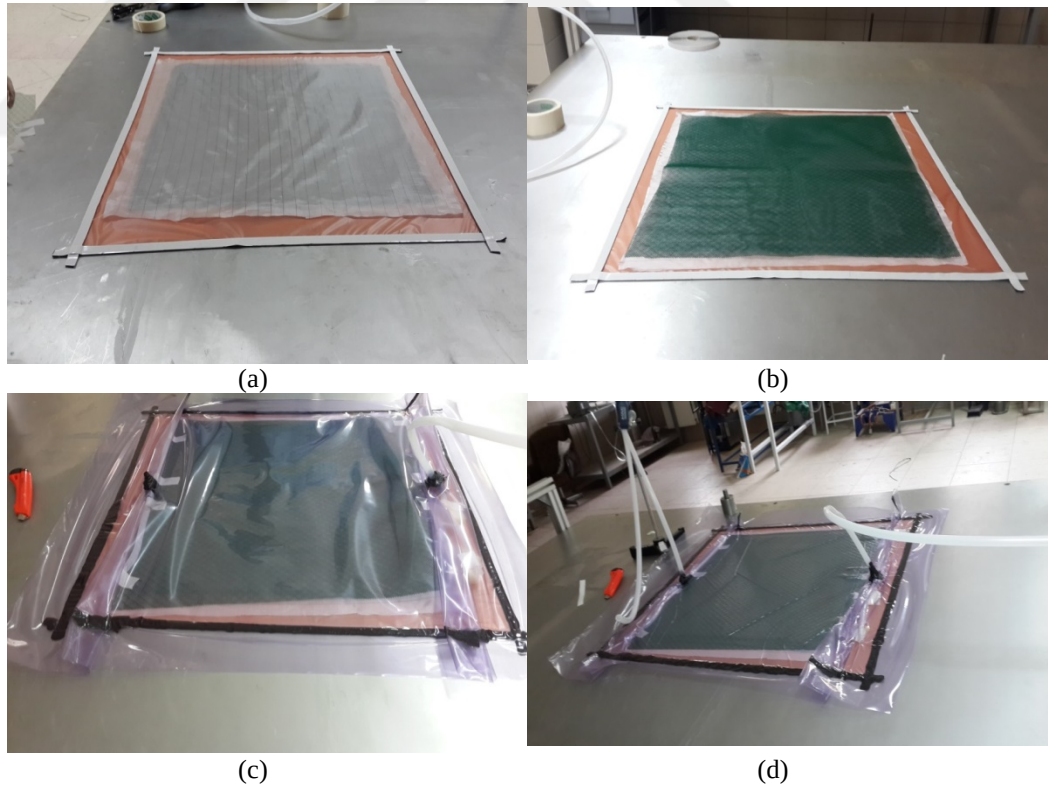
özellikle düşük hacimli büyük parçaların üretimi için uygundur. El yatırma yöntemi ile karşılaştırıldığında, emisyonlu bir çalışma ortamı, daha düşük boşluk içeriği, daha yüksek elyaf hacim oranı vb. gibi birçok avantaj sunar. Bu avantajlarının yanında artan sağlık bilinci ve çevresel düzenlemelerin değişmesi sayesinde popülerliği her geçen gün artmaktadır. Bu gibi birçok avantajının yanında üretim aşamasında insan faktörü çok düşüktür. Bu durum, açık kalıp (El yatırma veya Püskürtme kalıplama) tekniklerine oranla üretim sürecinin tekrarlanabilirliğini kolaylaştırır, yöntemin tutarlılığını artırır ve kompozitlerin hacimsel olarak % 60'a kadar nispeten yüksek elyaf içeriğine sahip bir şekilde üretilebilmesini mümkün kılar (Ragondet, 2005). Ayrıca Vİ yöntemi, RTK gibi enjeksiyon makinesi gerektirmedikinden sermaye maliyetlerini azaltmakta ve üretim sırasında stiren emisyonlarını düşürmektedir. Bu avantajlarının yanı sıra bu yöntem, esnek membrandaki herhangi bir sızıntıya karşı duyarlıdır ve iyi yüzey kaplaması yalnızca parçanın bir tarafında elde edilebilir. Keskin kenarlar ve ani kalınlık değişimlerine sahip kompleks geometriler reçine akışını aksatabilir. Son olarak, tek kullanımlık malzemeler (bant, borular, valfler vb.) önemli oranda bir atık oluşturmakta ve kompozit kalıp kurulumunu sağlamak için hatırı sayılır işgücüne ihtiyaç vardır.

Vakum destekli reçine infüzyon metodu, elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde, Vİ farklı kısaltmalar altında bilinmektedir. Vakum infüzyon işlemlerini tanımlamak için en popüler terimler şunlardır: Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (VDRTK), Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Kalıplama (VDRİK), Seemann Kompozit Reçine İnfüzyon Kalıplama İşlemi (SKRİKİ), Vakum Torbası Reçine Transfer Kalıplama (VTRTK), Vakum Destekli Reçine İnfüzyon (VDRİ) işlemi vb (Goren ve Atas, 2008). VDRİ, Alman Havacılık ve Uzay Merkezi Tasarım ve Yapı Enstitüsü tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, genel bir vakum infüzyon işleminden farklı değildir ve kurulum sırasında ön kalıbın bir tarafında SKRİKİ için olduğu gibi oldukça geçirgen bir tabaka içerir. VDRTK, RTK yönteminin başka bir biçimi olarak tanımlanmıştır, ayrıca vakum infüzyon işlemini tanımlamak için genel bir ad olarak da kullanılmaktadır. Sıralanan bütün yöntemler temelde kuru elyaf takviye malzemesine reçinenin basınç altında pompalanması yerine vakum altında emdirilmesi şeklinde

gerçekleşmektedir. Bu yöntemler, düşük maliyet, değişik uygulamalara ölçeklenebilirlik, üretilen kompozitlerde düşük boşluk içeriği, uçucu organik bileşik emisyonlarının azaltılması gibi üstünlükleri nedeniyle ilgi çeken üretim metodolojileri olmuştur.



Şekil 3.1. Release(ayırma) film kumaşı ve sızdırmazlığın sağlanması (a) ve 5 kat dokunmuş karbon elyaf kumaşının release film üzerine serilmiş hali (b)



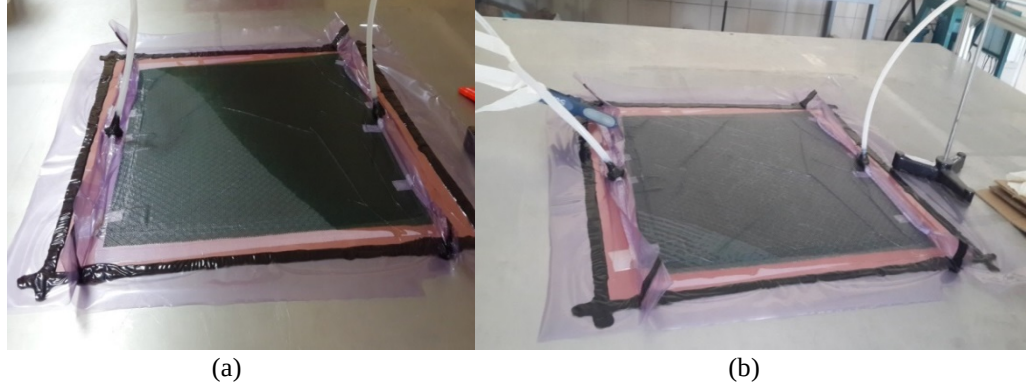
Şekil 3.2. Karbon elyafların üzerine soyma kumaşının serilmesi (a), İnfüzyon filesinin elyaflar üzerine serilmesi (b), spiral hortum ile T borularının vakum naylonundaki yerleşimi ve (c) vakum işleminin uygulanması (d)

Vakum destekli metodolojinin gelişmesi genel olarak, RTK yönteminde enjeksiyon basıncını düşürmek ve kompozit materyalde hava boşluklarını azaltmak için vakumun bir araç olarak kullanılması ile mümkün olmuştur. Bu süreç, Seemanns Kompozit Şirketi tarafından 2 bölmeden oluşan kalıbın üst kısmının kaldırılıp yerine esnek bir polimer vakum torbasıyla değiştirmesi sayesinde daha da geliştirilmiştir (Modi, 2008). Dokunmuş kuru elyaf kumaşlar açık kalıba konur ve plastik vakum torbası kalıbın üstüne yerleştirilir. Kalıp, bir tarafından reçine kaynağına ve diğer tarafından ise vakum pompasına bağlanır. Vakum yardımıyla kalıptan çekilen hava sonucu oluşan basınç farkı sayesinde sıvı reçine, takviye elemanı elyaflara emdirilir. Emdirme işlemini, kürlleme ve kalıptan çıkarma adımları takip eder. Bu çalışmada kullanılan kompozit levhaların üretim aşamaları genel hatları ile aşağıda verilmiştir:

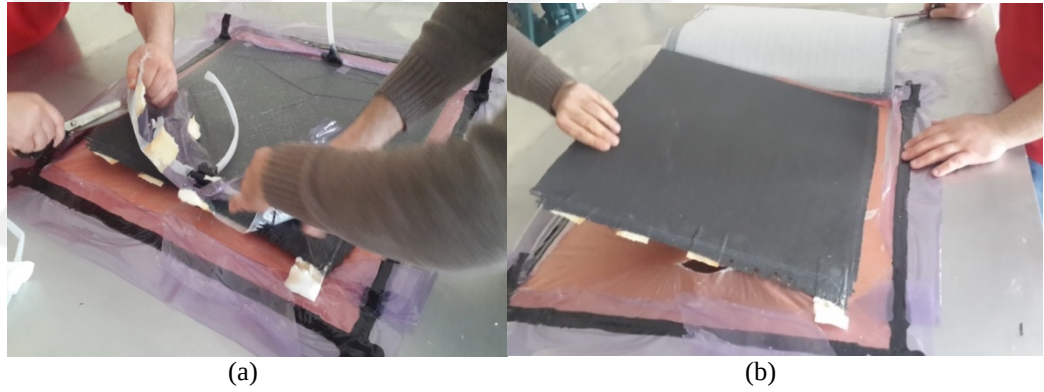
- Kuru kumaşlar veya ön kalıp, tabla yüzeyine ayırma film kumaşı, soyma kumaşı gibi malzemeleri tabla üzerine serilir (Şekil 3.1a ve 3.1b).
- Soyma kumaşı üzerine reçinenin tüm elyaf kumaşların yüzeyine homojen olarak emilimini sağlamak amacıyla infüzyon filesi serilir ve elyafların karşılıklı iki kenarına vakum hortumunun bağlantısını sağlamak için spiral hortum ve T bağlantı boruları yerleştirilir. Daha sonra ise ön kalıp çift taraflı sızdırmazlık bandının yardımıyla hava geçirmeyecek şekilde tablaya yapıştırılır vakum torbasıyla kapatılır ve hava bir vakum pompası ile boşaltılır (Şekil 3.2a, 3.2b, 3.2c ve 3.2d).
- Vakum torbasında sızdırmazlık sağlandıktan sonra yapıştırıcı ile sertleştirici malzemenin belli oranlarda karıştırılması ile elde edilen reçine vakum yardımıyla sisteme emdirilir. Emdirme işlemi, reçinenin tüm ön kalıba nüfuz edinceye kadar devam ettirilir. Daha sonra infüzyon tablası 90°C' ye ayarlanarak 2 saat süreyle ısıtılır ve reçinenin elyaf içerisinde sıcaklığın etkisiyle sertleşmesi sağlandıktan sonra sistem soğumaya terk edilir (Şekil 3.3a ve 3.3b).

Kürlleme ve kalıptan ayırma işlemleri, emdirmeyi takip eden adımlardır. Reçinenin sertleşmesinden sonra tabladaki ısıtma sistemi devre dışı bırakılarak 24 saat boyunca plakanın kürlenmesi beklenir. Kürlenme işleminden sonra kompozit

plakaya zarar verilmeyecek şekilde soyma kumaşından ayırma işlemi gerçekleştirilir (Şekil 3.4a ve 3.4b).



Şekil 3.3. Reçinenin sisteme emdirilmesi (a) ve tam olarak reçine emdirilmiş sistemin soğumaya terkedilmiş hali (b)



Şekil 3.4. Kompozit plakanın soyma kumaşından ayrılması işlemi (a) ve üretilen karbon elyafli kompozit plaka (b)

Burada vakum torbasının geçirgenliğini engellemek için çift taraflı sızdırmazlık yapışkan bantlar ile kalıbın her bir tarafı kapatılmıştır. Serbest bırakma filmleri çoğunlukla, kompozit plakanın kalitesini düşürebilecek muhtemel sıkışmış hava veya uçucu maddenin giderilmesini sağlamak için gözenekli bir yapıya sahiptir ve ayırma film kumaşı doğrudan ön kalıp üzerine yerleştirilmektedir. Reçinenin ön kalıbın yanıl bölümlerine homojen olarak dağıtılabilmesi amacıyla yanıl bölüm uzunluğunda spiral hortum reçine infüzyon hattına bağlanmıştır. Bu metotta kullanılan soyma ve ayırma kumaşı gibi malzemeler iyi ısı direncine sahiptir. Kompozit plakanın rahatlıkla elde edilebilmesi için teflon film ya da sıvı ayırma maddeleri kullanılabilir.

Bu yöntemde ön kalıp üzerindeki sıkıştırma basıncı 1 atm civarındadır. Reçine, vakum pompası yardımıyla ön kalıp üzerinden uzaklaştırılan basınç ile kalıp torbası dışındaki reçinenin basınç (1 atm / 101.5 kPa) farkı sayesinde sisteme emdirilmektedir. Vakum torbalama, reçinenin parçanın yüzeyi boyunca hızla akmasına ve daha sonra kuru dokuda alt bölümlere doğru yayılmasına olanak vermektedir. Bu durum, bu yöntemin tekne gövdesi veya uçak kanadı gibi kalınlık ölçüsünün uzunluk ve genişlik ölçülerine oranla çok küçük olduğu uygulamalarda kullanılmasına ve birçok noktadan beslenebilecek reçine girişi ile tekne gövdesi veya uçak kanatlarının bir infüzyon adımıyla tamamlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Kompozit ön kalıplar, harici herhangi bir basınç olmadan reçine ile infüze edilir ve plaka reçine türüne bağlı olarak oda sıcaklığında veya bir fırında sertleştirilebilir. Üretim süreci, bir vakum torbası altında gerçekleştiği için ön metal kalıplama gerektirmeyen bu metodun, uçucu organik bileşiklere maruziyeti çok düşüktür. Sızdırmaz vakum torbası ve reçine sisteminin vakum yardımıyla gazdan arındırılması sebebiyle yüksek kalitede ve boşluksuz plaka üretimi sağlanmaktadır. Vakum destekli bir infüzyon tekniği olan VDRİT, prepreg ve otoklavlanmış kompozit üretim tekniklerine göre çok büyük metal kalıp maliyetleri olmadan plaka üretimini mümkün kılmaktadır. Kalıplara ihtiyaç duyulmaması, plakanın üretiminde gerekli olan bağlantı elemanları sayısını da azaltmaktadır.

Kompozit plakaların üretimi sırasında tablanın ısıtılması için elektrikli ısıtma rezistansları kullanılmıştır. Sıcaklık kontrolü, masa yüzeyinin altına yerleştirilen termokupullar yardımıyla sağlanmıştır. Sistemdeki PLC uygulamaları, istenen sıcaklıklar ve kurlenme döngülerinin ayarlanmasına olanak sağlamıştır. Kurlenme döngüleri, yüksek kalitede kompozit plaka üretimi için çok önemlidir. Bir kompozitin tüm bölgelerde aynı mekanik özelliklere sahip olabilmesi için de kurlenme çevrimlerinin aynı olması gerekmektedir. Dolayısıyla, tabla yüzeyi boyunca eşit bir sıcaklık dağılımı çok önemlidir. VDRİT yöntemi, üretim sırasında sıcaklık kontrolünün yanı sıra vakum regülatörü yardımıyla vakum derecesinin de kontrolüne imkân vermektedir. Reçine infüzyon kalıplama yöntemiyle üretim sırasındaki kompozit plakalarının kalitesi, takviye malzemesinin geçirgenliği, reçine

viskozitesi ve reçinenin elyaf ön kalıplara giriş geometrisi gibi parametrelerden etkilenmektedir. Ayrıca bu üretim metodunda RTK yönteminde mevcut olan katı üst kalıp yerine esnek torba kullanıldığı için ön kalıplarda infiltrasyon oluşmakta bu da plaka kalınlıklarının dinamik olarak değişmesine neden olmaktadır. Üretim sırasındaki porozite ve geçirgenlik gibi özellikler plakaların kalınlığına bağlı olarak değişmektedir.

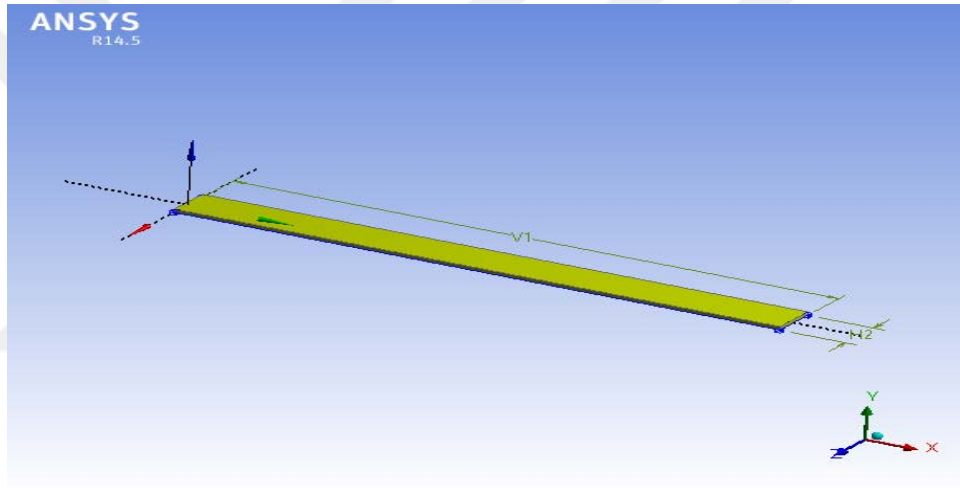
Bu çalışmada hem aramid (300 gr/m²) hem de karbon (420 gr/m²) elyaf takviye malzemesi için iki farklı kompozit plaka üretilmiştir. Birinci plaka, 5 katman elyaf takviye malzemesi içerip 50x50 cm ebatlarındadır, titreşim deney sonuçlarını incelemek için üretilmiş, bu plakadan numuneler kesilmiş ve bu numunelere gerekli testler yapılmıştır. Yöntemin güvenilirliği sağlandıktan sonra yine 5 katman elyaf takviyeden oluşan 90x90 cm ebatlarında kompozit plaka üretilip numune kesim işlemleri tamamlandıktan sonra yaşlandırma ortamlarına bırakılmıştır.

3.2 Kompozit Plakaların Kesilmesi

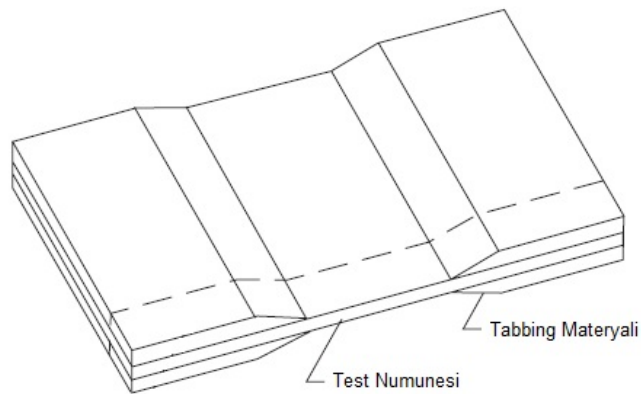
Üretimi gerçekleştirilen dokunmuş karbon ve aramid elyaflı kompozit plakaların kesme işleminde Rubi DS-300 ve yine Rubi DX-350 sulu testereleri kullanılmıştır. Rubi DS-300 testeresi Şekil 3.5'ten görülebilir. Bu kesme işlemi ile karbon ve aramid elyaflı kompozit plakalardan hem çekme hem de titreşim deneyleri için gereken numuneler hazırlanmıştır. Çekme numuneleri, ASTM D3039 standartlarına göre hazırlanmıştır. Çekme ve titreşim deneyleri için hazırlanan karbon numunelerin ortalama ebatları 20,38 x 245 x 2,2 (en x boy x kalınlık, Şekil 3.6) mm iken aramid elyaf takviyeli kompozit numunelerin ortalama ebatları 19,5 x 248 x 1,79 mm olarak ölçülmüştür. Numunelerin ölçüm işlemleri gerçekleştirilirken her ebat için en az 3 farklı bölgeden ölçümler alınmış ve ortalama sonuçları göz önünde bulundurulmuştur. Deney numunelerinin çekme deneyi sırasında, çekme testi cihazı çenelerinin uyguladığı basma kuvvetinden dolayı hasara uğrayıp kopmaması hem de ASTM D3039 standardının gereksinimlerini karşılamak için tabbing (kulakçık) işlemi gerçekleştirilmiştir. Tabbings malzemeler, her numune için kendi kompozit plaklarından kesilmiş ve ortalama 55 mm (eni ve kalınlığı numune ile aynı



Şekil 3.5. Rubi DS-300 sulu testere kesim cihazı



Şekil 3.6. Kesilen kirişlerin boyut bilgileri (Z yönü: En, X yönü: Boy ve Y yönü: Kalınlık)



Şekil 3.7. Kulakçık materyali gösterimi (Carlsson ve ark., 2014)

ölçüde olmak üzere) uzunluğundadır. Çekme numunesine tabbing elemanının yapıştırılma işlemi, Pattex marka çift komponentli hızlandırıcı ve yapıştırıcının sırasıyla yüzeylere püskürtülüp birleştirilmesi ile elde edilmiştir. ASTM D3039 standardında belirtilen tabbing açısı 15° ya da 90° olabilir (Şekil 3.7). Bu işlem için tabbing açısı 90° olarak alınmıştır. Bu işlemler gerçekleştirildikten sonra 7 adet karbon ve aramid kompozit numunesi hazırlanmıştır.

Kesimi yapılan dokunmuş karbon ve aramid kompozit numunelerin titreşim deneyi için yaklaşık ölçüleri Capozucca (2014)'nın çalışması esas alınarak belirlenmiştir. Kesme işlemi yapılırken ASTM D3039 standardında belirtilen uzunluklar dikkate alınarak yaklaşık olarak 250 mm uzunlukta kesilmiştir. Ancak titreşim testleri için 250 mm uzunlukta numunelerin 50 mm uzunluğu mengeneye sabitlenmiş ve testler 200 mm uzunluk üzerinden gerçekleştirilmiştir (Capozucca, 2014). Numunelerin genişliğinin ortalama 20 mm olmasına dikkat edilmiştir. Kalınlık ölçüsü için ise karbon ve aramid için 2 mm civarında bir ölçü elde edilmeye çalışılmıştır. Kompozitlerin kesimi sırasında mümkün olabildiğince homojen ve eşit boyutlarda numuneler elde edilmeye çalışılmıştır. Ancak elyafların kesme işleminin zorluğu sebebiyle numunelerde bire bir aynı ölçüleri elde etmek mümkün olamamıştır. Bu durumu aşmak amacıyla hesaplamalarda kullanılacak olan numune boyutları (kalınlık ve genişlik için) üçer noktadan veriler alınarak ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir.

3.3 Çekme Deneyi

Çekme deneyleri için 100 kN yük hücresine sahip Shimadzu Autograph AG-X cihazı kullanılmıştır. Deneyler yapılırken çekme testi hızı 1 mm/dk olarak belirlenmiştir. Numuneler Şekil 3.8'de görüldüğü gibi çekme cihazına bağlanarak testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testinde değer okuma işlemi Şekil 3.8a ve 3.8b'den görülen ve numune üstündeki orta kısmında siyah çizgi bulunan beyaz yapışkan kâğıtlar sayesinde gerçekleştirilmiştir. Çekme işlemi yapılan dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin hasar mekanizmasının Şekil 3.9a ve 3.9b'den görüleceği üzere patlama formunda olduğu belirlenmiştir.



(a)

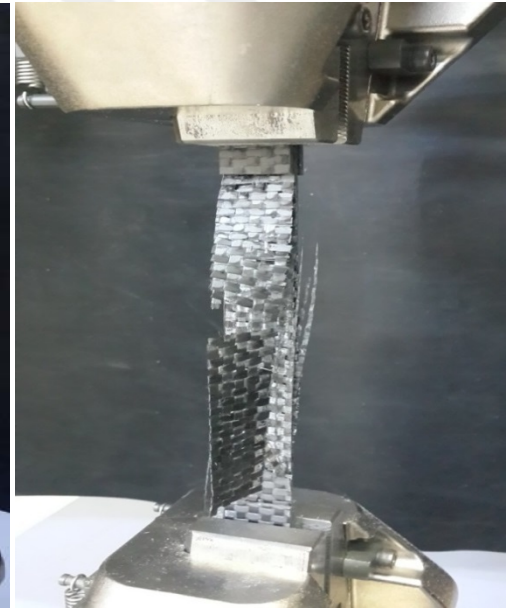


(b)

Şekil 3.8. Dokunmuş aramid (a) ve karbon (b) elyaf takviyeli kompozit numunelerin çekme deneyi



(a)

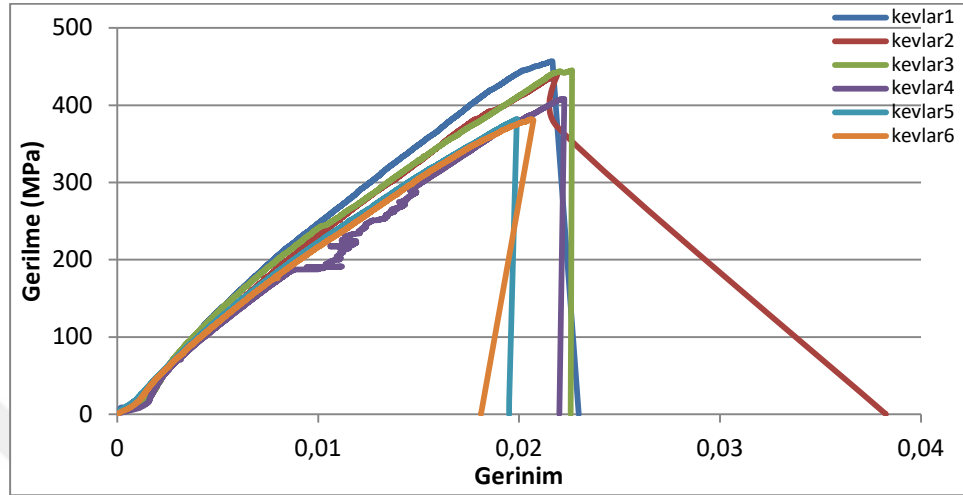


(b)

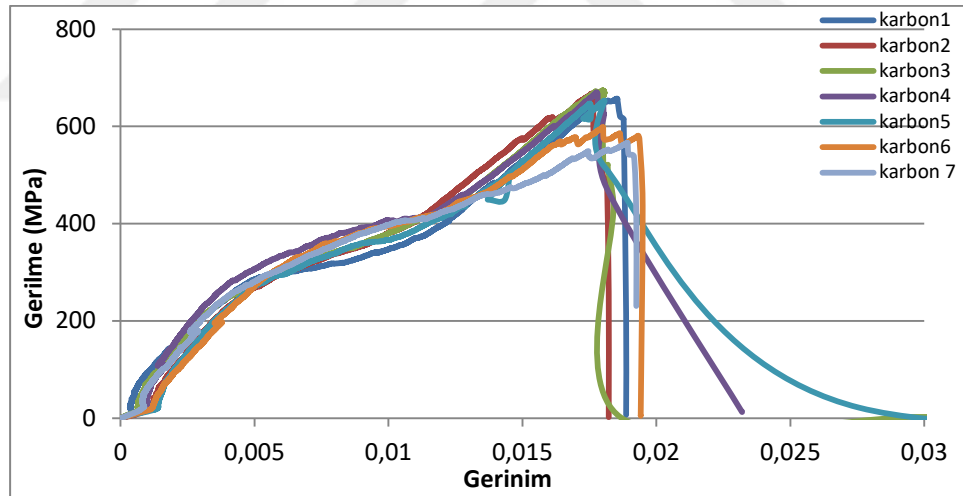
Şekil 3.9. Dokunmuş aramid (a) ve karbon elyaf (b) takviyeli kompozit numunelerin çekme deneyi hasar durumu

Her bir elyaf takviye kompozit grubu için 7 adet numunenin çekme testi gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi sırasında karbon kompozit numunelerinde

herhangi bir sıkıntı yaşanmamasına rağmen aramid kompozitlerinden bir numunenin testi, kulakçıklarda yaşanan problem nedeniyle iptal edilmiş ve sonraki süreçte testi başarıyla gerçekleştirilen diğer 6 adet aramid numunelerin sonuçları kullanılmıştır.



Şekil 3.10. Dokunmuş aramid kompozit çekme numuneleri için gerilme-gerinim grafiği



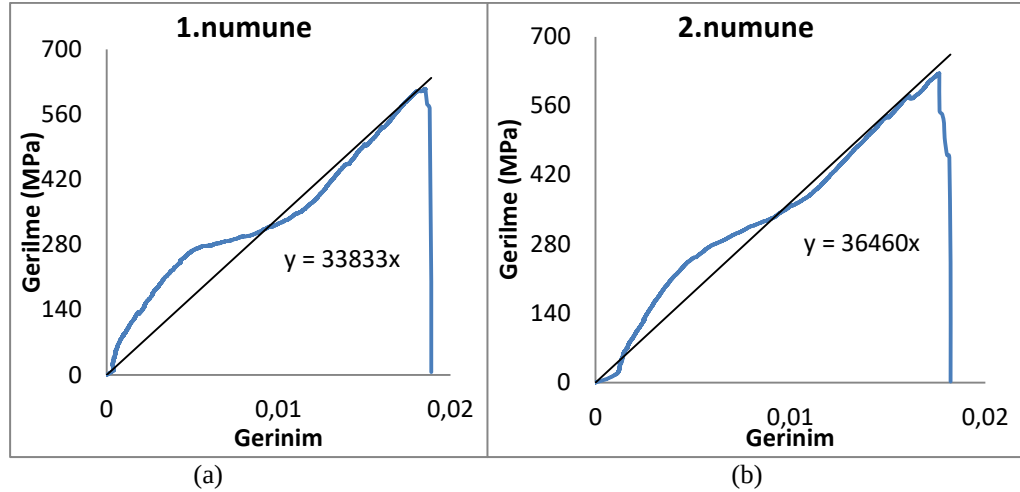
Şekil 3.11. Dokunmuş karbon kompozit çekme numuneleri için gerilme-gerinim grafiği

Çekme testinden elde edilen veriler ortalama Elastisite Modülünün bulunabilmesi için işlenmiştir. Ortalama Elastisite Modülünü bulabilmek için öncelikle gerilme-gerinim eğrisinin elde edilmesine ihtiyaç vardır. Gerilme değerleri, her bir çekme özelinde uzama yönündeki kuvvet verilerinin ortalama birim alana bölünmesi ile hesaplanmıştır. Gerinim değerleri ise çekme deneyi sırasında her bir numune üstüne yapıştırılan beyaz kâğıtların orta bölümünde yer alan siyah noktalar

arasındaki deney başlangıcı ile sonundaki farkın ölçülmesi ile elde edilmiştir. Bu verilerin işlenmesinden sonra elde edilen gerilme-gerinim grafikleri, dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit numuneler için Şekil 3.10'da, dokunmuş karbon takviyeli kompozit numuneler için ise Şekil 3.11'de görülebilir.

Dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit numunelerin Şekil 3.10'daki gerilme-gerinim grafiği incelendiğinde 6 numunenin de benzer davranış sergilediği görülebilir. Sadece 'kevlar 4' numunesinin 180 ile 300 MPa gerilme değerleri arasında, davranış doğrultusunda bir farklılık olmasa da, kararsız bir durum sergilediği gözlenmiştir. Bu durumun sebebi olarak deney sırasında ekstansometre ekipmanının ihtiyaç duyduğu ışık kontrast oranında yaşanan muhtemel probleme bağlanmıştır. Işık kontrast oranındaki muhtemel problem extensometrenin sağlıklı veri almasını engelleyebilir. Dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerinin Şekil 3.11'deki gerilme-gerinim grafiği incelendiğinde, numunelerin dokunmuş aramid numuneler gibi benzer davranış gösterdiği görülmüştür. Bu testlerde 'karbon 5' numunesinde yaşanan kararsız bir davranıştan sonra numunenin daha önceki davranışına döndüğü görülmüştür. Kulakçık kısmında yaşanan muhtemel bir ayrılma problemi bu davranış sapmasının sebebi olarak yorumlanmıştır.

Çekme testi uygulanan bir numunenin elastisite modülünü bulabilmek için gerilme-gerinim grafiğinden seçilmiş 25 değer yeterlidir. Ancak daha hassas sonuç için 40 veya 50 değer göz önünde bulundurulması (Carlsson ve ark., 2014) ve eğri uydurma yöntemi ile elastisite modülünün bulunması gerekir. Bu bilgiler ışığında dokunmuş aramid ve karbon kompozit için elastisite modülleri bulunmuştur. Bu çalışmada her bir kompozit grubunun elastisite modülü eğri uydurma ile bulunurken her bir numune için bütün test verileri göz önüne alınmıştır. Bu durum, çekme testi ile elde edilen çok fazla verinin bulunması ve kompozit numunelerin test süresince homojen olmayan davranışlar sergileyebilmesi nedenlerinden ötürü tercih edilmiştir.

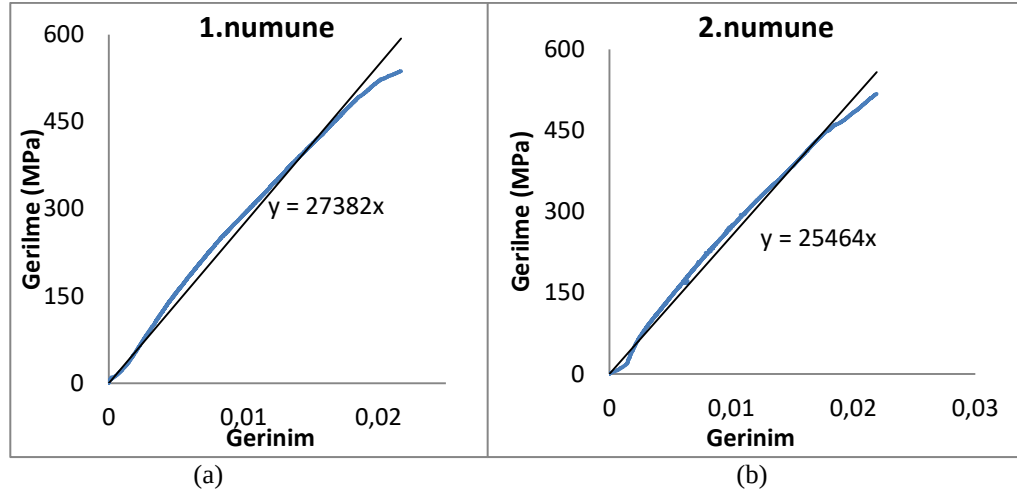


Şekil 3.12. Birinci (a) ve ikinci (b) dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerinin çekme testi gerilme-gerinim grafiği

Çizelge 3.1. Dokunmuş karbon kompozit numunelerine ait ortalama elastisite modülü

Karbon kirişler	Elastisite Modülleri (MPa)
Numune 1	33833
Numune 2	36460
Numune 3	35812
Numune 4	36463
Numune 5	34284
Numune 6	34089
Numune 1	33231
Ortalama	34881,71

Her bir numuneye ait Elastisite Modülü çekme testindeki bütün veriler kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 3.12a ve 3.12b’de sadece iki karbon numunesinin eğri uydurma grafikleri verilmiştir. Diğer dokunmuş karbon numuneler için de aynı uygulamalar gerçekleştirilmiş ve nümerik analizde kullanılacak olan ortalama Elastisite Modülü Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi yaklaşık olarak 34,89 GPa olarak hesaplanmıştır. Burada numunelerin gerilme-gerinim grafiğindeki bütün eğri davranışının doğrusal olduğu varsayılarak bir eğilim çizgisi eklenmiş ve bu eğilim davranışını simgeleyen doğrunun eğimi, o numuneye ait Elastisite Modülü olarak kabul edilmiştir. Şekil 3.13a ve 3.13b’de iki aramid numuneye ait eğri uydurma grafikleri verilmiş ve Çizelge 3.2’den görüleceği üzere dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelere ait ortalama Elastisite Modülü ise yaklaşık olarak 24,93 GPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.13. Birinci (a) ve ikinci (b) dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit numunelerinin çekme testi gerilme-gerinim grafiği

Çizelge 3.2. Dokunmuş aramid kompozit numunelerine ait ortalama elastisite modülü

Aramid Kirişler	Elastisite Modülleri (MPa)
Numune 1	27382
Numune 2	25464
Numune 3	25545
Numune 4	22787
Numune 5	24535
Numune 6	23850
Numune 7	Veri Alınamadı
Ortalama	24927,17

3.4 Titreşim Deneyi ve Ekipmanları

Titreşim, bir yapıya etki eden fiziksel büyüklüklerin referans bir eksen veya denge konumuna göre önce bir yöne sonra bunun tersi yönünde tekrarlanan hareketidir. Yapıların titreşimi; rezonans, konforsuzluk, gürültü, arıza, düşük performans veya yorulma gibi büyük problemlere ve çalışma sınırlamalarına neden olabilir. Bu nedenle, daha güvenli ve daha az gürültülü bir ortam oluşturmak için öncelikle titreşim analizi yapılmalıdır. Titreşim analizi yapılacak olan bir yapıda ilk frekanslar büyük önem arz etmektedir. Çünkü küçük modlar daha düşük enerji durumu ile ilişkilidir ve bu nedenle uyarılmaları daha kolaydır. Ancak bir yapının veya bileşenin yüksek modları, o yapının servis ömrü boyunca karşılaşamayacağı daha yüksek enerji girdisi gerektirir. Bu nedenle genellikle titreşim analizlerinde düşük modlar göz önüne alınmaktadır.

Titreşim problemlerini çözmek için iki yaklaşım izlenebilir: Bunlar; yapının rezonansa girmesini engellemek için çalışma frekanslarından uzak şekilde doğru bir tasarım veya kaynak, kütle ekleme veya çıkarma vs. ile yapının çalışma frekanslarından uzak kalması sağlanacak şekilde yapısal değişiklikler ile titreşimi önlemedir. Her durum için yapının titreşim karakteristiği, o yapı için belirleyici faktör olabilir. Ayrıca, günümüzde yapılar, mukavemet özelliklerindeki iyileşme sayesinde gün geçtikçe daha hafif ve esnek hale geldiğinden bu yapıların dinamik karakterizasyonunu belirlemek zorunlu hale gelmiştir (Ewins 2000).

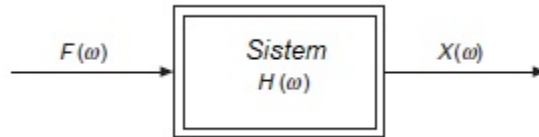
Modal analiz, bir yapının doğal frekansları, sönümlenme faktörleri ve mod şekilleri gibi dinamik özelliklerini belirleme işlemidir (Avitable 2000, Ewins 2000) ve modal analiz, sürekli bir sistem davranışının, o sisteme ait bileşenlerin ayrı ayrı cevaplarının toplamı olarak ifade edilebilir. Modal analiz sonucu elde edilen veriler, o sistemin dinamik parametreleridir ve tasarımı gerçekleştirilen bütün yapıların kendine has değişmeyen bir özelliği olarak değerlendirilebilir (Allemang, 1999). Çünkü kütle, rijitlik ve sönümlenme özelliklerine bağlı olarak her sistem benzersiz dinamik parametreler setine sahiptir. Sonuç olarak bu parametreler, o sistemlerin değişmez bir özelliği olup bu sistemleri karakterize etmek için kullanılabilir. Dahası, belirtmek gerekir ki bir yapıya ait modal parametreler, titreşim testi gerçekleştirildikten sonra eğri uydurma teknikleri kullanılarak türetilir (Ewins 2000).

Klasik modal analizde, titreşim testlerinde en sık kullanılan titreşim davranışı belirleme aracı deneysel modal analizdir. Deneysel modal analiz, zamanla doğrusal değişmeyen titreşim sisteminin modal modelini türetmek için kullanılan deneysel bir tekniktir (Allemang, 1999). Bu yöntemde bir transfer fonksiyonu yardımıyla modal parametreleri bulmak için bilinen bir uyarı (tahrik) sinyali süresi (genellikle giriş olarak adlandırılır) ve bir yanıt verme sinyali süresinin (çıkıtı) oranlanması ile işlenir. Yani bu tekniğin teorik temeli, bir konumdaki titreşim cevabı ile aynı veya başka bir konumdaki uyarım arasındaki ilişkinin tahrik frekansının bir fonksiyonu olarak ifade edilmesi şeklindedir (Denklemler 3.1). Hem girdi hem çıkıtı sinyalinin ayrık frekans spektrumlarını elde etmek için her sinyal hızlı Fourier dönüşümü algoritması ile örneklenmekte ve dönüştürülmektedir. Bu çıkıtı-girdi sinyallerin oranı, karmaşık bir

matematiksel fonksiyon örneklenmesi olan Frekans Tepki Fonksiyonu (FTF) olarak bilinmektedir. Örnek olarak Şekil 3.14'te verilen tek giriş ve çıkışlı sistemine ait yapısal cevap $X(\omega)$ doğrudan tahrik kuvveti $F(\omega)$ ile ilişkilidir ve basitçe bu verilerin birbirine oranı $H(\omega)$ yani o sisteme ait FTF Denklem 3.1'deki gibi ifade edilebilir. Burada X ve F sırasıyla n . dereceden Fourier fonksiyonu olarak cevap fonksiyonunu ve kuvvet girdilerini, ω frekans değişkenini ve H ise $n \times n$ FTF fonksiyonudur, n yapının test serbestlik derecesini temsil etmektedir.

Sistemlerin dinamik davranışı, uyarılma frekansına göre değişmektedir, bu sebeple o sistemin ait olduğu yerdeki ortam koşullarına uyarlanabilir titreşim davranışı belirleme yaklaşımları gerekmektedir. Deneysel Modal Analiz, her ne kadar doğru veri çıkarımı ve işlenmesi için gerekli donanımına sahip olsa da laboratuvar ortamı dışındaki ölçüm ve uygulamalara uyarlanamamıştır. Ancak modal analizin yerinde uygulamalar için daha güçlü ve istikrarlı seçenekleri mevcuttur. Operasyonel veya yalnız-çıkı modal analizi ait olunan yerde uygulama alanlarında kullanılabilir bir yöntemdir.

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (3.1)$$



Şekil 3.14. Tek giriş ve çıkışlı bir sistem modeli

Bu yöntemin deneysel modal analize göre farkı, uyarı (tahrik) sinyalinin ölçülmemesidir. Buradan hareketle rastgele uyarılan bir yapının bu yöntem ile modal analizinin gerçekleştirilebilmesi için yeterli sayıda titreşim modunun uyarılması gereklidir. Operasyonel modal analiz, büyük yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesi amacıyla inşaat mühendisliği alanında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu yöntemin uygulama alanında zaman alan ve frekans alan yöntemleri olmak üzere iki farklı pratiği mevcuttur. Birinci yöntemde zaman alanındaki verilere matematiksel bir model uydurmaya çalışırken ikinci yöntem ise ağırlıklı olarak Fourier dönüşümlerini kullanır. Bu tür yöntemler, doğrudan doğal frekanslar ve titreşim modu şekillerinin belirlenmesi imkânı tanıdığı için pratik olarak daha avantajlıdır.

Bir titreşim testinde deneysel tepki modelinin belirlenmesi, tahrik noktası ve buna karşılık gelen bütün transfer ölçümlerinin yapılmasını gerektirmektedir (Ewins, 2000). Bu ölçümler; özel matematiksel fonksiyonlar ile filtrelenmiş sinyaller, örtüşme (aliasing) etkisini en aza indirmek ve iyi bir çözünürlüğe sahip zaman verisi elde etmek amacıyla yüksek örnekleme frekansı ile ölçülür. Her bir ölçümün süresi, ölçümün frekans çözünürlüğünü belirler. Daha sonra ivme verilerinin frekans alanına dönüşümü için eksponansiyel pencereleme ve çoklu ölçümlerin ortalaması alınır. Aynı pencereleme işlemi girdi olarak ölçülen kuvvet verisine de uygulanır. Pencereleme işlemi, zaman verisinin kesilmesini engeller. Bu verinin kesilmesi bir dizi frekans üzerinde rezonans frekanslarının normalden büyük veya küçük gibi istenmeyen bir etkiye neden olur, bu durum fire (leakage) olarak adlandırılır. Nihayetinde frekans alanına dönüşüm, her sinyal üzerinde ayırık hızlı Fourier dönüşümü uygulanarak elde edilir.

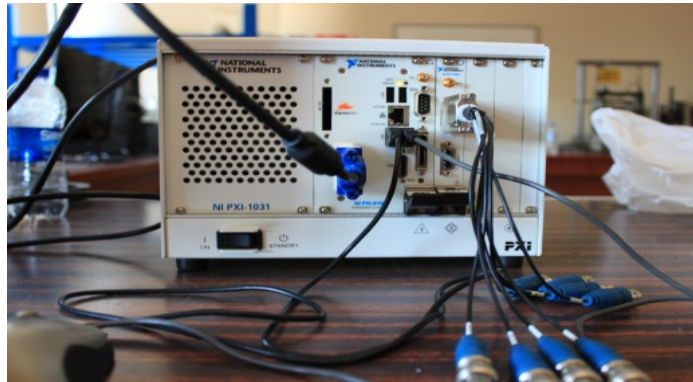
Titreşim testinde örnekleme frekansı çok önemli bir parametredir. Çünkü örnekleme, bir sinyalin ayırık zaman veya boşluğun fonksiyonu olarak nümerik bir sıraya dönüştürülmesi işlemidir (Dodson ve Silva, 1985). Analog sinyallerin bilgisayarlarda işlenebilmesi için dijital forma dönüştürülmesi gerekmektedir. Ancak analog bir sinyal hem zaman hem de genlikte sürekli iken, dijital bir sinyal ise hem zaman hem de genlikte ayırıktır. Sürekli bir zamandaki sinyalin ayırık bir zamandaki sinyale dönüşümü için örnekleme olarak adlandırılan bir işlem uygulanır. Dönüştürülen bir sinyalin değeri, o sinyalin ölçümü için seçilen zaman aralıkları, yani periyodu ile orantılıdır. Dolayısıyla eğer bir sinyal, çok fazla frekans bileşenleri içeriyorsa, sinyaldeki bilgilerin kaybolmasını önlemek için daha yüksek bir oranda örnekleme göz önünde bulundurulmalıdır. Bir yapıya ait frekansların doğru bir

şekilde belirlenebilmesi için sinyalin, hedef frekansının iki katında örnekleme yapılması gerekir (Dodson ve Silva, 1985). Örnekleme Teoremi, bir sinyalin F , sinyaldeki maksimum frekanstan iki kat daha büyük değere sahip olmak kaydıyla, frekansının tam olarak çoğaltılabileceğini ifade etmektedir (Allemang 1999).

Örnekleme frekansını artırmak, belirli bir zaman aralığında edinilen veri noktalarının artmasına neden olur. Öte yandan pencereleme işlemleri, verilerin kendisinde tahribata neden olur ve mümkün olduğunca kaçınılması gerekir. Örtüşme, bir sinyalin kötü örneklenmiş verilerinde yanlış frekans bileşeninin ortaya çıkmasına neden olur. Uyarma ölçümleri için dar bir bant genişliği seçimi ve çözünürlük spektrum sayısının artırılması her zaman göz önünde bulundurulmalıdır.

3.4.1 Veri toplama cihazı

Bu tez çalışmasında sensörler ile uyumlu National Instruments NI PXI-1031 (Texas, USA) cihazı, veri toplama cihazı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.15). Bu ölçüm cihazının temel görevi; fiziksel sinyallerin ölçülmesi, işlenmesi ve depolanmasıdır.



Şekil 3.15. Veri toplama cihazı

Sinyallerin işlenmesi LabVIEW tabanlı bir program aracılığı ile yapılmıştır. Ölçüm sonrası ham veriler USB çıkışından alınarak, Matlab yazılımında FFT (Fast Fouier Transform – Hızlı Fourier Dönüşümü) komutu ile hazırlanan bir program yardımıyla FTFlar elde edilmiştir (Mathworks, 2012). Bu program ile ilgili bilgiler Bölüm 3.4.4’te ayrıntılı olarak verilmiştir.

3.4.2 İvmemetreler

Modal analiz için çeşitli transdüser türleri bulunmasına rağmen piezoelektrik transdüser tipi bu test işlemlerinde yaygın olarak kullanılır. Geniş frekans aralığı, iyi lineerite ve nispeten dayanıklı bir yapıya sahiptir. Piezoelektrik transdüser, titreşim gibi hareketlere maruz kaldığında, elektrik çıkışı üreten elektro-mekanik bir sensördür. Elektrik çıkışı, mekanik olarak gerildiğinde elektrik yükü yaratan bir kristal elemanı ile gerçekleştirilir. İvmeölçer hareket ettiği zaman içerisindeki kütle, hareketin ivmesi ile orantılı olan kristal elemana kuvvet uygular. Bu durum Newton Yasasına riayet etmektedir.

Piezoelektrik malzemelerin uygulama alanları dört kategoride özetlenebilir: aktüatörler (uyarıcılar), sensörler, transdüserler (dönüştürücüler) ve jeneratörler. Aktüatör olarak kullanılan piezoelektrik malzemeler, bir elektrik sinyalini fiziksel bir yer değiştirmeye dönüştürür. Sensör olarak kullanılan piezoelektrik malzemeler titreşim, ivme ve basınç gibi fiziksel bir parametreyi elektrik sinyaline dönüştürür. Transdüser kategorisindeki piezoelektrik malzemeler ise hem elektrik enerjisinden bir ultrason sinyali üretebilir hem de bir sesi bir elektrik sinyaline dönüştürebilir. Ayrıca bu malzemeler kaynak, temizlik, tıbbi teşhis alanlarında kullanıldığı gibi akış seviyesini, oranını ve uzaklığı ölçmek için de kullanılmaktadır.



Şekil 3.16. Hafif seramik PCB 352A24
ivmemetre

Piezoelektrik malzemelerin kristal (kuvars, turmalin vb.), polimer veya seramik çeşitleri bulunmaktadır. Bu materyallerin polimer formu PVDF (polivinilidin diflorür) olarak adlandırılan çok ince formdadır ve yaygın olarak sensör teknolojileri

için kullanılmaktadır. Hem sensör hem de aktüatör olarak kullanılan seramik formundaki materyal PZT olarak adlandırılmakta ve Kurşun, Zirkonat, Titanat, Titanyum ve farklı Niobat çeşitleri bulunmaktadır. Piezoelektrik transdüserler, iyi ölçüm hassasiyeti, hızlı tepki vermesi ve hem sensör hem de aktüatör olarak kullanılmaya imkân vermesi bakımından birçok avantaja sahiptirler. Ancak bu malzemelerin yüksek maliyeti, kırılganlığı ve düşük mekanik uyumu gibi özellikleri yüzünden yapısal izleme uygulamalarında kullanımı sınırlı seviyededir.

Modal analiz uygulamalarında sensör tarafından desteklenen hassasiyet, kütle ve frekans aralığı gibi parametreler sensörlerin en önemli özelliklerini oluşturmaktadır. Bu çalışmadaki ivmemetrelerin hassasiyeti ve frekans aralığı, araştırılan kompozit malzemelerin hedef frekans aralığına uygundur bu nedenle genel amaçlı, hafif ve piezoelektrik kristali olan 4 adet PCB 352A24 ivmeölçerler kullanılmıştır (Şekil 3.16). İvmeölçerin ağırlığı Çizelge 3.3'te görüleceği üzere 0.8 gramdır. İvmemetre kütleleri, göz önüne alınan numunelerin kütlesi ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Dolayısıyla numunenin dinamik davranışı üzerindeki etkisi göz ardı edilmiştir.

Titreşim testlerinde ivmemetrelerin ölçüm yerleri, o sisteme ait serbestlik derecesini etkilemektedir. Çünkü her titreşim modunun bir düğüm noktası (Bir sistem, doğal frekansında yani bir modda uyarıldığında, o frekansa karşılık gelen referans noktaların yer değiştirmesi sonucu mod şekli ortaya çıkar. Mod şekli, her mod için farklıdır. Bazı modlarda, sistemde hareket etmeyen sabit noktalar vardır ve bu noktalara düğüm noktaları denir) bulunmaktadır ve ölçüm alınan yer bu düğüm noktası ile çakışır ise herhangi bir dinamik davranış verisi elde edilemeyecektir. Dolayısıyla bu gibi durumları önlemek için ilgilenilen frekans aralığındaki düğüm -

Çizelge 3.3. PCB 352A24 ivmemetrenin özellikleri

İvmemetre Özellikleri	Bilgiler
Ağırlık	0.8 gm
Hassaslık	($\pm 10\%$) 100 mV/g (10.2 mV/(m/s ²))
Ölçme Aralığı	± 50 g pk (± 490 m/s ² pk)
Genişbant Çözünürlüğü	0.0002 g rms (0.002 m/s ² rms)
Frekans Aralığı	($\pm 5\%$) 1.0 to 8000 Hz
Algılama Elemanı	Seramik

noktasından hem uyarı hem de ölçüm alınmamalıdır. Uyarı noktası düğüm noktasına yakın olursa ilgilenilen frekans tepki verileri çok zayıf olacaktır. Bu problemlerin önüne geçmek amacıyla birden fazla noktadan ölçüm alınması daha uygundur. Bu tez çalışmasında yaşanabilecek bu problemleri engellemek amacıyla her numunenin titreşim davranışlarını elde etmek için dört farklı noktadan ölçümler alınmıştır.

3.4.3 Darbe çekici

Bir yapıya ait davranış sinyali, o yapının titreşim davranışıyla ilgili bilgileri içerir. Bu modal parametreler bir uyarı sinyali ile yapıdan çıkartılabilir. Bu durum, daha önce bahsedildiği gibi modal analizde yaygın olarak kullanılan güvenli bir yöntemdir. Dinamik testlerde kullanılan darbe çekicileri Dirac delta darbesine yakın bir uyarı sinyali sağlamak üzere tasarlanmış bir cihazdır. Sinyal işleme teorisinde bu uyarı sinyali, teorik olarak sonsuz küçüklükte bir zaman aralığında sonsuz büyüklükte bir genlik ile yapıya uygulanabilen ve sıfırdan sonsuza kadar tüm frekanslardaki titreşimleri eşit olarak uyarma kabiliyetine sahip olduğu kabulüne dayanır. Gerçek titreşim uygulamalarında ise darbe çekici, sınırlı bir frekans aralığını uyandırabilme kabiliyetine sahiptir.



Şekil 3.17. PCB 086C01 darbe çekici

Darbe çekici tarafından uygulanan uyarı, mümkün olduğunca çok frekans uyandıracak kadar kısa ve doğru şekilde örneklenebilecek kadar uzun olmalıdır. Darbe çekicinin uyarı sırasındaki hızı da frekans içeriği bilgisini etkileyebilir. Bu

nedenle darbe çekiçlerinde kullanılan başlık tipi önem arz etmektedir. Yumuşak bir başlık ile uzun şok yaratırken daha az frekans uyarır ancak uyarı sinyalinin daha iyi örneklenmesine olanak tanır. Bu durumda, daha doğru bir uyarılma spektrumu sağlanır ve karşılık gelen ayırık Fourier dönüşümü daha az örtüştürmeye uğratılmış olur. Sert bir başlık kullanılması durumunda, Dirac delta fonksiyonu uyarılma sinyaline yakın kısa bir şok üretilirken daha yüksek frekanslar uyarılabilmekte ancak uyarma sinyali kötü örneklenebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan darbe çekici Şekil 3.17'den görülebilir. PCB 086C01, 11.2 [mV / N] hassasiyet, ± 444 (N pk) darbe çekici için ölçüm aralığı ve kuvars algılama elemanına sahip olan bir darbe çekicidir.

Bu çalışmadaki çekicin darbe ucu operatöre farklı başlık takma olanağı sağlayan dişli bir deliğe sahiptir. Bir darbe çekicindeki farklı başlık seçenekleri operatöre uygulanan kuvvetin frekans içeriğini ve darbe genişliğini değiştirme imkânı verir. Çekiç başlık seçimi, yukarıda bahsedildiği gibi elde edilecek ölçüm üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Uyarı frekans aralığı girdisi çoğunlukla seçilen başlığın sertliği ile kontrol edilir. Bu nedenle bir titreşim analizi için başlık seçimi, ilgilenilen tüm aralıktaki frekansları uyarabilecek şekilde seçilmelidir. Bu tez çalışmasındaki numuneler yüksek enerji yayma kabiliyetine sahip oldukları için maksimum girdi uyarımı sağlayabilecek sert alüminyum başlık seçilmiştir.

Titreşim test uygulamalarında gezici bir çekicin birçok avantajı bulunmaktadır: Ayrıntılı bağlama gerektirmeyen, hızlı, taşınabilir ve farklı bölgelerden ölçümler için çok uygundur, nispeten ucuzdur, yapının değişken bir kütlesi yoktur. Özellikle hafif yapıların titreşim testi uygulamalarında önem arz etmektedir çünkü kütlenin bir noktadan bir noktaya değişmesi, bir ölçümden diğerine modal frekanslarda kaymalara neden olabilir. Gezici bir çekicin dezavantajları ise; özellikle sert çekiç başlıklı testlerde çift çarpmanın oluşması olasılığı, uyarı sinyalinin analogtan dijitale dönüştürülmesi sırasında muhtemel aşırı veya düşük yüklenmesi olarak sıralanabilir.

Modal analizin ikinci varsayımı lineeritedir (Ewins, 2000). Bu varsayım olmadan modal analiz yapılamaz. Bu varsayım, bir sistemin davranışını belirli

modların bir birleşimi olarak formüle edilebileceğini ifade eder. Lineerite varsayımını kontrol etmenin bir yolu, FTF verilerinin nicel ya da nitel olarak uyarma genliklerinden bağımsız olduğunu göstermektir (Avitable 2000). Nicel olarak aynı davranış sonuçlarının değişmezliğini elde etmek kaydıyla bu varsayım, aynı noktadan farklı genliklerde testlerin yapılması ile uygulanabilir. Bu tez çalışmasında aşağıdaki bahsedileceği gibi tüm numunelere darbe çekici ile sadece bir noktadan (ankastre uca 20 cm uzaklık) uyarı sinyali verilmiştir.

3.4.4 Matlab program bilgileri

Dokunmuş aramid ve karbon kompozit kirişlerin titreşim cevabı aşağıda adımları sıralanan Matlab programı (Ek 2’de görülebilir) kullanılarak elde edilmiştir. Bu program sırasıyla;

- Titreşim deneyi için frekans atanması ve veri alınma sıklığının belirlenmesi,
- Titreşim deneyi sonuçlarının .txt uzantılı dosya olarak hazırlanıp, analizi yapılacak dosyanın belirlenmesi,
- Genlik-Zaman aralığındaki başlama ve bitiş zamanlarının belirlenmesi,
- Başlama ve bitiş zamanlarının veri alınma sıklığı ile çarpılması,
- .txt uzantılı dosyadaki her bir kolonun zaman genlik ve diğer ivmemetrelerle atanması,
- Genlik-zaman cevabının hangi ivmemetre ile görüntüleneceğinin belirlenmesi,
- Titreşim deneyi ham verilerinde ivmemetreler için başlama ve bitiş zamanına göre cevabın yeniden yazılması,
- Matlab harmonik sinyal oluşturma sıklığının belirlenmesi,
- Görülmek istenen maksimum ve minimum frekans aralığının belirlenmesi,
- Her bir ivmemetre cevabının grafiklerinin gösterilmesi,

adımlarından oluşmaktadır.

Matlab programı FFT komutu mantığı; 1 hertz, 2 hertz, ... şeklinde harmonik sinyalleri oluşturarak her bir ivmemetre sütunundaki mevcut cevaplar ile karşılaştırıp

çakışan frekans değerleri için ekranda pik şeklinde gösterilmesidir. Bu yüzden 2'nin katları olacak şekilde frekans çözünürlüğü kullanılması, Fourier dönüşümünü çok hızlı elde edilmesini sağlayacaktır (Oran Brigham, 1988). Burada FFT sinyali için iki değerinin katları şeklinde belirlenen harmonik sinyalin oluşturularak mevcut veriler ile karşılaştırılması istenmiştir. FFT değerlerini gerçek genliğe dönüştürmek için örnekleme zamanının $(2 * \pi)$ ile çarpılması gerekmektedir. Ayrıca oluşturulan harmonik sinyaller simetrik olduğu için bu verilerin yarısı için hesaplama gerçekleştirilecektir.

Matlab programının örnekleme frekansının ya da diğer bir ifadeyle frekans çözünürlüğünün yeterliliği için inceleme yapılmıştır. Matlab'ta frekans çözünürlüğünü ifade eden formülasyon Denklem 3.2'de verilmektedir (URL-2).

$$\Delta_{freq} = F_s / nfft \quad (3.2)$$

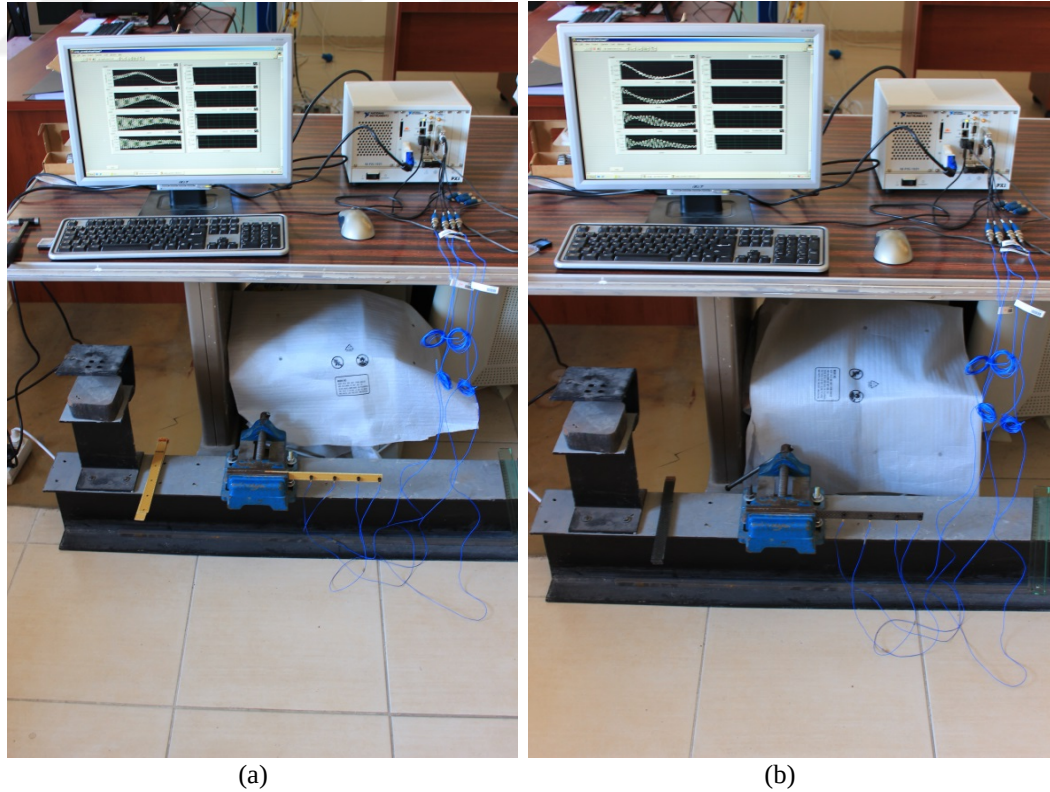
Bu denklemdeki F_s titreşim testi sırasındaki örnekleme frekansı, $nfft$ ise Matlab programında Fourier dönüşümünü hesaplamak istediğimiz sinyalin uzunluğudur. Bu programdaki $nfft$ komutu, dönüşüm işlemini hesaplamadan önce zaman alanı vektörünü sıfırlamaktadır. Matlab'ta doğru bir analiz için $nfft$ değerinin, zaman alanda titreşim cevabı incelenecek herhangi bir zaman aralığında (her saniye için veri sayısı F_s değerine eşittir) verilerin sayısına eşit ya da bu değerden daha büyük olması gerekir. Aksi takdirde frekans değerleri, spektrumda normalden büyük (aliasing) olarak aksettirelecektir.

Kompozitlerin doğal yaşlandırma koşullarına karşı nispeten dayanıklı olması ve her yaşlandırma dönemindeki numune sayısının (her 90 gün için 5 adet kiriş) az olması, bir yıl gibi bir sürede yaşlandırma koşullarının kompozitlerin dinamik davranışına etkisinin belirlenebilmesi için Denklem 3.2'deki frekans çözünürlük (Δ_{freq}) değerinin çok hassas olmasını gerektirmektedir. Fourier dönüşümü hesaplamak istenen sinyalin uzunluğu olan $nfft$ değeri, pozitif frekans alanı değerlerini içerdiği gibi negatif frekans değerlerini de içermektedir. Bu sebeple Matlab programındaki $nfft$ değerleri, zaman alanında incelenen titreşim testi için

doğal frekansların ihmal edilebilecek seviyede değişmediği gözlenene kadar, yine 2 nin katları olacak şekilde sırasıyla artırılmıştır. Bu işlem her seferinde tekrarlanarak $nfft$ değerinin $512 * 256$ olarak belirlenmesinin uygun olduğuna karar verilmiştir. $nfft = 512 * 256$ için Δ_{freq} yaklaşık olarak 0,03 gibi araştırma bulgularını çok ciddi oranda etkilemeyecek bir değere sahip olduğu görülmüştür.

3.4.5 Titreşim testleri

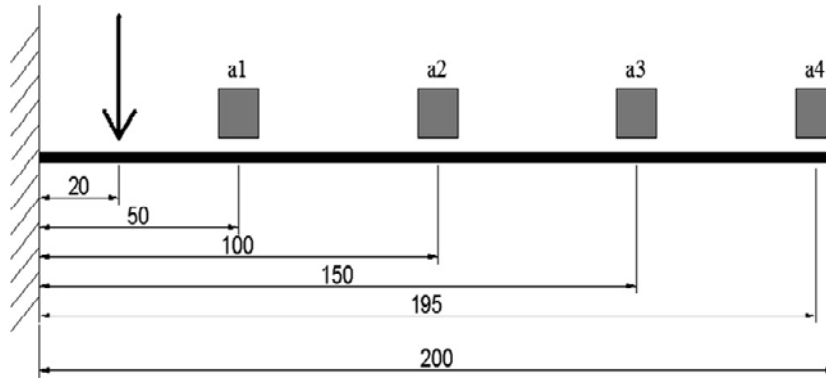
Daha önceki başlıklarda ifade edilen bilgiler dikkate alındığında, titreşim testleri çok dikkat gerektirmekte ve bütün numuneler için aynı işlemlerin tekrar edilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle Şekil 3.18a ve 3.18b de görüleceği üzere deney düzeneğine bağlanan kompozit kirişlerin çene kısmı dışındaki boyun (200 mm) aynı olmasına, her numune için sıkma kolunun seviyesinin aynı olmasına, ivme metrelerin aynı konumlara bağlanmasına, numunenin çeneye aynı paralellikte bağlanmasına, ivmemetre kablolarının yere temas etmesi sağlanarak birbirlerine dolanmamasına -



Şekil 3.18. Dokunmuş aramid (a) ve karbon elyaf (b) takviyeli kompozit kirişlerin titreşim deney düzeneği

azami dikkat gösterilmiştir.

Kompozit kirişlerin titreşim deneyleri gerçekleştirilirken 4 kHz örnekleme frekansı kullanılmıştır. Nyquistik (Nyquist-Shannon örnekleme teoremi) kriter gereği örnekleme frekansı ilgilenilen bant genişliğinin en az 2 katı olması gerekmektedir. Kompozit numunelerin en büyük frekans değeri 650 Hz civarında olduğu için örnekleme frekansı 4 kHz olarak seçilmiştir. Ayrıca, örnekleme frekansının kompozit kirişlerin en büyük doğal frekansından yaklaşık 5 kat büyük olduğu göz önüne alındığında örnekleme değerinin fazlasıyla uygun olduğu görülmüştür. Deney sırasında kompozit kirişlerin ilk 5 frekansı belirlenmeye çalışılmış ancak kompozit materyallerin yüksek sönümlenme kabiliyeti nedeniyle darbe çekici ile bu mümkün olmamıştır. Genel anlamda çalışma koşullarında ilk frekanslar önem arzettiğinden ilk 3 frekans değişimi ile çalışmaya devam edilmiştir. İvmemetrelerin konumlarının belirlenmesi, Capozucco (2014)'nın çalışması dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler iki şekilde tahrik edilmiştir. İlk uyarı bahsi geçen çalışma referans alınarak, sabitlenmiş taraftan 20 mm uzaklıkta çekiç ile tahrik edilmiştir (Şekil 3.19). Ancak ham verilerin işlenmesi neticesinde bu uyarma yöntemi ile kompozit kirişlerin sönümlenme oranlarının belirlenemediği görülmüştür. Zaman alandaki verilerine Fourier dönüşümü uygulandığında frekans alandaki piklerin seçimi mümkün olmamıştır. Bu nedenle sönümlenme oranlarının belirlenmesi amacıyla kirişler serbest ucundan 1 cm çekilerek bırakılmıştır. Bu işlem için deney düzeneği üzerinde kirişler, önceden belirlenen 1 cm mesafesine kadar elle çekilip bırakılmıştır.



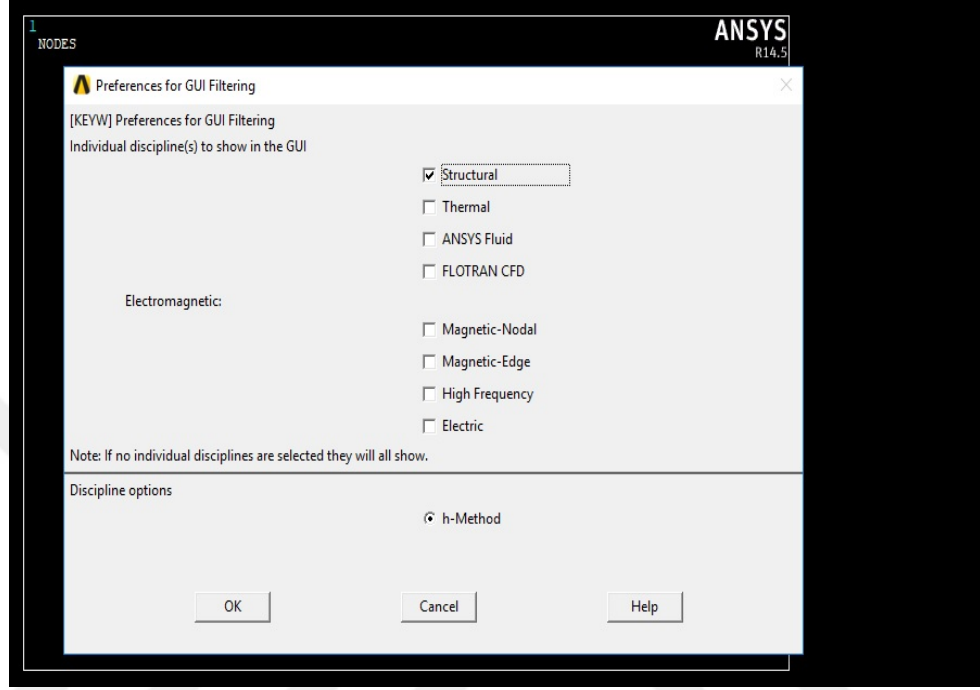
Şekil 3.19. İvmemetre noktaları ve tahrik noktası (Capozucca, 2014)

3.5 Ansys Programında Modelleme

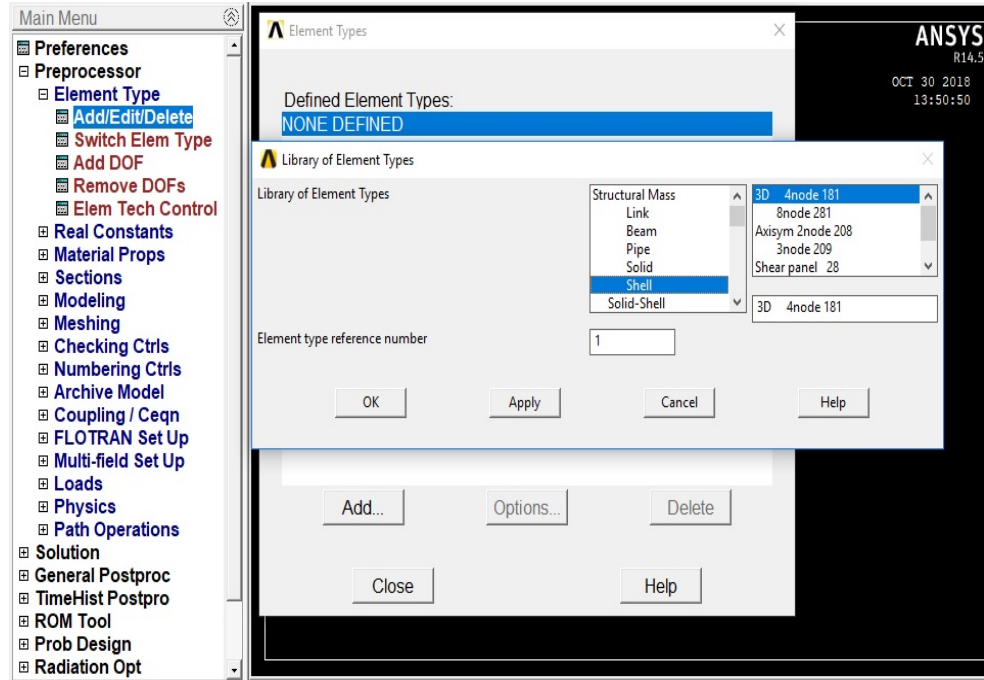
Analitik model her şeyden önce bir sistemin davranışı fiziğinin anlaşılmasını sağlayacaktır. Yapısal dinamikte davranış fiziğini belirleme genellikle sonlu elemanlar metodu yardımı ile oluşturulur. Bu yöntem, bir yapının matematik modelinin kolay çözülebilen alt yapılara ayırmaya yardımcı olur. Dolayısıyla bir sonlu elemanlar modeli n serbestlik derecesine sahip salınımlı bir dinamik sistem olarak görülebilir. Bu yöntemi uygulamak için birçok ticari program geliştirilmiştir ancak bu çalışmada ANSYS yazılımı kullanılmıştır. Kompozit kirişlerin ANSYS model çözümlemesi yapılırken kabaca geometrinin oluşturulması, malzeme özelliklerinin girilmesi, mesh tanımlama, sınır koşulları belirlenmesi, yüklerin girilmesi ve algoritma seçimi adımları birbirini takip etmiştir. Bu tez çalışmasında nümerik analiz ANSYS adımları, aşağıda sıralanmıştır:

- i. **Ansys Mechanical APDL> Main Menu> Preprocessor> Preferences> Structural** yolu izlenerek klasik Ansys ara yüzünde yapılacak olan analiz türü seçilir (Şekil 3.20).
- ii. **Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete> Add > Shell 3D 4node 181** yolu izlenerek element tipi seçilir (Şekil 3.21).
- iii. **Main Menu> Preprocessor> Material Props> Material Models> Structural> Linear> Orthotropic** seçilerek analizi yapılacak olan malzemenin elastisite modülleri, poisson oranları ve kayma modül değerleri girilir. Burada numunemiz dokunmuş olduğundan $E_x = E_y$ olarak, E_z ise matris malzemesi elastisite modülü değeri esas alınarak veri girilmiştir (Şekil 3.22).
- iv. **Main Menu> Preprocessor> Material Props> Material Models> Structural> Density** yolu ile malzemeye ait yoğunluk değeri girilir (Şekil 3.23).
- v. **Main Menu> Preprocessor> Sections> Shell> Lay up> Add/Edit/Delete** seçilerek kompozit numuneye ait kalınlık değeri 5'e (5 katlı olduğundan) bölünerek yeni açılan penceredeki her kat için girilir (Şekil 3.24).

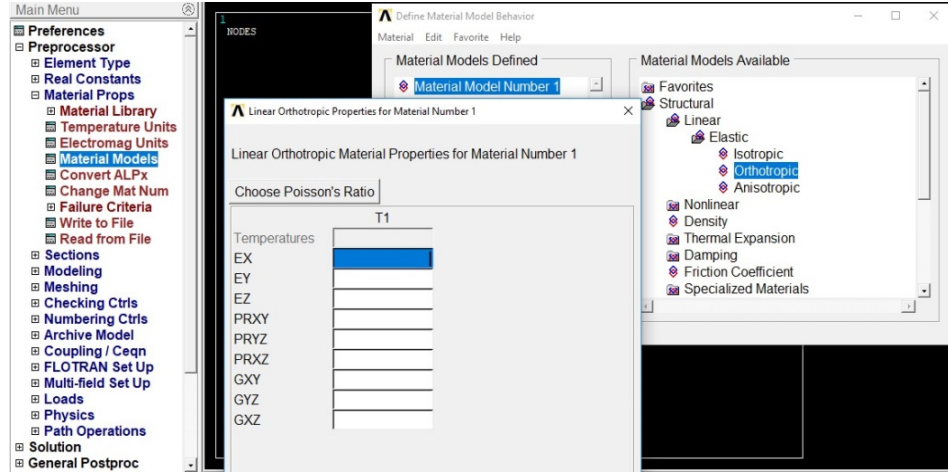
- vi. **Main Menu> Preprocessor> Modelling> Create> Areas> Rectangle> By Dimensions** komut yolu ile de numuneye ait bir katman modellenir (Şekil 3.25).



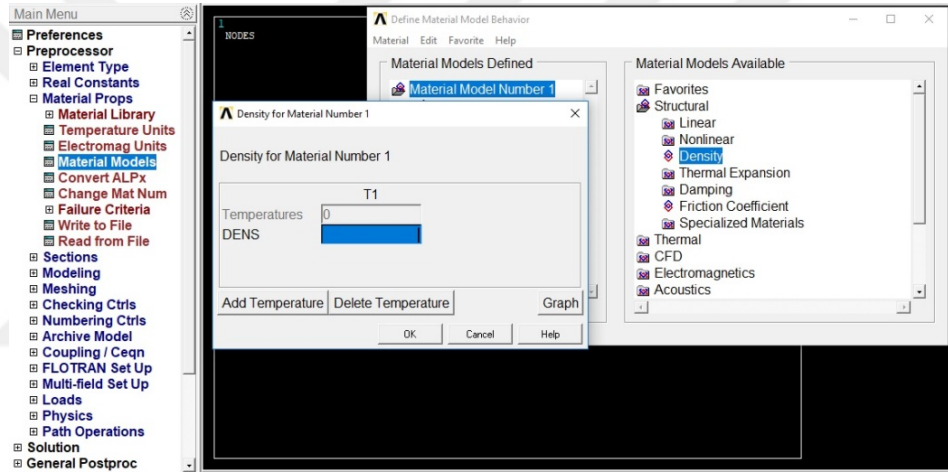
Şekil 3.20. Ansys’de analiz türü seçimi



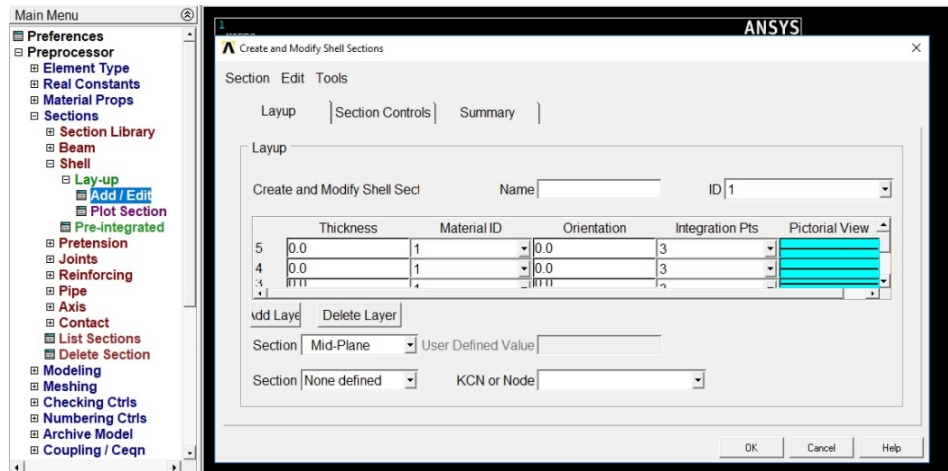
Şekil 3.21. Ansys’de element tipi seçimi



Şekil 3.22. Ansys’de materyal model seçimi

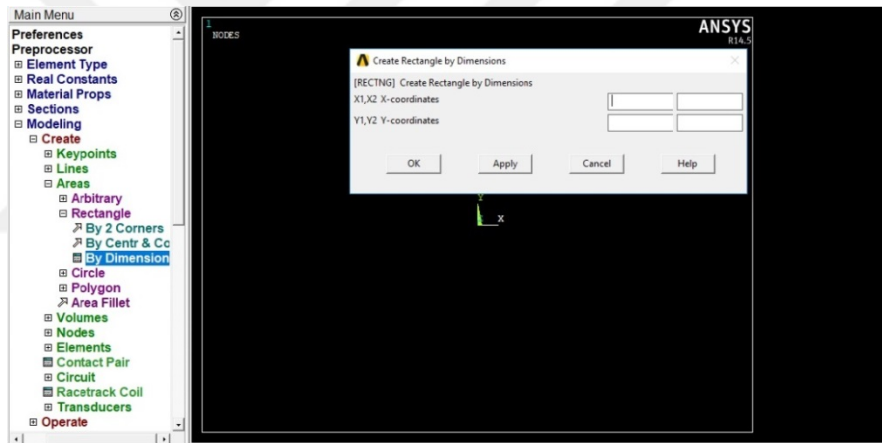


Şekil 3.23. Ansys’de yoğunluk girişi

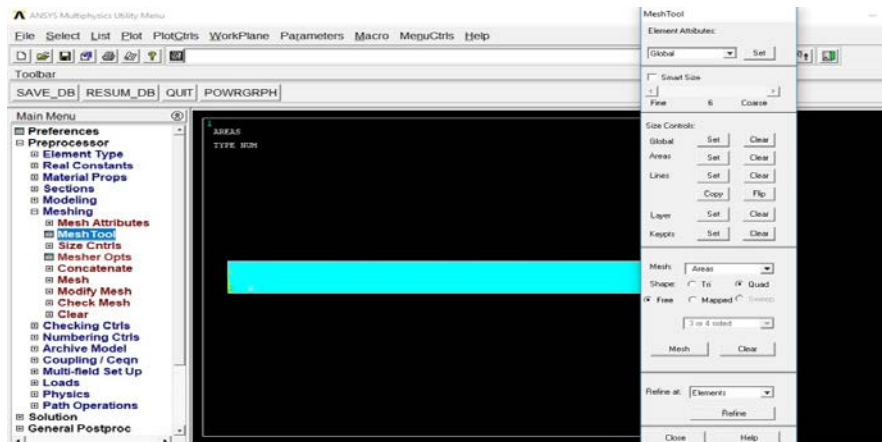


Şekil 3.24. Ansys’de Kalınlık girişi

- vii. Bir yapıya ait sonlu eleman analizi, yapının karmaşıklığı nedeniyle küçük parçalara bölünmeden çözülmesi imkânsız olabilir. Bu nedenle analizi gerçekleştirebilmek için yapılar bir dizi nokta ve hücrelerden oluşan altyapılara bölünür. Bu mesh yapısı, büyük yapıya ait nümerik analizi Kısmi Differansiyel Denklemler ile gerçekleştirmek için herhangi bir boyutta ve şekilde olabilir. Büyük yapıdaki her mesh yapısının çözümü gerçekleştirilerek sonuçlar birleştirilir ve analiz tamamlanır. Mesh işlemi; **Main Menu> Preprocessor> Meshing> Mesh Tool** komut yolu ile elde edilir. Mesh derecesi yeterli bulunmaz ise yine aynı komut yolunda açılan pencerede “Refine” seçilerek istenilen derecede mesh yoğunluğu artırılabilir (Şekil 3.26). Ayrıca, **List> Status> Preprocessor> Meshing** komutu ile mesh durumuna ait bilgiler görülebilir.

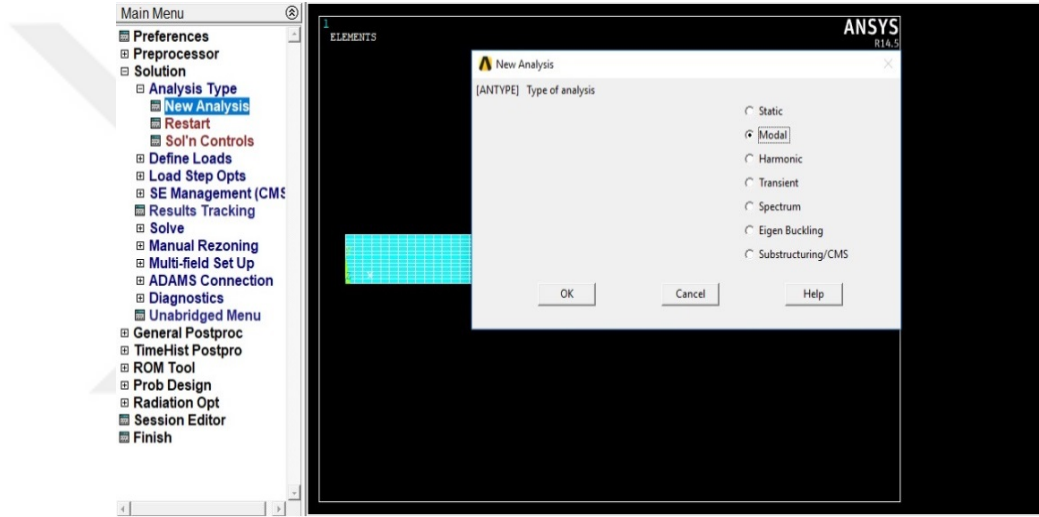


Şekil 3.25. Model oluşturma

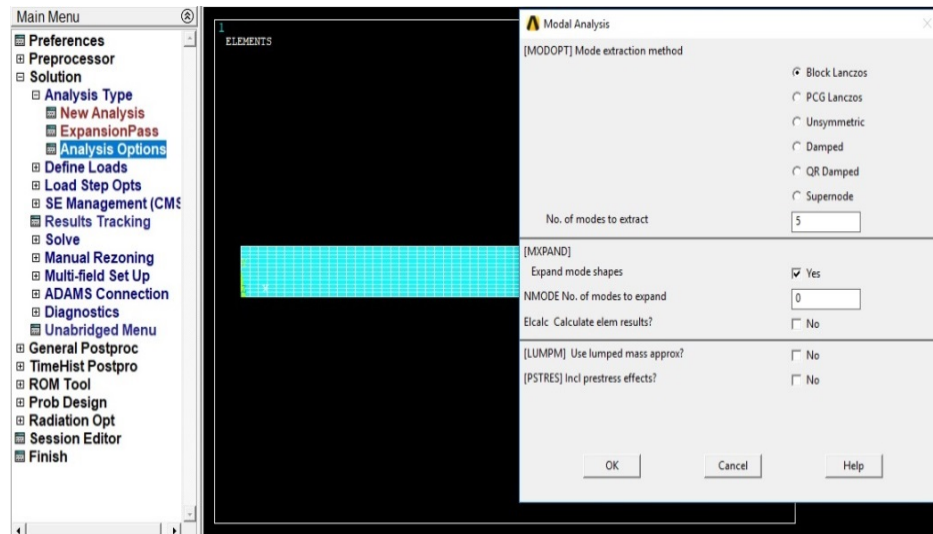


Şekil 3.26. Mesh oluşturma

- viii. **Main Menu> Solution> Analysis Type> New Analysis> Modal** komutu ile gerçekleştirilen analiz tipini seçilir (Şekil 3.27).
- ix. **Main Menu> Solution> Analysis Type> Analysis Options** ile açılan çözümlemeyi gerçekleştirecek ekstraksiyon mod algoritması ve ekstrakt sayısı seçilir. Sonraki açılır pencere başlangıç ve bitiş değer aralığı seçmemizi sağlar, bu çalışma için “default” hali bırakılmıştır (Şekil 3.28).
- x. **Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Structural> Displacement> On Line** yolu ile “ALL DOF” seçilip numune ankastre olacak şekilde giriş, sabitlenir (Şekil 3.29).

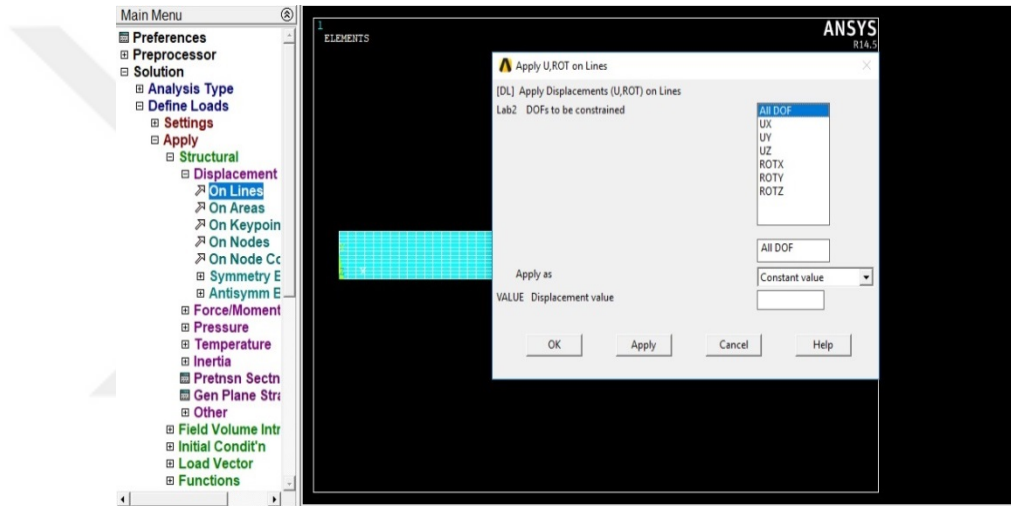


Şekil 3.27. Analiz tipi seçimi

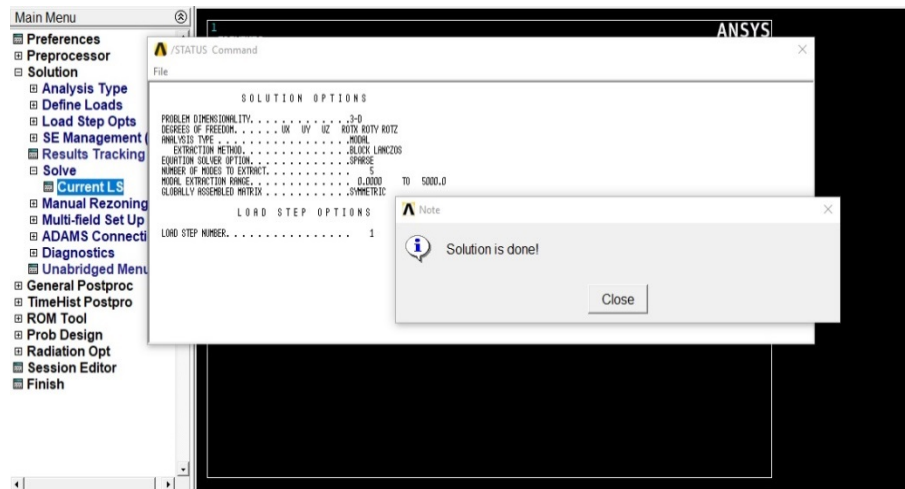


Şekil 3.28. Analiz seçeneklerinin girilmesi

- xi. **Main Menu> Solution> Solve> Current LS** yolu ile analiz gerçekleştirilir (Şekil 3.30).
- xii. **Main Menu> General Postproc> Results Summary** komutu ile her bir ekstraksiyon mod sonucu görülebilir.
- xiii. **Main Menu> General Postproc> Read Results> First Set** komutu ile ilk analiz seçilir. Sonra; **Main Menu> General Postproc> Plot Results> Deformed Shape** yolu ile açılan pencerede “**Def+Undeformed**” seçilerek numuneye ait o frekans adımındaki deforme olmamış ve deforme olmuş hali görülebilir.



Şekil 3.29. Ankastrre seçimi



Şekil 3.30. Çözümün gerçekleştirilmesi

3.6 Numunelerin Çevresel Yaşlandırmaya Bırakılması

Bir malzemenin yapısal uygulamada kullanılabilirliğini gösteren bazı mekanik özellikler; eğilmeye karşı direnç (rijitlik), maksimum yük taşıma kapasitesi (mukavemet), maksimum enerji soğurma kapasitesi (tokluk), servis koşullarında bozunma davranışı ve maliyet olarak sıralanabilir. Karbon elyaf takviyeli plastikler, havacılık endüstrisinde en çok kullanılan kompozit yapılardır. Aramid elyaf takviyeli plastikler ise daha çok savunma endüstrisinde kullanılmaktadır. Polimer esaslı kompozit malzemeler, yüksek mekanik performanslarına rağmen metalik alaşımlara göre titreşimler, darbeler, ısı, soğuk, kimyasal korozyon atmosfer, nem, yakıt, çözücüler ve ultraviyole (UV) gibi agresif çevresel yaşlanma faktörlerine karşı daha savunmasızdır. Bu nedenle kritik bileşenlerde bu materyallerin kullanımı sırasında büyük özen gösterilmelidir. Ayrıca malzemelerin bazı diğer özelliklerinin yanı sıra servis koşulları boyunca bozunma davranışı da önem arz etmektedir.

Kompozit malzemelerin yaşlandırılması ile ilgili literatürde yapılan çalışmaların büyük bölümü, kompozitlerin nispeten yüksek sıcaklık (camsı geçiş sıcaklığına bağlı olarak değişen), nem ve UV radyasyon koşullarındaki yaşlandırmalarını içermektedir. Kompozit materyallerin yaşlandırılması literatürde yaygın olarak çalışılmış olmasına rağmen bu malzemelerin bozunma karakteristikleri tam olarak anlaşılamamıştır. Ayrıca kompozit materyaller homojen olmayan bir yapıya sahiplerdir ve her kompozitteki elyaf ve matris malzemesinin farklı olması nedeniyle, yaşlandırma koşullarına bağlı olarak kompozit malzemelerin belli bir karakteristik yaşlanma davranışından bahsedilemez. Farklı elyaf takviyeli veya matrisli kompozitler belirli yaşlandırma koşullarına farklı davranışlar gösterebilir.

Nem ve yüksek sıcaklıklarda uzun süre bekletilme, kompozitlerin viskoelastik özelliklerde değişimlere sebep olabilir. Kompozit yapılardaki nem dağılımı değişiklikleri neme maruz kalan yüzeylerin yakınında dar bir sınır tabakasında yani maruz kalan dış tabakalarda meydana gelmektedir. Bu durum nem içeriği yüksek dış katmanlar ile kuru iç katmanlar arasında bir gerilmenin oluşmasına yol açmaktadır. Bu gerilmeler matris dayanımını aştığında çatlaklar oluşur. Nem ayrıca, elyaf/matris

arayüz bölgesinde şişme nedeniyle mekanik hasara neden olabilmektedir. Bu da elyaf kopma veya ayrılmalarına yol açmaktadır. Kompozit materyal yapısında oluşan küçük çaptaki hasarlar bu materyalin agresif bir ortam yaşlandırma döngüsüne tabi tutulması ile birleşebilmektedir. Böylece hasarın oranı büyümekte ve nem girişi için yeni yolların açılmasına olanak vermektedir.

Literatür bölümünde aktarıldığı üzere, kompozit malzemelerin bozunma davranışlarını etkileyen birçok çevresel koşul bulunmaktadır. Ayrıca, literatürde genel olarak hızlandırılmış yaşlandırma yöntemlerinin mekanik özellikler üstüne olan etkisi çokça çalışılmıştır. Bu nedenle bu tez çalışmasında, doğal yaşlandırma koşullarından nem, sıcaklık ve bu iki koşulun kombine etkisi göz önüne alınmıştır. Ayrıca belirlenen doğal yaşlandırma koşullarının dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin doğal frekans ve sönümlenme özellikleri üzerine olan etkisi de araştırılmıştır. Doğal nemli ortam için 50 cm toprak altı çevresel koşulu seçilmiş iken sıcaklık için güneş altında sergide ve bu iki koşulun kombine etkisi için ise güneş altında su içinde koşulları seçilerek araştırılmıştır.

Araştırma yönteminde hem deneysel hem de nümerik verilerin birbiri ile uyumu görüldükten sonra, 90x90 cm plakanın numuneler sulu testere yardımı ile Bölüm 3.2'deki gibi kirişler halinde kesilmiştir. Dokunmuş karbon ve aramid elyaf takviyeli kompozit kirişlerin, titreşim testlerini sonucunu etkilememesi amacıyla, kesim yerlerinde oluşan fazlalıkları zımparalanmıştır. Yaşlandırma etkisini araştırmak için referans olarak ele alınan kompozit kirişlerin dinamik testleri gerçekleştirilmiş ve ortalaması esas alınmıştır. Bu işlemten sonra yukarıda bahsedildiği gibi numuneler Güneş altında kuru (Şekil 3.31a'da tabla üzerinde bulunan numuneler), Güneş altında suda (Şekil 3.31a'da kap içindeki numuneler) ve Toprak altında 50 cm derinlikte (Şekil 3.31b) olmak üzere deney ortamlarına bırakılmıştır. Özellikle güneş altında kuru durumu için yerden 60 cm yükseklikte 2 metre uzunluğunda ve 50 cm genişliğinde bir masa üretilmiştir. Bu masanın kenarlarında ve ortasında numunelerin sıkıştırılıp sabitlenme özelliği olacak şekilde sıkıştırılıp gevşetilebilir bir sistem yapılmıştır. Tüm numuneler, Şekil 3.31a ve 3.31b'de görüleceği üzere bir yıl süre ile yaşlandırma koşullarına bırakılmıştır.

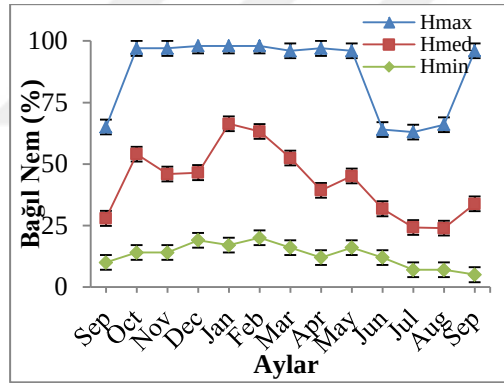
Dinamik testler her üç ayda bir tekrarlanarak referans sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca Şekil 3.32a ve 3.32’de yaşlandırma süresi boyunca aylara göre bağıl nem ve sıcaklık değişimi ile Şekil 3.33’de bir aydaki toplam güneş radyasyonu ile yağmur yağışı miktarı değişimleri verilmiştir.



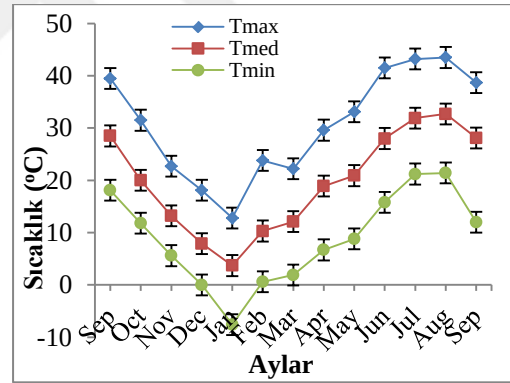
(a)

(b)

Şekil 3.31. Güneş altında kuru ve güneş altında suda şartlandırma (a) ve toprak altında 50 cm derinliğe şartlandırma (b)

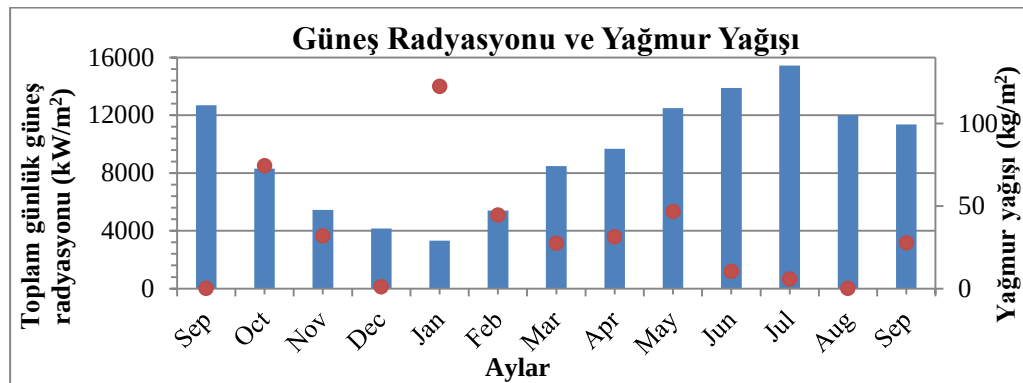


(a)



(b)

Şekil 3.32. a) Yaşlandırma süresince aylara göre bağıl nem ve b) Sıcaklık değişimi



Şekil 3.33. Yaşlandırma süresince günlük toplam güneş radyasyonu ve yağmur yağış miktarı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Otomotiv, havacılık, savunma vb. endüstrilerde kompozitlerin kullanımı 1970'lerin sonlarından beri giderek artmıştır. Petrol kaynaklarının sınırlılığı, karbon(di)oksit emisyonlarının neden olduğu küresel ısınma ve hava kirliliği gibi sebepler yakıt tasarruflu araçların kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu talepleri karşılayabilmek için günümüz araçlarında kompozit materyallerin kullanılması suretiyle ağırlıklarının azaltılması, yakıt tasarrufu sağlanmasına olanak vermektedir. Otomotiv sektöründe özellikle KETP (Karbon/grafit elyaf takviyeli plastik) malzemeleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Savunma sanayinde ise kompozit materyallere çoğunlukla taşıma araçlarında ve zırhlarda kullanım alanı bulmaktadır.

Bu çalışmada, yaşlandırma etkisi altındaki kompozitler Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Tekniği (VDRİT) ile üretilmiştir. Bu metot kompozit yapıların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu üretim sürecinde genellikle birkaç kat dokuma elyaf kumaşlar açık bir kalıba veya tablanın üzerine yerleştirilir ve plastik bir vakum torbası bu kalıbın üzerine yerleştirilir. Vakum torbası içindeki bu kalıbın bir tarafı reçineye diğer tarafı da vakum pompasına bağlıdır. Kalıp içinin vakumlanması ile sertlendirici karıştırılmış sıvı reçine elyaf takviye kumaşlarına emdirilir. Kompozit malzemeyi elde etmek için kürleme ve kalıptan çıkarma adımları takip edilir. Bu üretim yöntemi sırasında infüzyon işlemini hızlandırmak ve kalınlık yönünde sıvı reçine penetrasyonunu arttırmak için oldukça geçirgen bir dağıtım kumaşı kullanılır. Son yıllarda VDRİT, düşük maliyetli kalıplama ve çok büyük yapılara ölçeklenebilirlik özelliği nedeniyle cazip bir üretim yöntemi haline gelmiştir. Ayrıca bu yöntem ile kalıp içerisindeki daha az boşluk içeriği, düşük organik uçucu emisyonlar ve daha az hurda ortaya çıkmaktadır. Sıralanan avantajlarına rağmen, bu üretim yönteminin esas olarak vinil ester gibi oda sıcaklığında kurlenen reçine sistemleri ile beraber kullanılması daha uygundur. Kurlenme için yüksek sıcaklık gerektiren polimer matris kompozitlerin otoklav/prepreg kalıplama tekniği ile üretilmesi daha uygundur.

VDRİT ile üretilen dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar, sulu testere yardımı ile istenen ölçülerde kesilerek yaşlandırılmaya bırakılmıştır. Yaşlandırılan numunelerin titreşim testleri her 3 ayda bir gerçekleştirilmiş ve her bir kompozit grubunun doğal yaşlandırma koşullarına göre bozunması, yaşlandırılmayan (referans) numunelere göre belirlenmiştir. Aşağıdaki bölümlerde sırasıyla yaşlandırma koşullarına göre dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlerin frekans ve sönümleme oranı değişimi verilmiştir.

4.1 Deneysel ve Nümerik Verilerin Karşılaştırılması

Bu çalışmada kompozit numuneler yaşlandırılmaya bırakılmadan önce Şekil 3.18’de gösterilen titreşim deney düzeneği ile 50x50 cm referans plakadan elde edilen üçer tane dokunmuş aramid ve kompozit kirişlerin dinamik testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Bölüm 3.4.4’teki Matlab programı ile titreşim deney verileri işlenmiş sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’deki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.1 Dokunmuş aramid kompozit kirişlerin deneysel test sonuçları (Hz)

Numuneler	1.frekans	2.frekans	3.frekans
1	28,32	186,5	556,2
2	30,27	189,5	564,9
3	30,76	195,3	579,1
Ortalama	29,78	190,43	566,73

Çizelge 4.2 Dokunmuş karbon kompozit kirişlerin deneysel test sonuçları (Hz)

Numuneler	1.frekans	2.frekans	3.frekans
1	42,97	274,4	792,5
2	42,48	272	804,2
3	40,53	263,7	NA*
Ortalama	41,99	270,03	798,35

Referans numuneler için titreşim analizi nümerik olarak, ANSYS programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla titreşim testine tabi tutulan aynı numunelerin yoğunluğu hesaplanmış ve Elastisite modülü ise Bölüm 3.3’teki izah edilen şekilde çekme deneyleri yardımıyla belirlenmiştir. Kompozit numunelerine ait yoğunluk, karışım formülü ile bulunmuştur ve numunelere ait ağırlıklar ise hassas terazi (0.001 gr hassaiyet) yardımıyla elde edilmiştir. Kompozit kirişler numuneleri

hassas elektronik kumpaslar (0.01 mm) ile ölçülmüş ve karbon kirişlerin ortalama olarak 20,38 x 245 x 2,2 (en x boy x kalınlık) mm ebatlarında olduğu görülmüştür. Karbon numunelerine ait yoğunluk, matris ve elyaf malzemelerine ait veriler esas alınarak denklem 4.1 ve denklem 4.2'nin kullanılması ile elde edilmiştir. Karbon kompozit kirişlere ait veriler sıralanmıştır.

$$m_f = 10,4855 \text{ gr}, m_g = 4,5748, M = 15,0603 \text{ gr}. \rho_m = 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \rho_f = 1700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$W_f = \frac{m_f}{M}, W_m = \frac{m_m}{M} \quad (4.1)$$

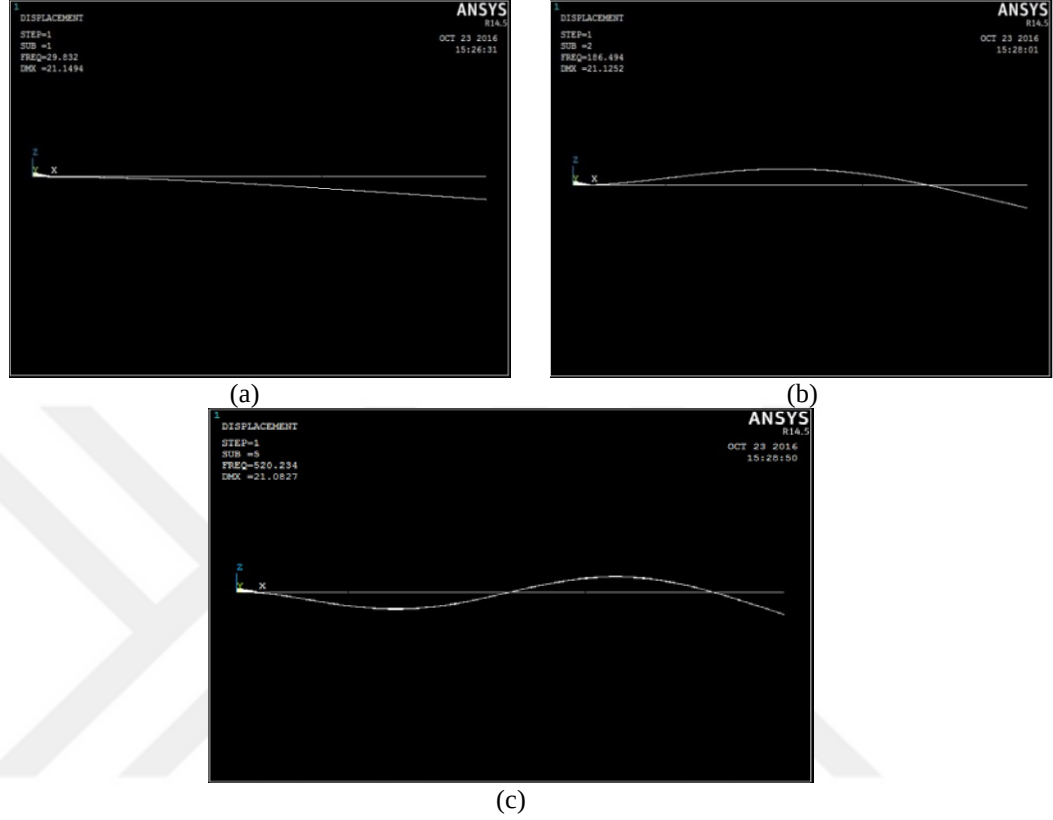
$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m}, \rho_c = 1458,278 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.2)$$

Aynı şekilde, aramid numuneleri ise ortalama olarak 1,79 x 19,5 x 248 mm olarak ölçülmüş ve yoğunluğu, matris ve elyaf malzemelerine ait veriler esas alınarak denklem 4.1'deki kütleli formüller ile denklem 4.2 kullanılarak $\rho_c = 1281,556 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ olarak elde edilmiştir. Aramid kompozit kirişlere ait veriler sıralanmıştır.

$$\rho_m = 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \rho_f = 1450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, m_f = 7,254 \text{ gr}, m_g = 5,1056 \text{ gr}, M = 12,3596 \text{ gr}$$

Mesh elemanı olarak Shell 181 seçilmiştir. Shell 181, görece orta kalınlıktaki tabakalı yapıları analiz etmek için uygundur. Her düğümde, x, y ve z eksenlerinde ötelenme ve dönme olmak üzere altı serbestlik derecesine sahip 4 nodlu elemanlardan oluşmaktadır. Ayrıca bu mesh elemanı lineer, büyük dönme ve büyük gerinimli nonlinear uygulamalar için çok uygundur (URL-3). Kompozit kirişlerin sonlu elemanlar modeli 2280 elemandan ve 3025 düğümden oluşmaktadır. Bu tez kapsamında nümerik modelin çözümü için "Block Lanczos" algoritması seçilmiştir. Lanczos yöntemi, yapısal titreşim uygulamalarında özdeğer problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır (Körük, 2008). Bu yöntem iterasyonun bir başlangıç vektörüyle başladığı güç yöntemlerinin bir türüdür. Kompozit kirişlerin ANSYS'te oluşturulan dokunmuş aramid ve karbon kompozit kirişlerin nümerik

çözüm sonuçları sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’den görülebilir. Elde edilen sonuçlar sırasıyla Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’den görülebilir.



Şekil 4.1 Dokunmuş aramid kompozit kirişlerin ANSYS sonuçları: a) ilk mod, b) ikinci mod ve c) üçüncü mod

Çizelge 4.3. Dokunmuş aramid kompozit kirişlerin nümerik sonuçları

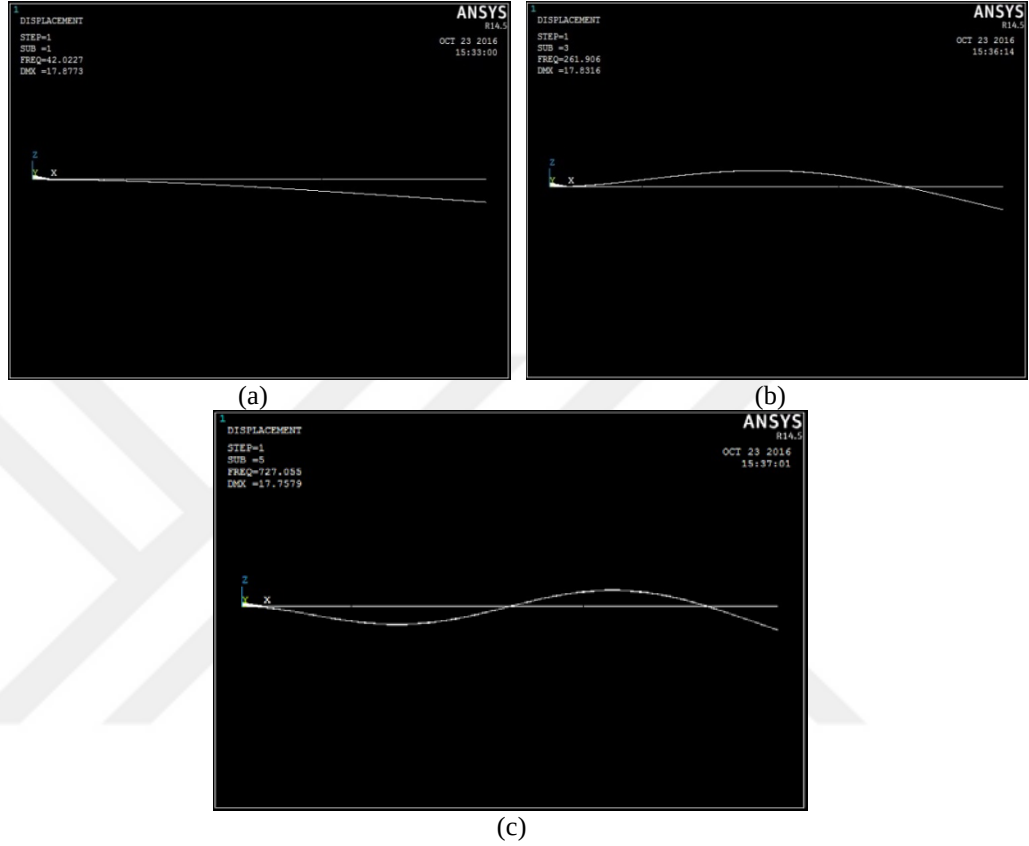
	1. frekans	2. frekans	3. frekans
Doğal Frekanslar (Hz)	29,832	186,494	520,234
Deneysel/Nümerik fark (%)	0,17	2,07	8,20

Çizelge 4.4. Dokunmuş karbon kompozit kirişlerin nümerik sonuçları

	1. frekans	2. frekans	3. frekans
Doğal Frekanslar (Hz)	43.001	269.14	752.36
Deneysel/Nümerik fark (%)	2,41	0,33	5,76

Dokunmuş aramid ve karbon kompozit kirişlerin nümerik ile deneysel veriler karşılaştırıldığında, yani Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’teki yüzde fark dikkate alındığında, sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülür. Dolayısıyla, deneysel veriler ile nümerik veriler birbirini desteklemektedir. Bu durum, deney düzeneğinin

güvenirliliğini ortaya koymuştur ve deneysel yöntemin doğal koşullarda yaşlandırılan dokunmuş aramid ve karbon kompozit kirişlerin dinamik parametrelerine etkisi bakımından uygulanabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.2 Dokunmuş karbon kompozit kirişlerin ANSYS sonuçları: a) ilk mod, b) ikinci mod ve c) üçüncü mod

4.2 Yaşlandırılmış Dokunmuş Aramid Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Doğal Frekans Değişimi

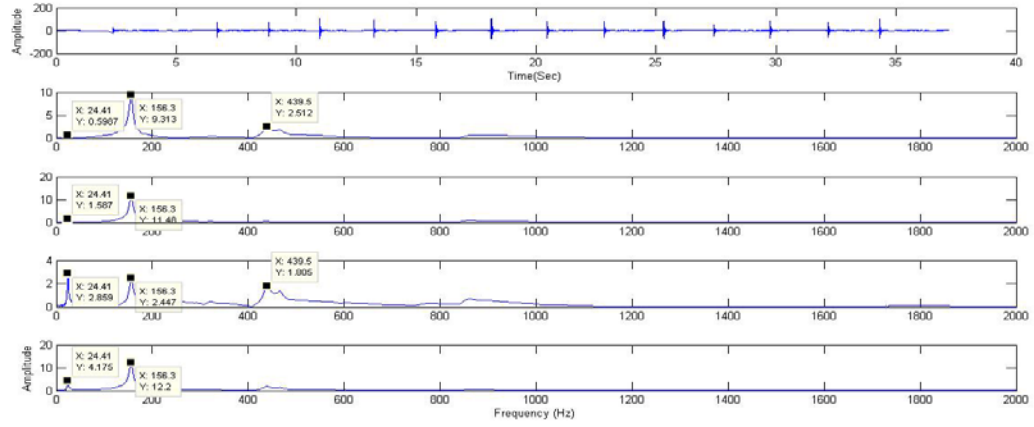
Yaşlandırma koşullarının dokunmuş elyaf takviyeli kompozit kirişlerin ilk üç doğal frekansına olan etkileri titreşim testi uygulanarak araştırılmıştır. Bu test yöntemi ve detayları Bölüm 3 te detaylandırılmıştı. Uygulanan titreşim test cevapları, ham verilerin Fourier dönüşümüne dayanan *fft* komutu esaslı bir program sayesinde Matlab'te işlenmiştir. Bu program için *nfft* değerinin araştırma şartlarını değiştirmeyecek şekilde seçilerek tüm kirişlerin analizi incelenmiştir. Ayrıca her numune için zaman alandaki tüm titreşim cevapları ayrıntılı olarak incelenmiş ve söz

konusu numunenin *fft* dönüşümünün süreklilik arz ettiği frekans aralıkları uygun veriler olarak işlenmiştir. Zaman alanda her giriş için en az 4 adet titreşim testi uygulanmış ve her titreşim cevabı işlendiğinde frekans değerlerinin her ne kadar birbirine yakın olsa da aynı olmadığı görülmüştür. Bu durum, titreşim testi sırasında sürekli olarak aynı koşulların ve özenin sağlanamamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca numunelerin ölçülerinin küçükte olsa birbirinden farklılık göstermesi, titreşim cevaplarını etkileyen diğer bir durumdur.

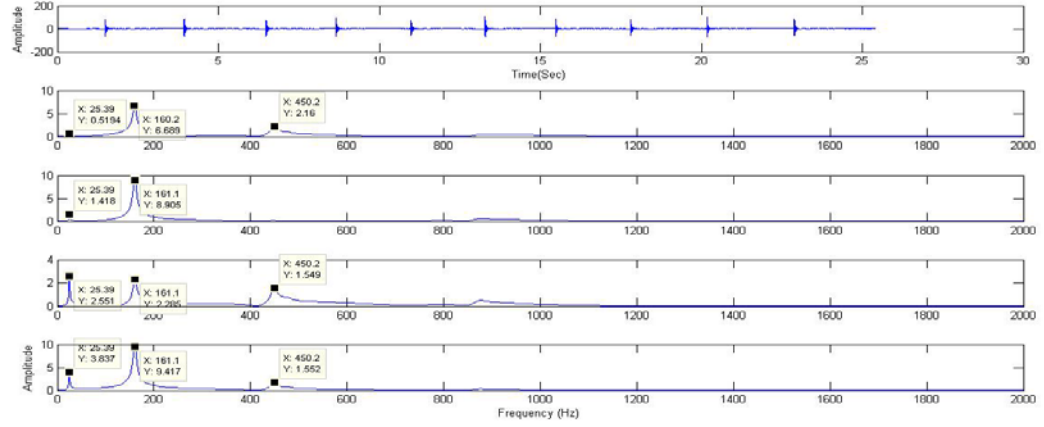
Nfft değerine uygun bir değer atanması ve zaman alandaki tüm titreşim analizleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. *Nfft* değerine uygun bir değer atanması kompozitler gibi doğal yaşlandırma koşullarına dayanıklı malzemelerin yaşlandırma altındaki etkisini araştırma bulgularının güvenilirliğini etkilemeyecek şekilde incelememizi sağlayacaktır. İnceleme sonucunda referans olarak alınan dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlerin ortalama frekansından aşırı derecede büyük frekans değerinde olanlar araştırmanın güvenliğini etkilememek için değerlendirme dışı bırakılmıştır. Yaşlandırma süresi sonunda dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit kirişler için değerlendirme dışı bırakılan numuneler her yaşlandırma dönemi için verilmiştir. Aşağıda bilgileri verilen numuneler;

- 3 ay suda yaşlandırılmış durum için 2.numune,
- 6 ay suda yaşlandırılmış durum için 1.numune,
- 6 ay toprakta yaşlandırılmış durum için 3.numune,
- 12 ay toprakta yaşlandırılmış durum için 4.numune,

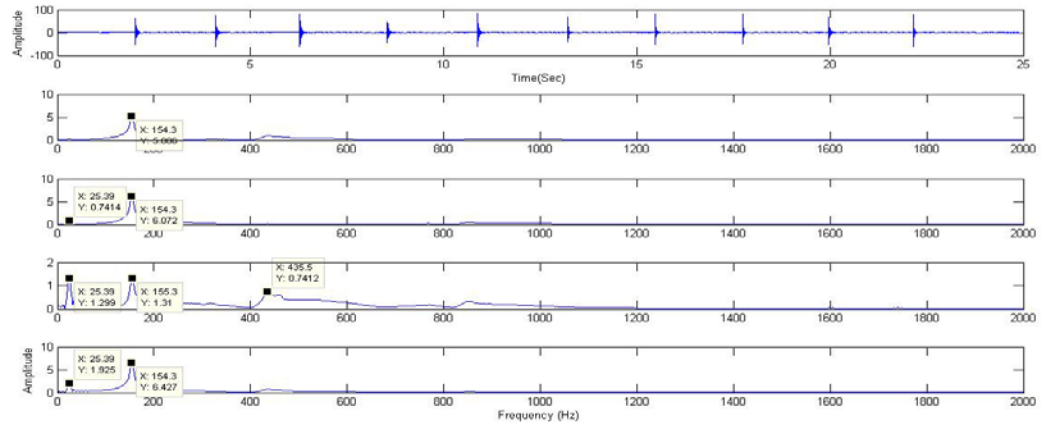
olmak üzere toplam 75 adet numune arasından 4 adet numune, değerlendirme dışı bırakılmıştır. Dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit kirişlerin bir yıllık doğal yaşlandırma koşulları altında dinamik özelliklerindeki değişim 71 numune üzerinden belirlenmiştir. Şekil 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7’de sırasıyla çekiç ile tahrik edilen 1., 2., 3., 4. ve 5. referans numunelerine ait dokunmuş aramid elyaf takviyeli referans kompozit kirişlerin Matlab titreşim çıktıları görülebilir. Bu şekiller incelendiğinde söz konusu kirişlerin çekiç ile tahrik edilmesi durumunda ancak ilk üç doğal frekansın belirlenebilmiştir. Daha önce ifade edildiği gibi kompozit malzemelerin sa-



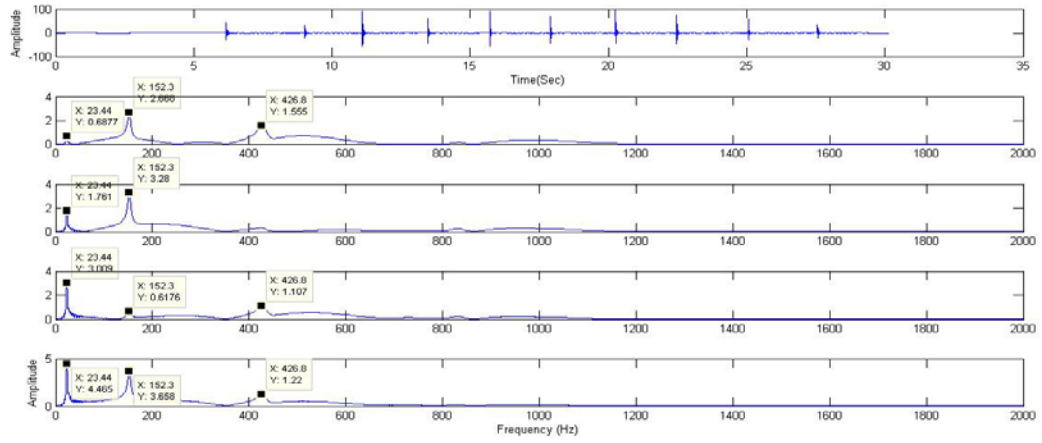
Şekil 4.3 Çekiç ile tahrik edilen 1 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı



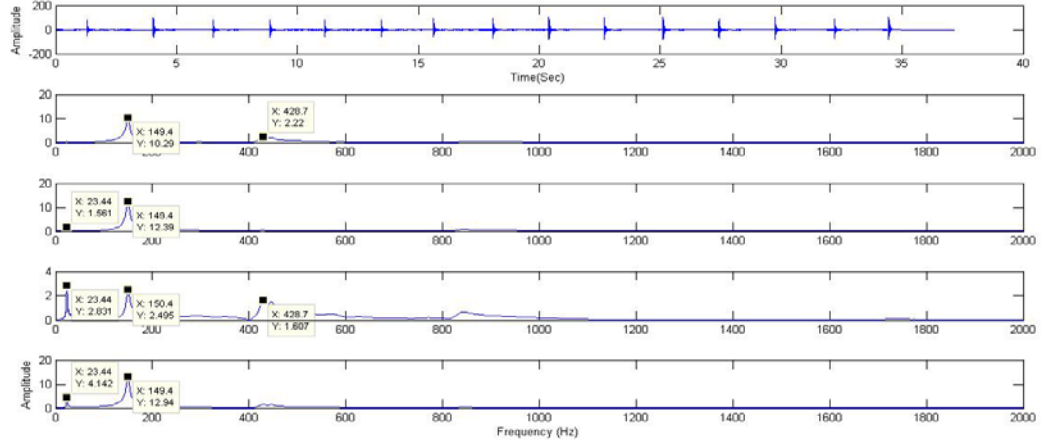
Şekil 4.4 Çekiç ile tahrik edilen 2 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı



Şekil 4.5 Çekiç ile tahrik edilen 3 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı



Şekil 4.6 Çekiç ile tahrik edilen 4 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı



Şekil 4.7 Çekiç ile tahrik edilen 5 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı

Çizelge 4.5 Çekiç ile tahrik edilen dokunmuş aramid elyaf takviyeli referans numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	23,44	152,3	426,8
	2.numune	25,39	154,3	435,5
	3.numune	25,39	160,2	450,2
	4.numune	24,41	156,3	439,5
	5.numune	23,44	149,4	428,7
	Ortalama	24,414	154,5	436,14

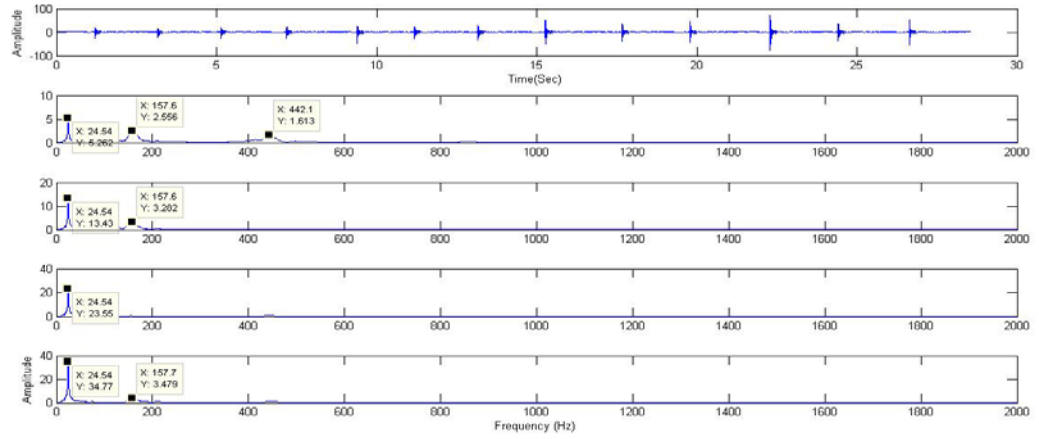
hip olduğu yüksek sönümlleme özelliği daha fazla frekansın uyarılmasını engellemiştir. Ayrıca çalışma koşullarında bir yapı için ilk frekans değerleri yüksek dereceli frekanslara nazaran daha çok önem arz etmektedir. Bu sebeple çevresel

faktörlerin, söz konusu kompozitlerin ilk üç doğal frekansı üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Daha fazla doğal frekans üzerine etkinin araştırılabilmesi için sarsıcı (shaker) ekipmanına ihtiyaç vardır. Şekil 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7’de görülen dokunmuş referans aramid elyaf takviyeli kompozit kirişlerin titreşim cevapları Çizelge 4.5’de verilmiştir. Çekiç ile tahrik edilen referans numunelerin ilk, ikinci ve üçüncü doğal frekansları sırasıyla 24.414, 154.5 ve 436.14 Hz olarak belirlenmiştir.

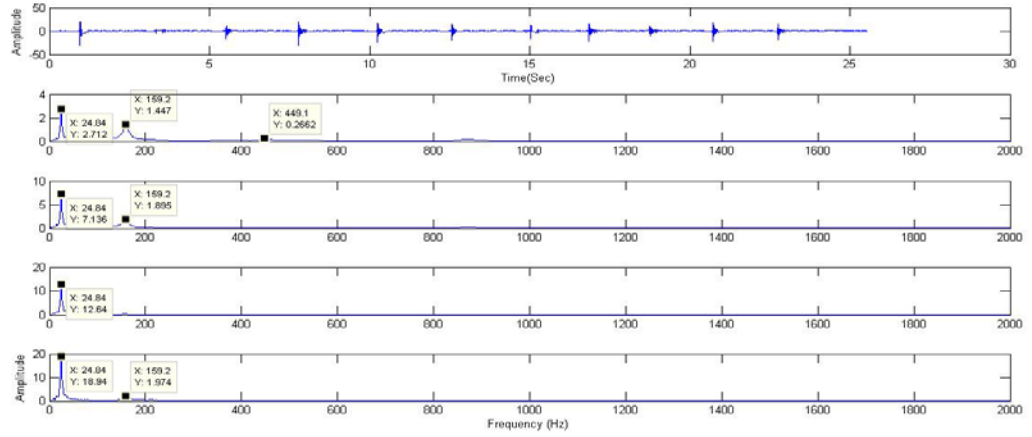
Çizelge 4.6 El ile tahrik edilen dokunmuş aramid elyaf takviyeli referans numunelerin frekans değerleri

Frekanslar (Hz)		1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	24,11	153,4	428,1
	2.numune	23,8	156,4	437,4
	3.numune	24,84	159,2	449,1
	4.numune	24,54	157,6	442,1
	5.numune	23,74	150,5	433,2
Ortalama		24,206	155,42	437,98
Çekiç ve el tahriki frekans sonuçları farkı (%)		0,85	0,60	0,42

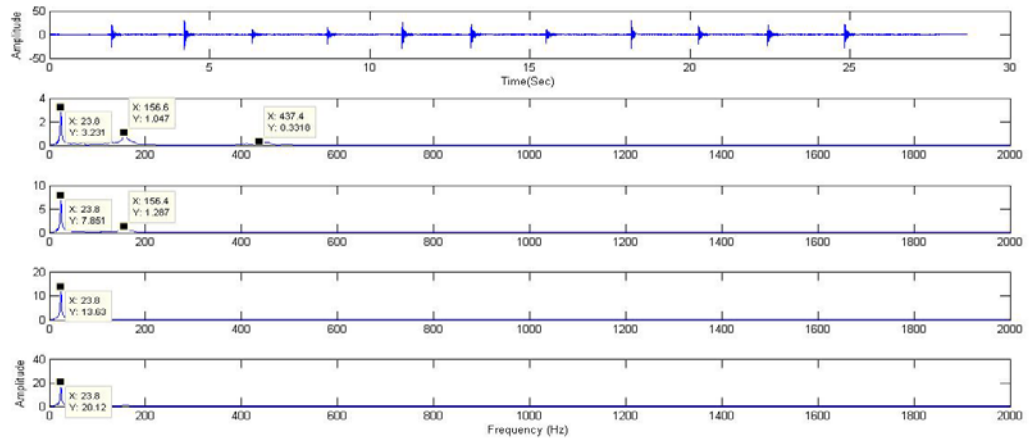
Bu çalışmada aynı numunelerin çekiç haricinde el ile tahrik yöntemi cevapları da incelenmiştir. Bu yöntemin seçilmesindeki sebep, çekiç ile tahrik edilen kompozit kirişlerin zaman alandaki pik davranışlarının net olarak belirlenmemesinden ötürüdür. Kirişlere ait sönüm oranlarının belirlenmesinde logaritmik azalış metodu kullanıldığı için piklerin elde edilmesi önem arz etmektedir. Bu amaçla, numunelerin piklerinin dolayısıyla sönüm oranlarının belirlenebilmesi için kompozit kirişlere ikinci bir uyarı yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem tüm kompozit kirişlerin önceden belirlenen referans konumdan 1 cm uzaklığa kadar el ile çekilip bırakılması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla el ile tahrik edilen 1., 2., 3., 4. ve 5. referans numunelerine ait dokunmuş aramid elyaf takviyeli referans kompozit kirişlerin Matlab titreşim çıktıları Şekil 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12’den görülebilir. Bu grafikler incelendiğinde aynı numunelerin çekiç ile tahrik edilen yöntemde olduğu gibi ancak ilk üç doğal frekansının belirlenebildiği görülmüştür. Bu durum, kompozit kirişlerin sönüm özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12’de el ile uyarılma sonucu titreşim cevabı elde edilen dokunmuş referans aramid elyaf takviyeli kompozit kirişlerin doğal frekansları Çizelge 4.6’da toplu olarak verilmiştir. Çizelge incelendiğinde el ile tahrik edilen referans numunelerin ilk, ikinci



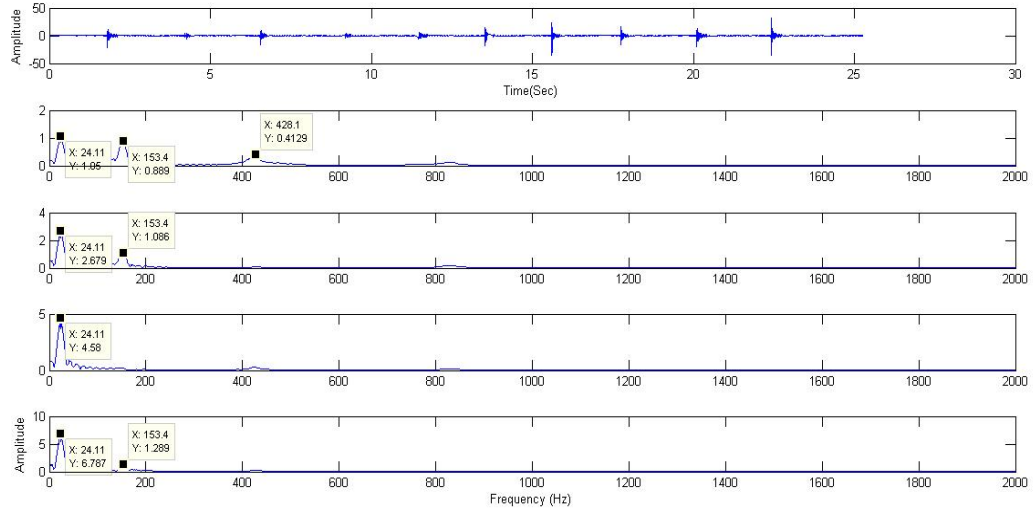
Şekil 4.8 El ile tahrik edilen 1 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı



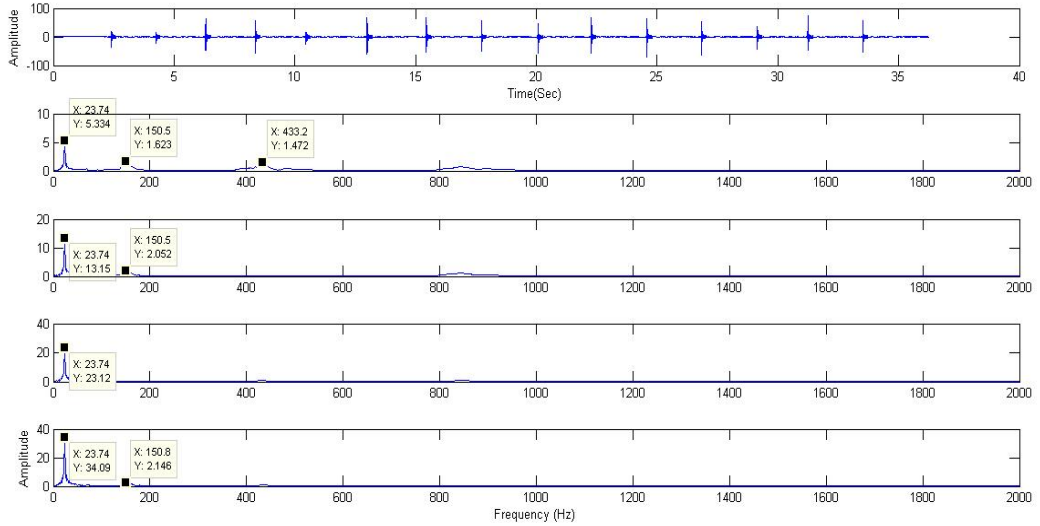
Şekil 4.9 El ile tahrik edilen 2 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı



Şekil 4.10 El ile tahrik edilen 3 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı



Şekil 4.11 El ile tahrik edilen 4 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı



Şekil 4.12 El ile tahrik edilen 5 numaralı referans dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı

ve üçüncü doğal frekansları sırasıyla 24.206, 155.42 ve 437.98 Hz olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.5 ve 4.6'daki değerler karşılaştırıldığında aynı numunelere ait farklı uyarma yöntemlerine dayanan ortalama titreşim sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülebilir. Çekiç ve el ile tahrik edilen aynı numunelerin ortalama doğal frekans değerlerinin birbirinden farkı, ilk üç doğal frekans için sırasıyla %0.85, %0.6 ve %0.42 olduğu Çizelge 4.6'dan görülebilir. Bu sonuçlar iki uyarı yönteminin de kompozit kirişlerin titreşim deneylerinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Çizelge 4.7, 4.8 ve 4.9, sırasıyla güneşte, suda ve toprakta 3 ay şartlandırılmış çekiç ile uyarılan dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerin ilk üç doğal frekans ortalamasını göstermektedir. Titreşim deneylerinin her aşamasında olduğu gibi yine beşer adet numune göz önüne alınmıştır. Bu çizelgelerdeki sonuçlar Çizelge 4.5 ile karşılaştırıldığında belirlenen çevresel yaşlandırma koşullarının ilk üç doğal frekans üzerinde ciddi bir etkisinden söz edilemez. Güneş altında 3 ay yaşlandırılmış numunelerin 2. ve 3. doğal frekanslarında belli bir düşüş vardır ancak 1.doğal frekans için bu durum geçerli değildir. 2.ve 3.doğal frekansta meydana gelen düşüşün yaşlanmaya bağlı olup olmadığı (deneysel hatalar veya homojen olmayan kompozit kırımlardan mı kaynaklandığı) 6, 9 ve 12 ay yaşlandırma süresi sonuçları ile karşılaştırılarak belirlenecektir.

Çizelge 4.7 Çekiç ile tahrik edilen 3 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	24,765	151,2	423,5
	2.numune	24,87	146,7	415,25
	3.numune	23,62	145,4	416,6
	4.numune	24,41	158,2	442,9
	5.numune	24,41	152,8	430,7
	Ortalama	24,415	150,86	425,79

Çizelge 4.8 Çekiç ile tahrik edilen 3 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	24,2	151,6	427,4
	2.numune	25,82	162,3	455,8
	3.numune	24,69	156,8	444,2
	4.numune	24,75	156,1	442,7
	5.numune	24,08	156,5	437,5
	Ortalama	24,43	155,25	437,95

Çizelge 4.9 Çekiç ile tahrik edilen 3 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	24,66	157,2	440,2
	2.numune	24,84	154,8	440,8
	3.numune	24,9	157,9	447,3
	4.numune	23,5	148,5	417,8
	5.numune	24,15	152,9	427,3
	Ortalama	24,41	154,26	434,68

Çizelge 4.10, 4.11 ve 4.12 sırasıyla güneşte, suda ve toprakta 3 ay şartlandırılmış el ile uyarılan dokunmuş aramid elyaf takviyeli her durum için 5 adet kompozit kirişlerin ilk üç doğal frekans ortalamasını göstermektedir. Bu veriler el ile uyarılan referans kompozit kirişlerin sonuçları ile yani Çizelge 4.6 ile karşılaştırıldığında güneşte yaşlandırılan numunelerin doğal frekanslarında az da olsa bir düşüş gözlenmektedir. Bu davranışın karakteristik olup olmadığı 6, 9 ve 12 ay süre ile yaşlandırma sonuçları ile karşılaştırılarak belirlenecektir.

Çizelge 4.10 El ile tahrik edilen 3 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	24,48	150,6	423,4
	2.numune	23,44	147,9	425,8
	3.numune	23,47	145,2	415,5
	4.numune	24,6	156	442,5
	5.numune	24,41	150,4	428,2
	Ortalama	24,08	150,02	427,08

Çizelge 4.11 El ile tahrik edilen 3 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	23,44	150,4	431,2
	2.numune	24,9	161,6	453,6
	3.numune	24,41	155,8	445,3
	4.numune	24,41	155,3	439,9
	5.numune	23,93	154,3	433,6
	Ortalama	24,218	155,48	440,72

Çizelge 4.12 El ile tahrik edilen 3 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	24,72	156,9	442,4
	2.numune	24,99	152,8	438,5
	3.numune	24,48	158,4	447,4
	4.numune	23,16	152,2	428,3
	5.numune	23,62	151,3	429,7
	Ortalama	24,194	154,32	437,26

Çizelge 4.13, 4.14 ve 4.15 sırasıyla güneşte, suda ve toprakta 6 ay şartlandırılmış çekiç ile uyarılan dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerin ilk üç doğal gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlar çekiç ile uyarılan dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit kirişlerin referans ve 3 ay yaşlandırılmış sonuçları ile

karşılaştırıldığında 1.doğal frekans ortalamasında sadece güneşte yaşlandırma için bir azalma söz konusu iken 2.ve 3.doğal frekans ortalamalarında her üç çevresel şartlandırma için belli bir azalma olduğu gözlenmektedir.

Çizelge 4.13 Çekiç ile tahrik edilen 6 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	21,955	142,4	395,8
	2.numune	24,93	159	447,1
	3.numune	24,63	155,6	435,6
	4.numune	23,86	143,2	417,5
	5.numune	24,72	152	431
	Ortalama	24,019	150,44	425,4

Çizelge 4.14 Çekiç ile tahrik edilen 6 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	26,03	155,2	439,7
	2.numune	24,69	153,1	421,6
	3.numune	25,02	157,1	440,1
	4.numune	24,54	154,2	430,5
	5.numune	23,395	147,9	414,2
	Ortalama	24,4113	153,075	426,6

Çizelge 4.15 Çekiç ile tahrik edilen 6 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	24,69	157,7	449,7
	2.numune	23,62	147,2	414,2
	3.numune	26,34	159,3	444,9
	4.numune	24,05	150,9	419,2
	5.numune	25,39	158,4	441,8
	Ortalama	24,4375	153,55	431,225

Çizelge 4.16, 4.17 ve 4.18 sırasıyla güneşte, suda ve toprakta 6 ay şartlandırılmış el ile uyarılan dokunmuş aramid elyaf takviyeli her şartlandırma durumu için 5 adet kompozit kirişlerin ilk üç doğal frekans ortalaması görülebilir. Bu çizelgelerdeki veriler referans ve 3 ay şartlandırılmış numunelerin sonuçları ile karşılaştırıldığında, çekiç ile uyarılan kompozit kirişlerin sonuçlarında olduğu gibi 1.doğal frekans için sadece güneşte yaşlandırma durumunda bir azalma görülürken 2.ve 3.doğal frekans için ise her üç çevresel yaşlandırma faktörü için bir azalma söz konusu değildir.

Çizelge 4.16 El ile tahrik edilen 6 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	22,06	141	419,3
	2.numune	24,63	157,7	445,1
	3.numune	24,26	154,1	431,7
	4.numune	23,65	147,9	413,5
	5.numune	24,41	150,4	430,2
	Ortalama	23,802	150,22	427,96

Çizelge 4.17 El ile tahrik edilen 6 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	24,44	155,5	440,9
	2.numune	24,32	151,6	426,6
	3.numune	24,9	157,7	439,5
	4.numune	24,41	154,8	431,6
	5.numune	22,95	147,5	408,2
	Ortalama	24,204	153,42	429,36

Çizelge 4.18 El ile tahrik edilen 6 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	24,35	156,65	438,5
	2.numune	22,95	147,3	415,6
	3.numune	25,51	158	444,4
	4.numune	23,25	151,6	421,8
	5.numune	24,81	156,8	442,4
	Ortalama	24,174	154,07	432,54

Çizelge 4.19, 4.20 ve 4.21 sırasıyla güneşte, suda ve toprakta 9 ay şartlandırılmış çekiç ile uyarılan dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerin ilk üç doğal frekans ortalamasını göstermektedir. Numune sayısı daha önceki durumlarda olduğu gibi 5 adettir. Bu çizelgelerdeki veriler aynı kompozit giriş guru-

Çizelge 4.19 Çekiç ile tahrik edilen 9 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	24,41	156,3	435,2
	2.numune	24,17	156,8	435,8
	3.numune	23,265	151,3	427,7
	4.numune	24,69	151,9	429,1
	5.numune	23,8	150,4	414,4
	Ortalama	24,067	153,34	428,44

Çizelge 4.20 Çekiç ile tahrik edilen 9 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	23,785	149,5	420,3
	2.numune	24,2	154,5	433,5
	3.numune	22,71	146,5	411,7
	4.numune	24,02	154,4	433,3
	5.numune	23,01	145,9	413,2
	Ortalama	23,545	150,16	422,4

Çizelge 4.21 Çekiç ile tahrik edilen 9 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	24,54	153,5	429,3
	2.numune	24,51	155,2	438
	3.numune	22,8	140,4	399,2
	4.numune	23,665	144,3	420,9
	5.numune	23,07	146,4	413
	Ortalama	23,717	147,96	420,08

bunun referans, 3 ve 6 ay yaşlandırılmış ortalama frekans değerleri ile karşılaştırıldığında her üç frekans için bir azalma söz konusu iken en büyük azalma nemli ortamlardaki şartlandırmalarda gerçekleşmiştir. Suda ve toprak altında yaşlandırma faktörleri, 9 ay sonra doğal frekanslar üzerinde belirgin bir azalmaya sebep olmuştur. Bu periyot, yaşlandırma koşullarına bırakılan numuneler için ilkbahar yağışlarının sonuna denk gelmektedir.

Çizelge 4.22, 4.23 ve 4.24 sırasıyla güneşte, suda ve toprakta 9 ay şartlandırılmış el ile uyarılan dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit kırımların ilk üç doğal frekans ortalaması görülebilir. Her şartlandırma durumu için 5 adet numune ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu değerler, el ile uyarılan referans, 3 ve 6 ay şartlandırma verileri ile karşılaştırıldığında her üç doğal frekans değişiminde belirgin

Çizelge 4.22 El ile tahrik edilen 9 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	23,9	155	436,6
	2.numune	23,93	154,3	436,5
	3.numune	24,72	153,3	432,6
	4.numune	24,57	152,7	430,7
	5.numune	21,76	144,1	410,2
	Ortalama	23,776	151,88	429,32

Çizelge 4.23 El ile tahrik edilen 9 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	23,25	147,5	415,7
	2.numune	23,96	153,1	433,2
	3.numune	22,71	145,6	410,1
	4.numune	24,11	152,8	436,9
	5.numune	24,17	152,6	427
	Ortalama	23,64	150,32	424,58

Çizelge 4.24 El ile tahrik edilen 9 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	24,05	151,4	430,6
	2.numune	24,69	156,6	440,7
	3.numune	22,46	138,7	393,6
	4.numune	23,25	146,2	422,3
	5.numune	22,77	147,8	424,3
	Ortalama	23,444	148,14	422,3

bir azalma eğilimi söz konusudur ve en büyük azalmalar nemli ortam şartlandırmalarında gerçekleşmiştir. Bu açıdan çekiç ile uyarılan aynı kompozit kırımların sonuçları ile paralellik göstermektedir.

Çizelge 4.25, 4.26 ve 4.27 sırasıyla güneşte, suda ve toprakta 12 ay şartlandırılmış çekiç ile uyarılan dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerin ilk üç doğal frekans ortalamasını göstermektedir. Bu çizelgelerde görüldüğü gibi deney numune sayısı beş adettir. Bu veriler, referans, 3, 6 ve 9 ay şartlandırılmış kompozit kırımların ortalama doğal frekansı ile karşılaştırıldığında, bozunmanın (degradation) devam ettiği görülebilir. Yine en etkili çevresel faktörlerin nemli ortamlar olduğu ifade edilebilir. 9 ay şartlandırılma sonunda bozunması belirgin olarak görülen do-

Çizelge 4.25 Çekiç ile tahrik edilen 12 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	24,48	153	428,4
	2.numune	24,29	155,7	433
	3.numune	23,28	151,3	427,6
	4.numune	23,8	154,2	432,3
	5.numune	23,9	150,7	421,4
	Ortalama	23,95	152,98	428,54

Çizelge 4.26 Çekiç ile tahrik edilen 12 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	24,08	149,2	418,5
	2.numune	24,41	148,7	412,4
	3.numune	23,41	153,6	429,8
	4.numune	22,31	139,2	400,2
	5.numune	22,95	146	413,6
	Ortalama	23,432	147,34	414,9

Çizelge 4.27 Çekiç ile tahrik edilen 12 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	23,9	150,8	428,6
	2.numune	23,5	144,1	410,2
	3.numune	22,43	140,1	402
	4.numune	21,12	135,7	387,6
	5.numune	25,05	159	441,6
	Ortalama	23,72	148,5	420,6

kunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit kirişlerin 12 ay yaşlandırma ile bu eğilimin artarak sürdüğü belirtilebilir.

Çizelge 4.28, 4.29 ve 4.30 sırasıyla güneşte, suda ve toprakta 12 ay şartlandırılmış el ile uyarılma sonucu titreşim testine tabi tutulmuş dokunmuş aramid

Çizelge 4.28 El ile tahrik edilen 12 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	24,44	152,3	426,2
	2.numune	24,51	153,5	430,2
	3.numune	23,35	149	423,3
	4.numune	23,77	152,4	428,4
	5.numune	23,56	149,1	421,6
	Ortalama	23,926	151,26	425,94

Çizelge 4.29 El ile tahrik edilen 12 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	23,53	145,7	414,3
	2.numune	23,68	142,7	411,3
	3.numune	23,44	148,3	419,3
	4.numune	21,82	139	403,5
	5.numune	22,4	144,3	411,8
	Ortalama	22,974	144	412,04

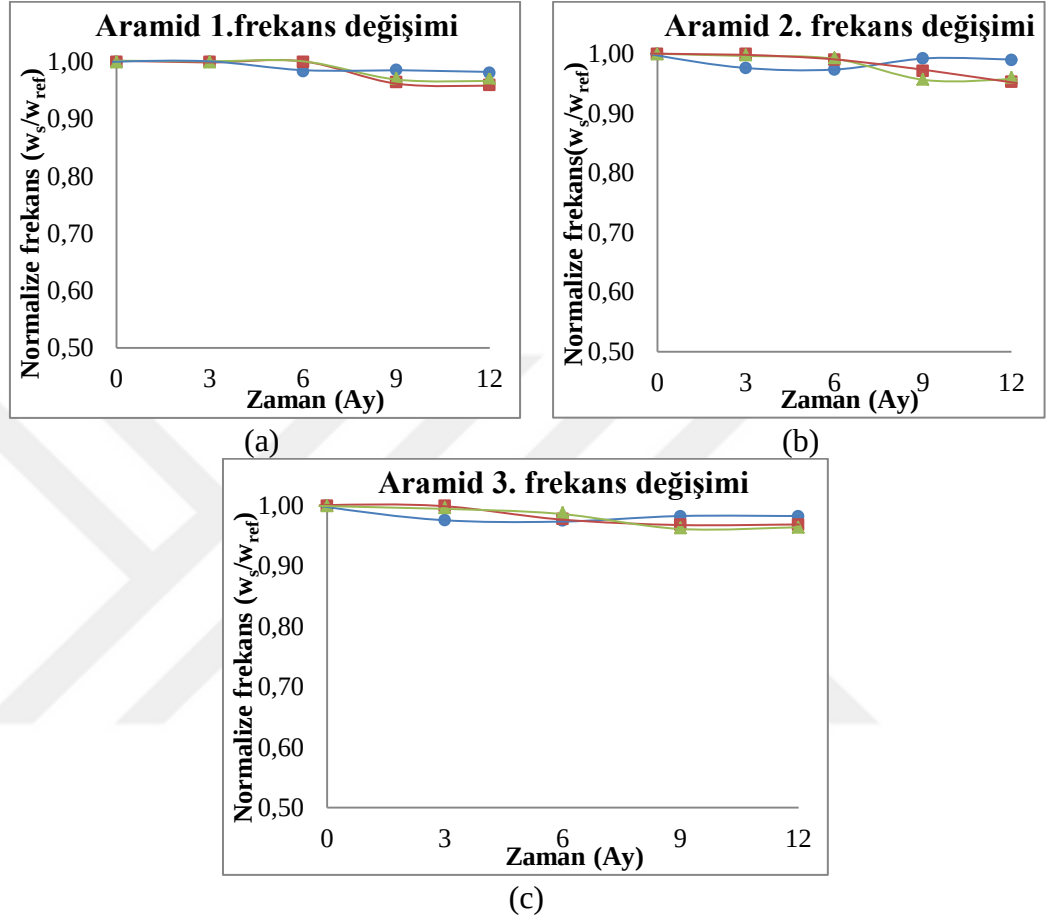
Çizelge 4.30 El ile tahrik edilen 12 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş aramid elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	23,41	145,5	422,8
	2.numune	23,09	145,3	415,4
	3.numune	22,31	141	402,7
	4.numune	20,87	136,1	390,6
	5.numune	24,87	155,2	440,5
	Ortalama	23,42	146,75	420,35

elyaf takviyeli kompozit kirişlerin ilk üç doğal frekans ortalaması görülebilir. Teste tabi tutulan kiriş sayısı her yaşlandırma koşulu için beş adettir. Bu veriler, el ile uyarılan dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit kirişlerin referans, 3, 6 ve 9 aylık yaşlandırma sonuçları ile karşılaştırıldığında bozunmanın şiddetinin arttığı görülür. Yaşlanma eğilimi çekiç ile uyarılan test sonuçları ile aynı olmasına rağmen bozunmanın derecesi daha yüksek çıkmıştır. Yani el ile uyarılan test sonuçlarında bozunma oranı daha fazla elde edilmiştir. Yine şiddetli çevresel faktörler nemli ortamlar olduğu görülmüş ve suda yaşlandırma söz konusu kompozitlerin doğal frekansları üzerinde en çok bozunmaya sebep olmuştur.

Yaşlandırma etkisinin dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit kirişlerin doğal frekansı üzerinde olan etkileri ilk üç frekans için Şekil 4.13’de toplu olarak gösterilmiştir. Şekil 4.13a incelediğinde; 1.doğal frekans değişiminin en çok sudaki (güneş altında ile beraber) yaşlandırmadan etkilendiği, bu durumu ise sırasıyla toprak altında yaşlandırma ve güneşte yaşlandırmanın izlediği görülmüştür. Suda şartlandırmanın dokunmuş elyaf takviyeli aramid kompozitlerin doğal frekansına en çok etki eden çevre koşulu olmasının sebebi (Güneydoğu Anadolu Bölgesindeki ortalama sıcaklıklar ile beraber düşünüldüğünde), hem polimerik matrislerin hem de aramid elyafın suya karşı olan hassasiyetinden ileri gelmektedir. Toprak altındaki yaşlandırmanın doğal frekanslar üzerindeki etkisinin güneşte yaşlandırmadan daha fazla olmasının sebebi yağmurlara bağlı olarak numunelerin toprak altında uzun süre nemli ortama maruz kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca sıcaklık değişiminin, reçine malzemesinin mekanik özelliklerini bozduğu ve yaşlandırdığı bilinmektedir. Ancak kürlenmiş kompozitler ile kürlenmemiş kompozitlerin sıcaklık altındaki davranışlarının farklılık gösterdiği literatürde bildirilmiştir (Xiao ve Shanahan 1997; Xiao ve ark., 1997). Bu çalışmadaki tüm kompozit plakalara üretim

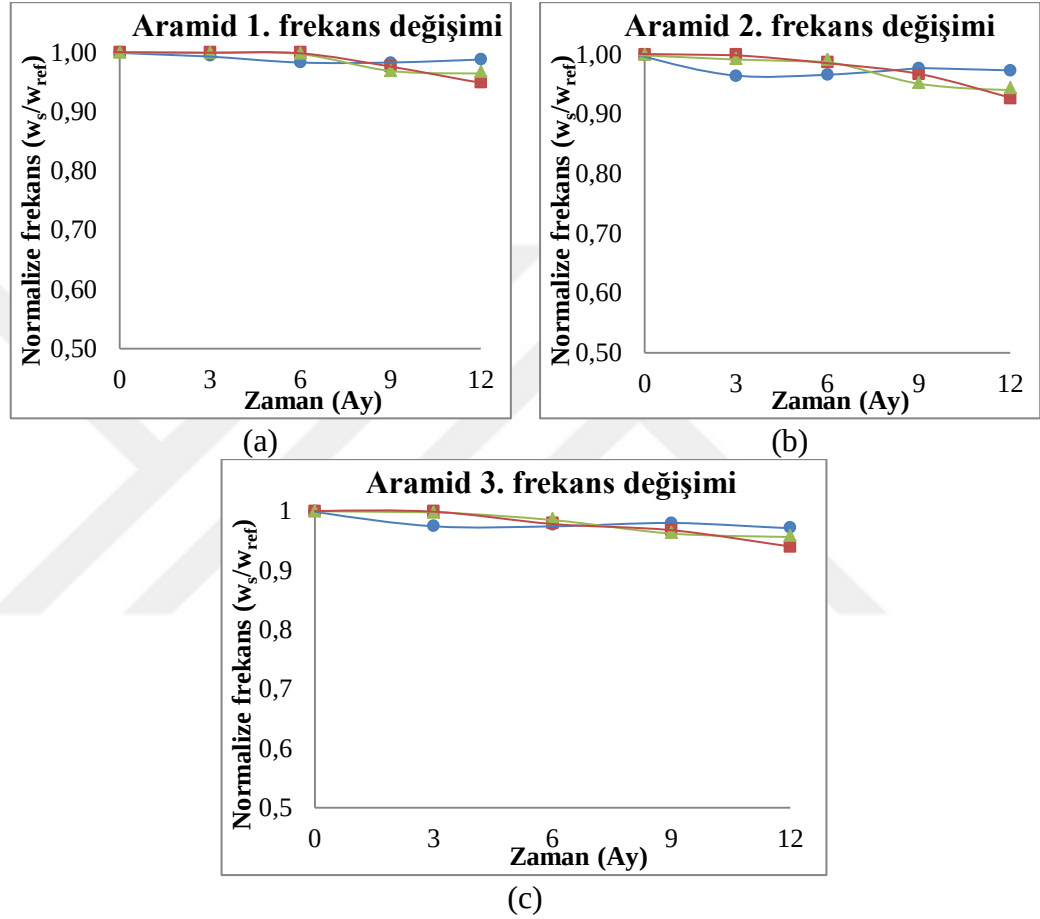
sırasındaki normal kürleme dışında herhangi bir kürleme işlemi uygulanmamıştır. Bu çalışmada güneşte şartlandırmaya maruz bırakılan kompozitlerin doğal frekans değişimlerine etkisi diğer çevresel koşullara göre daha az olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.13 Çekiç ile tahrik edilen dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerin yaşlandırma koşullarına göre (a) 1. frekans, (b) 2. frekans ve (c) 3. frekans değişimi (Seriler: Daire; Güneş, Kare; Su ve Üçgen; Toprak)

Suda 1 yıl süre ile yaşlandırmanın 1. doğal frekans üzerine yaklaşık olarak %4 civarı etkisi varken, Toprakta yaşlandırmanın %3 ve Güneşte yaşlandırmanın ise %2 civarında bir etkisi olduğu görülmüştür (Şekil 4.13a). Şartlandırma koşullarına bağlı olarak 2. doğal frekans bozunma eğilimi 1. doğal frekans sonuçları ile paralellik göstermektedir. Araştırılan yaşlandırma koşullarından en yıkıcı durum olarak suda yaşlandırmanın olduğu görülmektedir. Suda 1 yıl süre ile yaşlandırmanın 2. doğal frekans üzerine yaklaşık olarak %4,5 civarı etkisi varken, toprak altında yaşlandırmanın %4 ve güneşte yaşlandırmanın ise %2,5 civarında bir etkisi olduğu görülmüştür (Şekil 4.13b). 3. doğal frekans sonuçları 1. ve 2. doğal frekans

sonuçlarından biraz farklılık göstermektedir. Doğal yaşlandırma koşulları arasından toprak altında yaşlandırmanın en etkili şartlandırma koşulu olduğu görülmektedir. Toprakta 1 yıl süre ile yaşlandırmanın 3. doğal frekans üzerine yaklaşık olarak %3,7 civarı etkisi varken, Suda yaşlandırmanın %3,2 ve Güneşte yaşlandırmanın ise %1,8 civarında bir etkisi olduğu görülmüştür (Şekil 4.13c).



Şekil 4.14 El ile tahrik edilen dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerin yaşlandırma koşullarına göre (a) 1.frekans, (b) 2.frekans ve (c) 3.frekans değişimi (Seriler: Daire; Güneş, Kare; Su ve Üçgen; Toprak)

Aynı dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit kirişlerin el ile uyarılma sonucu doğal yaşlandırma koşullarına göre elde edilen ilk üç doğal frekans değişimi Şekil 4.14'te verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde; aynı numunelerin el ile uyarılan ortalama frekans değişim sonuçları, çekiç ile uyarılan numunelerin ortalama değişimleri ile benzerlik göstermektedir. Ayrıca çevresel yaşlandırma koşulları arasında doğal frekans değişimine sebep olan en şiddetli şartlandırmanın, suda yaşlandırma olduğu görülmüştür. Suda yaşlandırma (güneş sıcaklıkları ile beraber)

faktörünü, sırasıyla toprak altında ve güneş altında yaşlandırma izlemektedir. Şekil 4.14a incelendiğinde; suda, toprak altındave güneşte yaşlandırmanın 1. doğal frekans değişimine etkisi sırasıyla %5, % 3,3 ve % 1,8 olduğu görülmüştür. Şekil 4.13 ile Şekil 4.14 karşılaştırıldığında, yaşlandırma eğilimlerinin örtüştüğü ancak sonuçların çok küçükte olsa değişiklik gösterdiği ifade edilebilir. Şekil 4.14b'den görüleceği üzere suda, toprak altında ve güneşte yaşlandırmanın 2. doğal frekans değişimine etkisi sırasıyla %7,5, % 5,5 ve % 2,8 olmuştur. Şekil 4.14b'deki 2. doğal frekans değişim sonuçları ile Şekil 4.13b karşılaştırıldığında, yaşlandırma eğilimleri örtüşmesine rağmen sonuçlar farklılık göstermektedir. Yaşlandırmaya bağlı frekans değişimlerinin el ile uyarılan deney sonuçlarda daha yüksek olarak elde edilmiştir. Şekil 4.14c incelendiğinde ise suda, toprak altında ve güneşte yaşlandırmanın 3. doğal frekans değişimine etkisi sırasıyla %6, %4 ve %2,8 olmuştur. Şekil 4.14c ile Şekil 4.13c karşılaştırıldığında, yaşlandırma eğilimlerinin örtüşmediği, ayrıca frekans değişim sonuçlarının da farklılık gösterdiği görülmüştür.

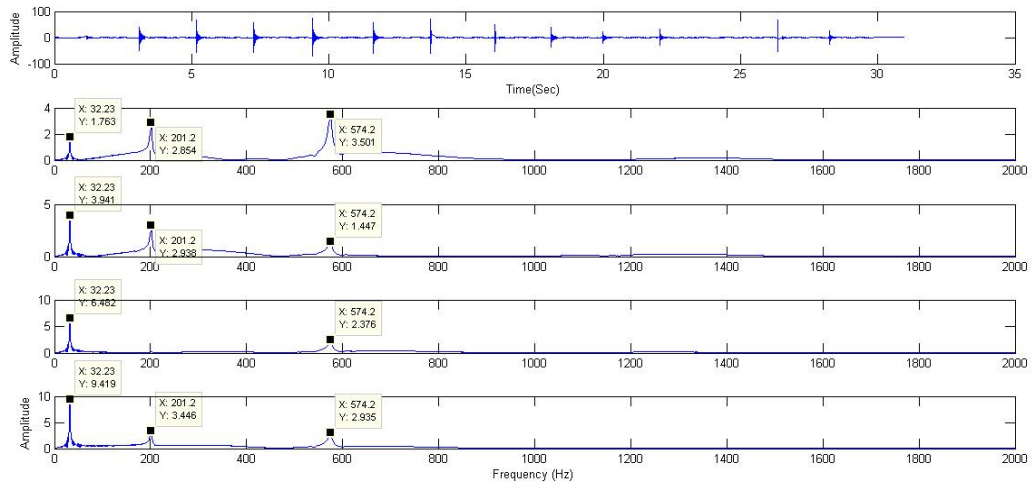
4.3 Yaşlandırılmış Dokunmuş Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Doğal Frekans Değişimi

Titreşim deneylerinden elde edilen verilerin işlenmesi Bölüm 4.2'de detaylı olarak ifade edilmişti. Aynı prosedür kullanılarak dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlerin çevresel faktörlere bağlı olarak ilk üç doğal frekans değişimi incelenmiştir. Titreşim testleri sonucunda referans numunelerinin ortalama doğal frekans değerinden aşırı sapma gösteren numuneler, araştırma bulgularının güvenilirliğini etkilememek için değerlendirme dışı bırakılmıştır. Yaşlandırma koşullarının dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin ilk üç doğal frekans değişimine etkisi incelenirken değerlendirme dışı bırakılan numuneler,

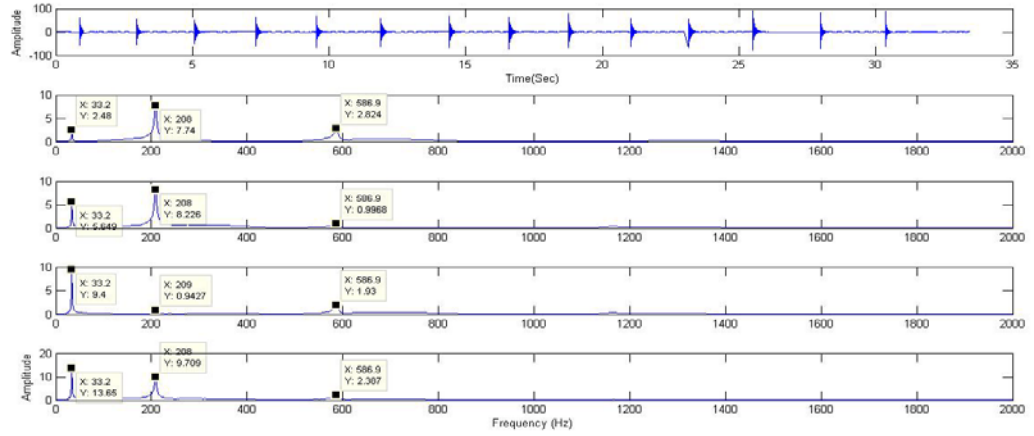
- 3 ay güneşte yaşlandırılmış 3.numune,
- 6 ay güneşte yaşlandırılmış 4.numune,
- 9 ay güneşte yaşlandırılmış 3.numune,
- 12 ay güneşte yaşlandırılmış 2.numune,
- 6 ay suda yaşlandırılmış 1.numune,

- 12 ay suda yaşlandırılmış 4.numune
- 3 ay toprakta yaşlandırılmış 4.numune,
- 9 ay toprakta yaşlandırılmış 5.numune,
- 12 ay toprakta yaşlandırılmış 4.numune,

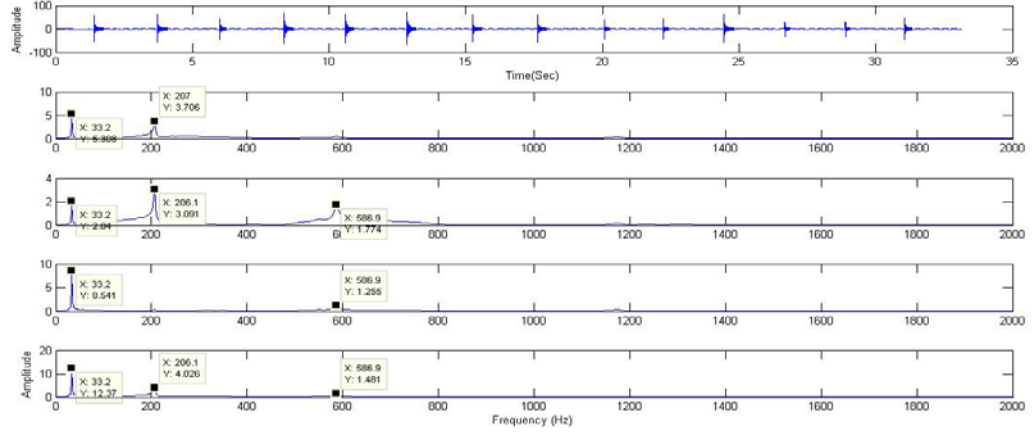
olmak üzere toplam 75 adet numune arasından 9 adet numunedir. Dolayısıyla bir yıllık doğal yaşlandırma koşullarının dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlerin dinamik özelliklerindeki değişim 71 numune üzerinden belirlenmiştir. Şekil 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 ve 4.19’de sırasıyla çekiç ile tahrik edilen 1., 2., 3., 4. ve 5. referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli referans kompozit kiriş numunelerine ait Matlab titreşim çıktıları görülebilir. Bu şekiller incelendiğinde dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit kirişlerin titreşim sonuçlarında olduğu gibi, dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çekiç ile uyarılması durumunda ancak ilk üç doğal frekans belirlenebilmiştir. Daha fazla doğal frekansın belirlenebilmesi için deneysel ekipmanlar uygun olmadığından çevresel faktörlerin söz konusu kompozitlerin ilk üç doğal frekansı üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Şekil 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 ve 4.19’da dokunmuş referans karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlerin titreşim cevapları Çizelge 4.31’de verilmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere çekiç ile uyarılan referans numunelerin ilk, ikinci ve üçüncü doğal frekansları sırasıyla 32.288, 202.26 ve 576.4 Hz olarak belirlenmiştir.



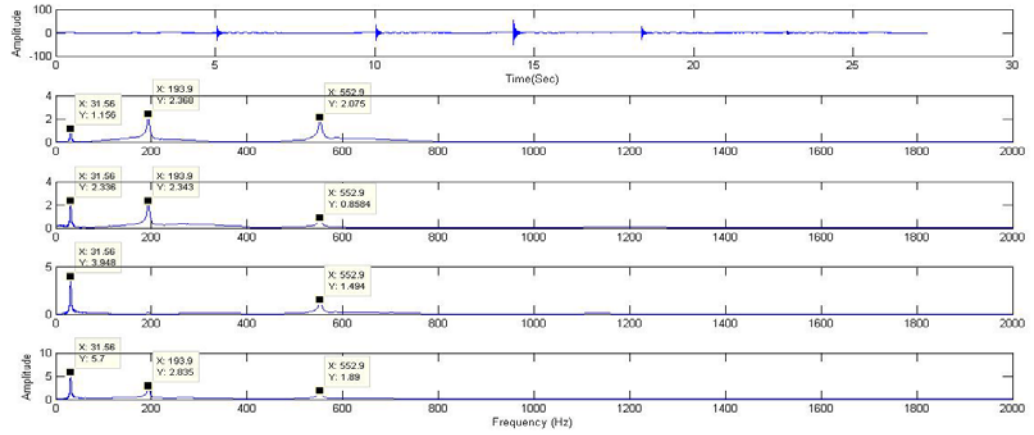
Şekil 4.15 Çekiç ile tahrik edilen 1 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı



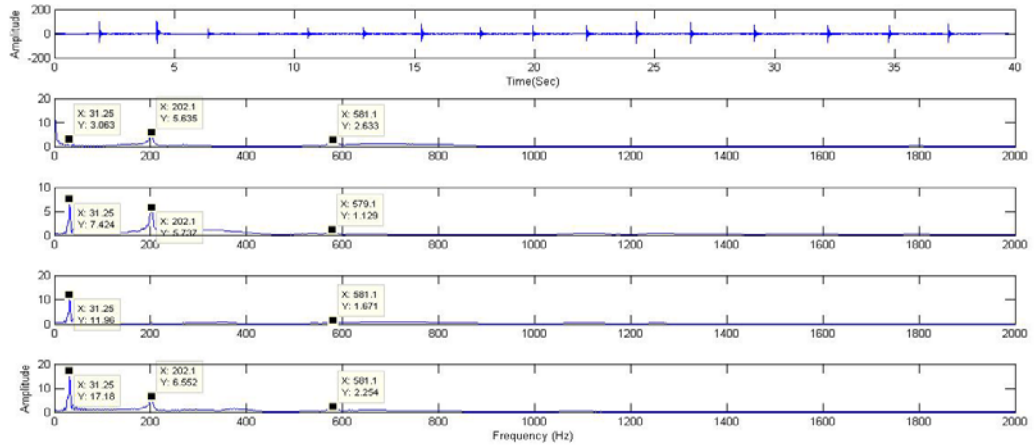
Şekil 4.16 Çekiç ile tahrik edilen 2 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kırıışın Matlab programı titreşim cevabı



Şekil 4.17 Çekiç ile tahrik edilen 3 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kırıışın Matlab programı titreşim cevabı



Şekil 4.18 Çekiç ile tahrik edilen 4 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kırıışın Matlab programı titreşim cevabı

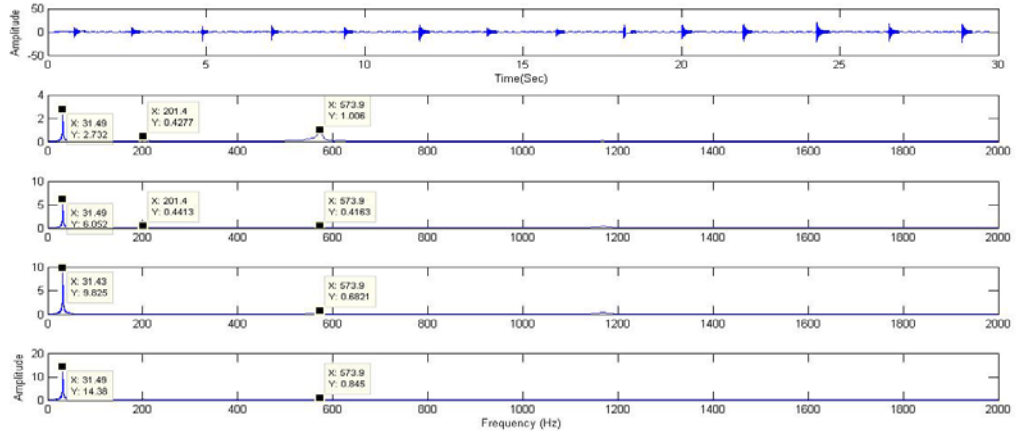


Şekil 4.19 Çekiç ile tahrik edilen 5 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı

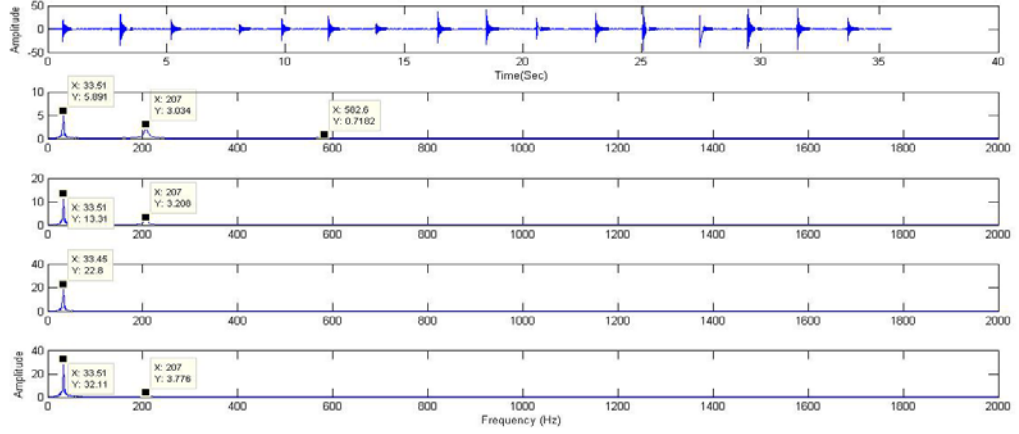
Çizelge 4.31 Çekiç ile tahrik edilen dokunmuş karbon elyaf takviyeli referans kompozit kirişlerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	31,56	193,9	552,9
	2.numune	33,2	206,1	586,9
	3.numune	33,2	208	586,9
	4.numune	32,23	201,2	574,2
	5.numune	31,25	202,1	581,1
	Ortalama	32,288	202,26	576,4

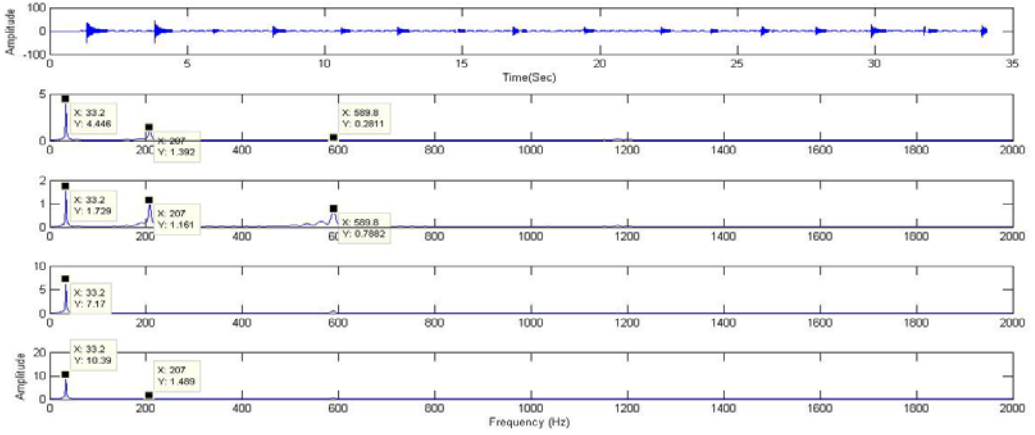
Aynı numunelerin el ile tahrik yöntemi cevapları da incelenmiştir. Bu yöntem tüm kompozit kirişlerin önceden belirlenen 1 cm uzaklığa kadar el ile çekilip bırakılması şeklinde gerçekleştirilmiştir. El ile uyarılan dokunmuş karbon elyaf takviyeli 1., 2., 3., 4. ve 5. referans kompozit kirişlerine ait referans kompozit kirişlerin Matlab titreşim çıktıları Şekil 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24'ten görülebilir. Bu grafikler incelendiğinde aynı numunelerin çekiç ile tahrik edilen yöntemde olduğu gibi kompozit kirişlerin sönüm özelliklerinden dolayı ancak ilk üç doğal frekansın belirlenebilmiştir. Şekil 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24'te el ile uyarılan titreşim cevabı elde edilen dokunmuş referans karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlerin doğal frekansları Çizelge 4.32'de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde el ile tahrik edilen referans numunelerin ilk, ikinci ve üçüncü doğal frekansları sırasıyla 32.176, 201.88 ve 580.98 Hz olarak elde edildiği görülebilir. Çizelge 31 ve 32'deki değerler karşılaştırıldığında farklı uyarma yöntemlerine rağmen aynı numunelerin ortalama doğal frekans sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülebilir. Yine do-



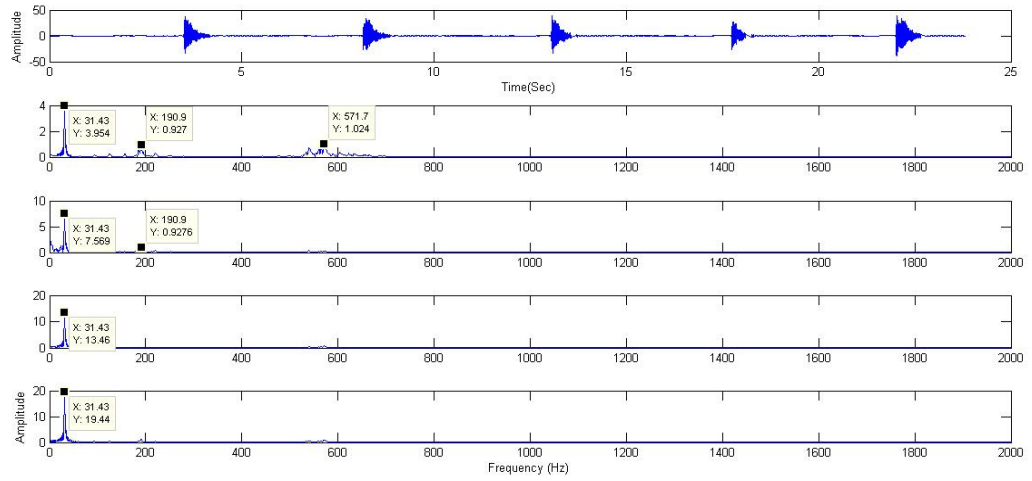
Şekil 4.20 El ile tahrik edilen 1 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı



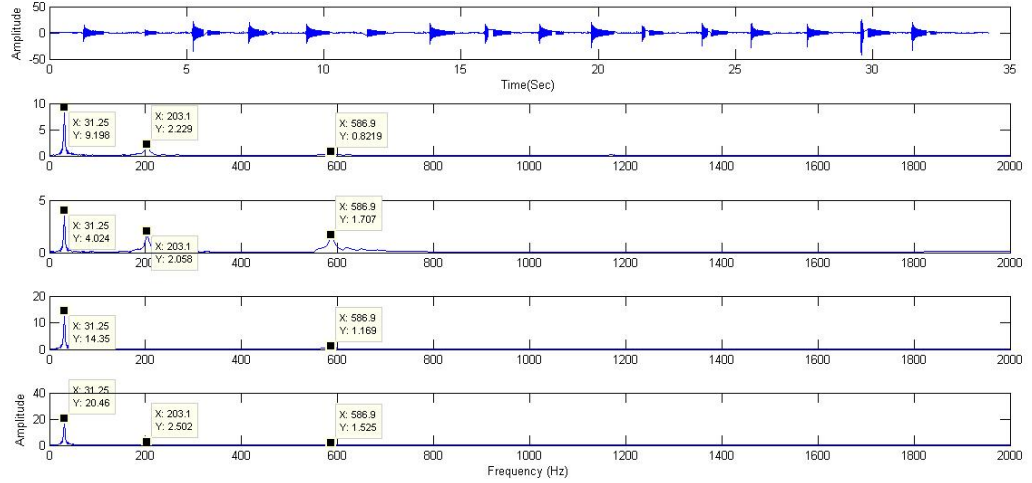
Şekil 4.21 El ile tahrik edilen 2 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı



Şekil 4.22 El ile tahrik edilen 3 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı



Şekil 4.23 El ile tahrik edilen 4 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı



Şekil 4.24 El ile tahrik edilen 5 numaralı referans dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişin Matlab programı titreşim cevabı

Çizelge 4.32 El ile tahrik edilen dokunmuş karbon elyaf takviyeli referans numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	31,43	190,9	571,7
	2.numune	33,2	207	589,8
	3.numune	33,51	207	582,6
	4.numune	31,49	201,4	573,9
	5.numune	31,25	203,1	586,9
	Ortalama	32,176	201,88	580,98
Çekiç ve el tahrirki frekans sonuçları farkı (%)				
		0,35	0,19	0,79

kunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit kirişlerin titreşim sonuçlarında ifade edildiği gibi bu sonuçların birbirine yakınlığı iki uyarı yönteminin de kompozit kirişlerin titreşim deneylerinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Çizelge 4.33 Çekiç ile tahrik edilen 3 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	31,74	198,2	560,7
	2.numune	32,23	198,9	559,3
	3.numune	39,55	241,7	661,6
	4.numune	32,38	206,4	581,7
	5.numune	32,87	204,4	579,9
	Ortalama	32,305	201,975	570,4

Çizelge 4.34 Çekiç ile tahrik edilen 3 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	31,37	188,8	543,5
	2.numune	34,12	207,9	588,4
	3.numune	30,33	187,1	529,1
	4.numune	30,27	189	543,5
	5.numune	32,71	198,2	563,5
	Ortalama	31,76	194,2	553,6

Çizelge 4.35 Çekiç ile tahrik edilen 3 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	35,22	219,2	620,8
	2.numune	32,71	205,1	585,35
	3.numune	30,4	191,1	542
	4.numune	36,22	228,4	646,5
	5.numune	30,76	197,5	564,9
	Ortalama	32,2725	203,225	578,263

Güneşte, suda ve toprak altında 3 ay şartlandırılmış çekiç ile tahrik edilen dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin ilk üç doğal frekans ortalaması sırasıyla Çizelge 4.33, 4.34 ve 4.35’den görülebilir. Çizelgelerde görüleceği üzere titreşim deneylerinde beşer adet numune göz önüne alınmıştır. Söz konusu çizelgelerdeki sonuçlar ile referans numunelerinin değerlerini içeren Çizelge 31 karşılaştırıldığında belirlenen çevresel yaşlandırma faktörlerinin 3 aylık yaşlandırma periyodunda doğal frekans üzerinde ciddi bir etkisinden söz edilemez. Güneşte ve toprak altında 3 ay yaşlandırılmış numunelerin doğal frekanslarında çok az bir düşüş

vardır. Ancak suda yaşlandırma için aynı durum söz konusu değildir. Dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin 3 aylık suda yaşlandırılması sonucunda 1., 2. ve 3.doğal frekansta meydana gelen ciddi sayılabilecek bir düşüş yaşanmıştır. Her üç frekans için bu azalma, söz konusu kirişlerde degradasyon etkilerinin 3 aylık yaşlandırma periyodunda başladığını göstermektedir.

Çizelge 4.36 El ile tahrik edilen 3 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	32,01	197,7	562,1
	2.numune	31,92	198,3	561
	3.numune	39,49	243	663,2
	4.numune	32,04	205,6	581,2
	5.numune	32,78	199	565,8
	Ortalama	32,1875	200,15	567,525

Çizelge 4.37 El ile tahrik edilen 3 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	31,28	187,6	541,6
	2.numune	33,91	206,2	587
	3.numune	29,79	187,1	529,1
	4.numune	29,79	189,7	545
	5.numune	32,23	197,9	562,7
	Ortalama	31,4	193,7	553,08

Çizelge 4.38 El ile tahrik edilen 3 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	35,19	213,8	611,6
	2.numune	32,53	205,7	586,1
	3.numune	30,46	191,6	543,2
	4.numune	35,98	228,6	646,1
	5.numune	30,36	197	563,3
	Ortalama	32,135	202,025	576,05

Aynı numunelerin el ile uyarılan frekans ortalamaları değişimi ise Çizelge 4.36, 4.37 ve 4.38'den görülebilir. Yaşlanma eğilimleri ve yaşlandırmaya bağlı olarak kompozit kirişlerde meydana gelen degradasyon yaklaşık olarak aynıdır. Güneş ve toprak altında 3 ay yaşlandırmanın söz konusu kirişlerin ilk üç doğal frekans değişiminde ciddi bir etkisinden söz edilemez. Ancak aynı periyotta suda yaşlandırmada ilk üç frekans değişiminde belli bir düşüş göze çarpmaktadır. Bu

sonuçlar çekiç ile uyarma yöntem sonuçları ile uyumludur. Ayrıca suda 3 aylık yaşlandırma periyodunda dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlerin doğal frekanslarında meydana gelen düşüşler hasar başlangıcının belirtileri olarak kabul edilebilir.

Çizelge 4.39, 4.40 ve 4.41’de belirlenen çevresel faktörlerde 6 ay boyunca dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlerin çekiç ile uyarılan titreşim testi sonuçları görülebilir. Bu sonuçlar aynı kompozit grubunun referans ve 3 ay yaşlandırılmış numunelerin verileri ile karşılaştırıldığında güneşte yaşlandırma için herhangi bir değişiklik söz konusu değilken suda ve toprak altında 2.ve 3.doğal frekansta düşüş trendinin sürdüğü görülebilir. 3 ay yaşlandırılmış numunelerde nemin etkisini doğal frekanslarda belli ettiği görülebilir.

Çizelge 4.39 Çekiç ile tahrik edilen 6 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	33,78	207,4	588,75
	2.numune	32,99	205,6	585,4
	3.numune	30,7	192	550,9
	4.numune	36,32	224,5	628,8
	5.numune	31,01	196,6	559,5
	Ortalama	32,12	200,4	571,138

Çizelge 4.40 Çekiç ile tahrik edilen 6 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	40,8	254,45	694,5
	2.numune	34,36	217	623,7
	3.numune	30,03	185,9	530
	4.numune	31,01	196,4	559,3
	5.numune	29,27	181,5	524,8
	Ortalama	31,1675	195,2	559,45

Çizelge 4.41 Çekiç ile tahrik edilen 6 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	29,91	183,9	534,1
	2.numune	30,85	197	563,8
	3.numune	35,16	215,8	605,5
	4.numune	30,4	190,4	539,1
	5.numune	30,76	193,1	550,3
	Ortalama	31,416	196,04	558,56

Aynı karbon kompozit kırıtlara ait el ile uyarılan titreşim testi sonuçlarına Çizelge 4.42, 4.43 ve 4.44 incelendiğinde, çekik ile uyarılan veriler ile paralel olduğu görülebilir. Güneşte yaşlandırma için düşük bir azalma varken toprak altında ve sudaki yaşlandırmada her üç doğal frekansta hatırı sayılır bir düşüş söz konusudur. Toprak altında yaşlandırmanın etkisini 6 ay yaşlandırma sonunda gösterdiği referans ve 3 ay yaşlandırılmış numunelere bakılarak görülebilir.

Çizelge 4.42 El ile tahrik edilen 6 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değeri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	33,51	204,7	584
	2.numune	32,41	205,8	586,6
	3.numune	30,76	191,7	551,3
	4.numune	36,29	224,8	629,2
	5.numune	30,82	196,3	560,2
	Ortalama	31,875	199,625	570,525

Çizelge 4.43 El ile tahrik edilen 6 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değeri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	40,65	254,3	694,7
	2.numune	34,15	215,2	619,65
	3.numune	30,09	186,3	530,15
	4.numune	30,52	196,4	561,2
	5.numune	29,14	180,8	524,3
	Ortalama	30,975	194,675	558,825

Çizelge 4.44 El ile tahrik edilen 6 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değeri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	29,91	185,7	539,2
	2.numune	30,91	197,6	564,4
	3.numune	35,8	214,2	596,3
	4.numune	30,36	190,2	539,6
	5.numune	31,01	194,2	550
	Ortalama	31,598	196,38	557,9

Çevresel faktörlerde 9 ay yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit kırıtların çekik ile uyarılan titreşim testi sonuçları Çizelge 4.45, 4.46 ve 4.47'den görülebilir. Bu veriler incelendiğinde sudaki yaşlandırma etkisinin her üç doğal frekans değişiminde 3 ve 6 aylık yaşlandırma sonuçları ile paralellik gösterdiği görülebilir. Ayrıca güneşte ve toprak altındaki yaşlandırmada herhangi bir değişiklik

söz konusu değildir. Sudaki yaşlandırma için 2.ve 3.doğal frekanstaki azalma oranı 3 ve 6 ay yaşlandırılmış verilerde olduğu gibi 1.doğal frekanstan daha yüksektir. Bu durum Şekil 4.25’den net bir şekilde görülebilir.

Çizelge 4.45 Çekiç ile tahrik edilen 9 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	30,03	193,8	557
	2.numune	32,1	198,7	559,8
	3.numune	40,04	247,1	725,6
	4.numune	31,22	199,2	564,7
	5.numune	34,12	214,8	617,85
	Ortalama	31,867	201,625	574,838

Çizelge 4.46 Çekiç ile tahrik edilen 9 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	30,33	183,60	534,70
	2.numune	30,21	191,30	542,15
	3.numune	31,68	195,10	554,20
	4.numune	29,60	181,40	524,70
	5.numune	32,50	206,70	603,60
	Ortalama	30,86	191,62	551,87

Çizelge 4.47 Çekiç ile tahrik edilen 9 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	32,35	203,70	570,30
	2.numune	32,71	207,20	585,10
	3.numune	30,15	191,70	551,90
	4.numune	30,46	187,00	535,60
	5.numune	43,85	271,30	761,90
	Ortalama	31,42	197,40	560,73

Çevresel faktörlerde 9 ay yaşlandırılmış aynı kompozit kırımların el ile uyarılan titreşim verileri ise Çizelge 4.48, 4.49 ve 4.50’den görülebilir. Bu çizelgedeki veriler, aynı kompozitlerin çekiç ile uyarılan sonuçları ile paralellik göstermektedir. Ayrıca bu veriler, el ile uyarılan referans, 3 ve 6 ay yaşlandırılmış sonuçlar ile karşılaştırıldığında bu periyoda kadar güneşte yaşlandırmanın doğal frekanslar üzerinde etkisi çok düşüktür. Suda ve toprak altında yaşlandırma etkisi ise doğal frekanslar üzerinde düşüş etkisini sürdürmüştür. Ancak bu kırımların 12 aylık yaşlanma verileri ve grafiği incelendiğinde 9 aylık periyottaki düşüşün sebebin

yaşlanma etkisinden çok numunelerin ebatlarından ya da titreşim testlerinde oluşabilecek muhtemel aksiliklerden kaynakladığı vurgulanabilir (Çakar, 2003). Dolayısıyla söz konusu kompozit kirişlerin doğal frekans değişimi 12 aylık yaşlanma verileri ile beraber düşünüldüğünde, frekans düşüşünün ilk 3 aylık periyotta olduğu ve daha sonra bu periyota kadar kirişler üzerinde belirli bir değişikliğin gerçekleşmediği ifade edilebilir. Bu durum çekiç ile uyarılan aynı kompozit kirişler için de geçerlidir.

Çizelge 4.48 El ile tahrik edilen 9 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	30,12	194,2	558
	2.numune	31,74	202,4	567,2
	3.numune	38,7	242	674,5
	4.numune	31,34	199,3	564,7
	5.numune	33,78	215,2	619,7
	Ortalama	31,745	202,775	577,4

Çizelge 4.49 El ile tahrik edilen 9 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	30,40	186,20	542,70
	2.numune	30,43	190,70	543,30
	3.numune	31,56	193,70	548,80
	4.numune	29,17	181,20	524,40
	5.numune	32,56	207,00	602,00
	Ortalama	30,82	191,76	552,24

Çizelge 4.50 El ile tahrik edilen 9 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	32,75	203,30	568,60
	2.numune	33,08	208,00	585,75
	3.numune	30,30	191,20	551,60
	4.numune	30,27	187,30	534,20
	5.numune	43,82	271,30	763,80
	Ortalama	31,60	197,45	560,04

Çizelge 4.51, 4.52 ve 4.53’de 12 ay boyunca çevresel faktörlerde yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlere ait çekiç ile uyarılan titreşim verileri görülebilir. Bu veriler referans ve 3 aylık periyotlarla yaşlandırılmış çekiç ile uyarılan sonuçlar ile karşılaştırıldığında güneşte

yaşlandırmanın bu periyot sonunda her üç frekans değişiminde etkisini gösterdiği görülebilir. Bu periyotta toprak altında yaşlandırmanın her üç frekans üzerinde herhangi bir değişime neden olmadığı ve daha önceki yaşlandırma periyotlarında oluşan frekans düşümünün sabit şekilde devam ettiği görülebilir. Suda yaşlandırmada ise 1.doğal frekansta düşük bir azalma gerçekleşirken 2.ve 3.doğal frekanslarda herhangi bir değişim olmamıştır.

Çizelge 4.51 Çekiç ile tahrik edilen 12 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	29,30	183,60	532,70
	2.numune	38,57	225,60	637,70
	3.numune	35,34	220,80	618,60
	4.numune	30,00	187,70	535,90
	5.numune	32,68	206,80	585,60
	Ortalama	31,32	197,35	562,55

Çizelge 4.52 Çekiç ile tahrik edilen 12 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	33,63	208,00	585,50
	2.numune	30,55	196,20	558,50
	3.numune	29,33	184,20	529,50
	4.numune	38,82	240,50	658,10
	5.numune	30,70	189,90	539,50
	Ortalama	31,05	194,58	553,25

Çizelge 4.53 Çekiç ile tahrik edilen 12 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	33,36	208,00	587,70
	2.numune	29,14	184,20	529,50
	3.numune	32,81	203,90	569,30
	4.numune	41,08	255,20	725,50
	5.numune	30,64	197,30	563,00
	Ortalama	31,49	198,35	562,38

Aynı kompozit kirişlerin 12 ay çevresel faktörlerde yaşlandırılmış el ile uyarılan titreşim sonuçları Çizelge 4.54, 4.55 ve 4.56'dan görülebilir. Bu sonuçlar çekiç ile uyarılan kompozit kirişlerin sonuçları ile paralellik göstermektedir. Ayrıca bu sonuçlar, referans, 3, 6 ve 9 aylık periyotlarla yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlerin el ile uyarılan titreşim sonuçları ile

karşılaştırıldığında güneşte yaşlandırmanın doğal frekanslar üzerinde etkisi çok düşükken suda ve toprak altında yaşlandırmanın doğal frekanslar üzerinde hatırı sayılır bir etkisinden bahsedilebilir.

Çizelge 4.54 El ile tahrik edilen 12 ay güneş altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	28,81	183,40	530,50
	2.numune	38,73	226,00	638,10
	3.numune	34,94	219,00	615,60
	4.numune	29,85	187,30	536,50
	5.numune	32,26	206,70	584,40
	Ortalama	31,47	199,10	566,75

Çizelge 4.55 El ile tahrik edilen 12 ay suda yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

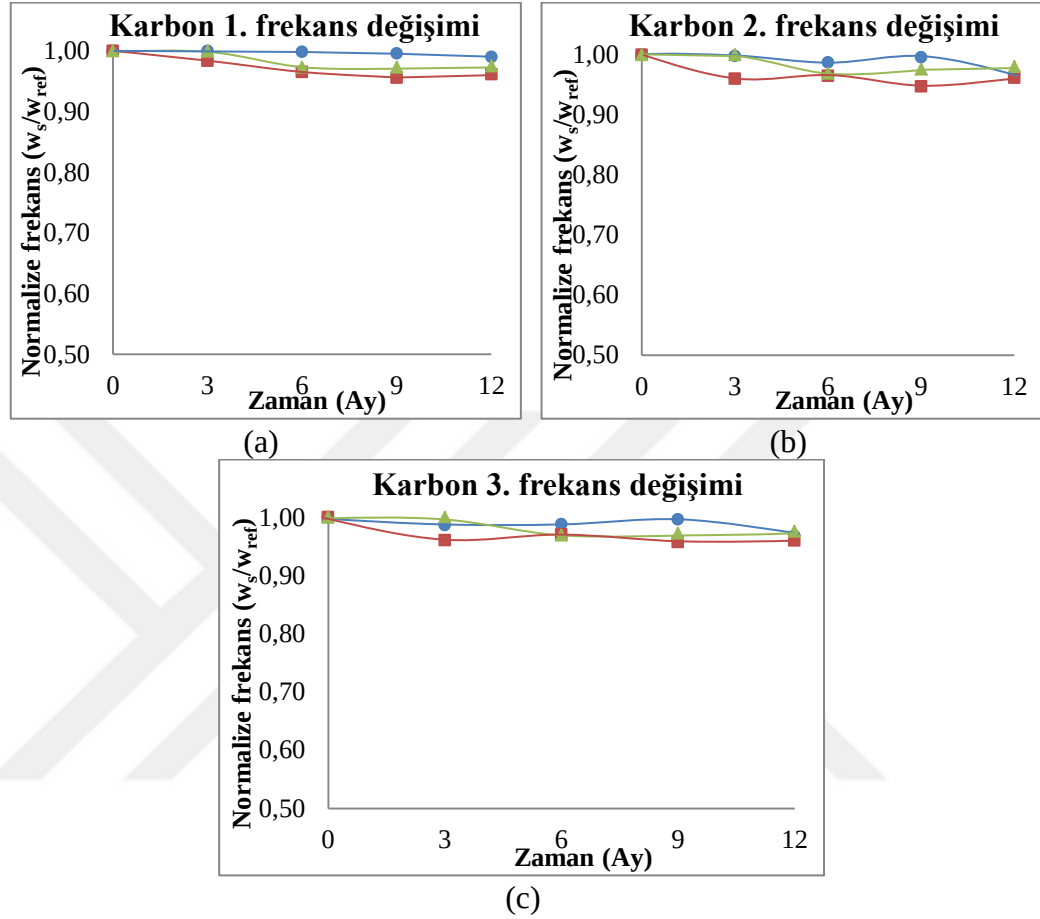
	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	33,51	208,35	585,80
	2.numune	30,52	196,40	561,10
	3.numune	29,11	185,00	537,15
	4.numune	38,73	239,20	659,00
	5.numune	30,49	190,00	538,90
	Ortalama	30,91	194,94	555,74

Çizelge 4.56 El ile tahrik edilen 12 ay toprak altında yaşlandırılmış dokunmuş karbon elyaf takviyeli numunelerin frekans değerleri

	Frekanslar (Hz)	1.mod	2.mod	3.mod
Numuneler	1.numune	33,20	209,20	588,90
	2.numune	29,05	185,00	535,30
	3.numune	32,68	203,30	570,90
	4.numune	41,14	256,60	729,00
	5.numune	30,85	197,60	565,70
	Ortalama	31,50	200,30	569,53

Yaşlandırma etkisinin dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlerin doğal frekansı üzerinde olan etkileri ilk üç frekans için Şekil 4.25'te toplu olarak gösterilmiştir. Güneş altında yaşlandırmanın dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin doğal frekansları üzerinde etkisi diğer yaşlandırma faktörlerine göre daha düşük seviyededir. Bu yaşlandırma koşulunu artan bir sırayla toprak altında ve suda yaşlandırma faktörleri izlemektedir. Suda yaşlandırmanın dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerde olduğu gibi dokunmuş karbon elyaf takviyeli

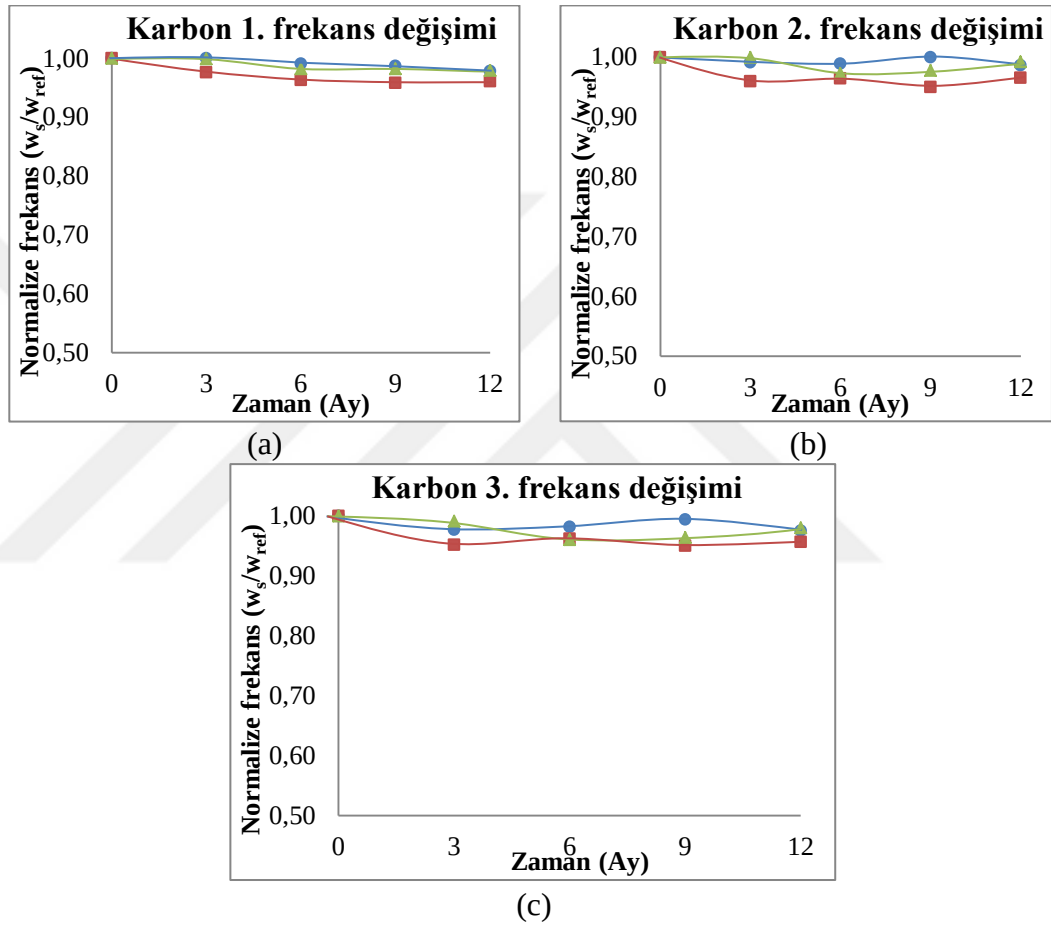
kompozitler için de en yıkıcı faktör olduğu görülebilir. Bu durum, matris elemanının polimerik esaslı olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.25 Çekiç ile tahrik edilen dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yaşlandırma koşullarına göre (a) 1.frekans, (b) 2.frekans ve (c) 3.frekans değişimi (Seriler: Daire; Güneş, Kare; Su ve Üçgen; Toprak)

Çekiç ile uyarılan titreşim sonuçlarını içeren Şekil 4.25 incelendiğinde, su içinde bir yıl süre ile yaşlandırmanın 1. doğal frekans üzerine yaklaşık olarak %4,5 oranında bozunmaya sebep olurken toprak altında yaşlandırmanın %3 ve Güneşte yaşlandırmanın ise %2,8 civarında bir etkisi olduğu görülmüştür (Şekil 4.25a). Aynı dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit kırımların el ile uyarılma sonucu doğal yaşlandırma koşullarına göre elde edilen ilk üç doğal frekans değişimi Şekil 4.26'da verilmiştir. El ile uyarılan sonuçlar, çekiç ile uyarılan sonuçlar ile aynı şartlandırma koşullarına bağlı olarak 2. doğal frekans bozunma eğilimi 1. doğal frekans sonuçlarından ayrılmaktadır. Çünkü araştırılan yaşlandırma koşullarından en yıkıcı koşul olarak suda yaşlandırmayı güneşte ve toprak altında yaşlandırma izlemektedir.

Suda, güneşte ve toprak altında yaşlandırma koşullarının 2.doğal frekans değişimleri üzerinde sırasıyla %5,2, %3,3 ve %3 oranında bir etkisi olduğu bulunmuştur (Şekil 4.25b). 3. doğal frekans sonuçları 2. doğal frekans sonuçları ile paralellik göstermektedir ve Suda, güneşte ve toprak altında yaşlandırma koşullarının 3.doğal frekans değişimleri üzerinde sırasıyla %4, %3,2 ve %3,1 oranında bir etkisi olduğu bulunmuştur (Şekil 4.25c).



Şekil 4.26 El ile tahrik edilen dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yaşlandırma koşullarına göre (a) 1.frekans, (b) 2.frekans ve (c) 3.frekans değişimi (Seriler: Daire; Güneş, Kare; Su ve Üçgen; Toprak)

El ile uyarılan dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin 1.doğal frekans değişimi üzerinde en yıkıcı çevresel faktör suda yaşlandırmadır. Bu faktörü yaklaşık eşit seviyede güneşte ve toprak altında yaşlanma takip etmektedir. Suda, güneşte ve toprak altında yaşlandırmanın dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin 1.doğal frekanslar üzerine sırasıyla %4,2, %2,2 ve %2,1 etkisi olduğu görülmüştür

(Şekil 4.26a). 2.doğal frekans değişimleri Şekil 4.26b’de incelendiğinde yine suda çevresel şartlandırmanın en şiddetli koşul olduğu görülmektedir. Bu durumu, karbon kompozitlerin 1.doğal frekans değişimlerinin aksine sırasıyla toprak ve güneş izlemektedir. Yine söz konusu kompozitlerin çekiç ile tahrik edilen sonuçları da aynı yaşlandırma eğilimini göstermektedir. Çevresel faktörlerin 1 yıl şartlandırma sonucu dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin 2.doğal frekans bozunmaları üzerinde suda, toprak altında ve güneşte yaşlandırmanın %5, %2,8 ve %1,1 etkisi olduğu görülmüştür. Bu veriler, çekiç ile tahrik edilen aynı dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin 2.doğal frekans değişimlerine güneşte şartlandırma hariç yakın değerlere sahiptir. Doğal çevresel şartlandırmanın dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin 3.doğal frekans değişimlerine olan etkisi Şekil 4.26c’den görülebilir. En şiddetli şartlandırmanın suda yaşlandırma olduğu ve bunu sırasıyla 2.doğal frekans değişimlerinde olduğu gibi toprak ve güneş takip etmektedir. Bu yaşlanma davranışı, aynı kompozitlerin çekiç ile tahrik edilen titreşim cevapları ile uyumaktadır. Dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin 3.doğal frekans değişimine suda, toprak altında ve güneşte şartlandırmanın sırasıyla %5, %4 ve %2,5 etkisi olduğu görülmüştür. El ile uyarılan deney sonuçları çekiç ile uyarılan yaşlandırmaya bağlı frekans değişimlerine göre daha yüksek olarak elde edilmiştir.

Dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin 1 yıl süre ile çevresel yaşlandırma koşullarına bağlı bozunmasında en yıkıcı faktörün suda (gün sıcaklıkları ile beraber) şartlandırma olduğu görülmüştür. Bu çevresel faktörü bazı istisnalar haricinde toprak altında yaşlandırma izlemiştir. Güneş altında sergide yaşlandırmanın ise söz konusu kompozitlerin doğal frekans değişimleri üzerinde çok az bir bozunmaya sebep olduğu görülmüştür. Değişen gün içi sıcaklıklar ile beraber suda ve toprak altında yaşlandırma faktörlerinde etkili olan durum kompozitler tarafından emilen nemdir. Nemin kompozit malzemeler üzerinde olan etkileri literatür bölümünde detaylı olarak işlenmişti. Çevresel faktörlerin dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerin doğal frekansı üzerinde dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlere göre daha çok bozunmaya sebep olduğu görülmüştür. Bu durumun sebebi olarak aramid elyafların organik yapısından ve dolayısıyla su sever

(Jones, 2003; Pegoretti, 2012; Sethi ve Ray, 2015) doğasından kaynaklanmaktadır çünkü her iki kompozit grubu için kullanılan polimerik matris aynıdır.

Ayrıca kompozit yapılar tarafından emilen nem, epoksi malzemelerin termomekanik özelliklerini etkiler ve özellikle yüksek sıcaklıklar ile beraber camı geçiş sıcaklığının (T_g), elastik modülün ve mukavemetin düşümüne neden olur. Nem epoksi tarafından absorbe edildiğinde, epoksinin absorbe edildiği bölgedeki katmana yapışması etkilenebilir. Nem, kürlenmemiş veya kürlenmiş epoksi tarafından absorbe edildiğinde, epoksi malzemenin termomekanik özelliklerini de etkileyebilir (Ellis, 1993; Turi, 2012). Epoksi malzemelerdeki nem difüzyonu mekanizması, literatürde kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Loh ve ark., 2005; Shirangi ve Michel, 2010; Scott ve Lees, 2013). Polimer yapılarda nem taşınması, polimer nano boyuttaki boşluklar ve polimer matrisin suya olan duyarlılığı ile ilgilidir. Neme maruz kalan epoksi malzemelerde, materyalde şişme ile sonuçlanmayan nano boyuttaki boşlukları dolduran bağlanmamış serbest su ile polimerin şişmesine neden olan epoksideki hidrojen ile bağ gerçekleştirmiş olan su olmak üzere absorbe edilen suyun iki hali mevcuttur. Polimer esaslı kompozit yapılarda nemin sebep olduğu şişme nedeniyle gerçekleşen hacim değişikliği miktarı, absorbe edilen nem hacminden belirgin bir şekilde daha düşüktür. Bu durum emilen suyun büyük bir bölümünün nano boyutlu boşluklarda yer aldığını göstermektedir (Haque ve ark., 1991; Mangalgiri, 1999).

4.4 Yaşlandırılmış Dokunmuş Aramid Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Sönümlenme Oranı Değişimi

Bir yapıda, hasarın veya bozunmanın varlığı yapının doğal frekanslarında değişikliğe neden olur. Bu tür hasar mekanizmalarını belirlemede en yararlı yöntemler dinamik teste dayalıdır. Çünkü bu yöntemler, muhtemel doğal frekanslarındaki değişiklikleri belirlemeye dayalı yaklaşımı kullanan yöntemlerdir ve frekans ölçümlerinin hızla uygulanabilmesi nedeniyle genellikle güvenilirdir (Williams ve Salawu, 1997). Ölçülen doğal frekanslar referans değerlerden önemli ölçüde düşük olduğunda anormal derecede rijitlik kaybı olduğu sonucuna varılabilir. Çalışma şartlarına bağlı olarak yapının kütlelerinin sabit ya da arttığı (nem

absorpsiyonu) durumlarda doğal frekanslardaki azalmadan dolayı rijitlikte azalmalar meydana gelir.

Bir titreşim testi uygulamasında, hem serbest titreşim davranışındaki sönümleme hem de Frekans Tepki Fonksiyonları (FTF) aynı anda elde edilmektedir. FTF cevabı, bir yapının veya numunenin doğal frekanslarının bir ayrışmasıdır ki bu cevap aynı zamanda o yapıya ait titreşim modlarının tipik bir parmak izi kimliğine karşılık gelmektedir (Botelho ve ark., 2005b). Titreşim pik frekanslarının sayısı (titreşim modları) ve FTF şekli, malzemenin rijitlik yapısı ile doğrudan ilişkilidir.

Titreşime dayalı hasar tespit yöntemlerinde temel teori; fiziksel özelliklerde (kütle, sönümleme ve sertlik) hasara bağlı meydana gelen değişikliklerin, modal özelliklerde (doğal frekanslar, modal sönümleme ve mod şekilleri) saptanabilir değişikliğe neden olacağı tezine dayanmaktadır. Örneğin, rijitliğin azalması çatlakların başlangıcından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, bir yapıda hasara bağlı meydana gelen değişiklikler, modal parametrelerde meydana gelen değişiklikler analiz edilerek tanımlanabilir (Kısa, 2004; Kısa ve Gürel, 2005; Kısa, 2012).

Dinamik test sonuçları yorumlanırken tek başına doğal frekans değişiklikleri, yapısal bir hasarın konumunun uygun bir şekilde belirlenmesi için yeterli olmayabilir. Bu durum, benzer yapıya sahip çatlakların iki farklı bölgede aynı miktarda frekans değişimine sebebiyet verebilmesinden kaynaklanmaktadır. Böyle bir durumda hasarın konumunu belirlemek amacıyla diğer modal parametreler dikkate alınmalıdır. Çünkü aynı ortam koşullarına bağlı oluşan bir hasarın veya hasarların, yapının diğer modal parametreleri üzerinde de etkisi olacaktır. Bu nedenle dinamik test uygulamalarında sonuçların güvenilirliğini sınamak amacıyla sadece frekans değişim sonuçları ile yetinilmemelidir.

Modal parametrelerden biri olan sönümleme, dinamik bir yapıdaki veya sistemdeki enerji dağılımının bir ölçümüdür ve yapısal davranışın karakteristiğidir. Ayrıca sönümleme, bir yapıdaki mekanik enerjinin, enerji dağılım miktarı sönümleme seviyesinin bir ölçüsü olan, termal enerjiye dönüştürülmesi olarak

tanımlanabilir. Coulomb sürtünmesi, akışkan viskozite, hava sönümlemesi, manyetik histerezis, piezoelektrik sönümleme vb. birçok sönümleme biçimi vardır (Körük, 2008). Öte yandan sönümleme, dinamik yükleme davranışının pik genliğini kontrol eden parametrenin bir ölçüsüdür (Williams ve Salawu, 1997). Doğal frekanslar ve mod şekilleri ile karşılaştırıldığında sönümlenme oranı, hasar tespiti için doğal frekanslar ve mod şekilleri kadar yaygın olarak kullanılmamıştır (Curadelli ve ark., 2008). Ancak, bir yapıda çatlak algılama için sönümlemeye dayalı yöntemler, frekanslara ve mod şekillerine dayalı algılama yöntemlerine göre bazı avantajlara sahiptir. Çatlaklar, çok az ya da neredeyse hiç frekans değişimine sebep olmadığı bir durumda, çatlak sonucu oluşan doğrusal olmayan dağılma etkileri sebebiyle sönümleme değişiklikleri ile saptanabilmektedir.

Normal şartlarda hasar görmüş bir yapının, hasarsız yapıya göre artan oranda bir sönümleme göstermesi beklenir. Bir yapıdaki anormal derecedeki yüksek sönümleme oranı, beklenenden daha fazla enerji yayılım mekanizması olduğunu ifade etmekte ve bu durum da yapıda çatlaklar olabileceğini ima etmektedir (Salawu, 1997; Williams ve Salawu, 1997). Dolayısıyla, aynı uyarılma, tahrik koşulları altındaki elde edilen sönümleme değerlerindeki bir artış, yapıdaki bozulmanın belirtisi olarak okunabilir. Ayrıca sönümlenme, diğer modal parametrelerin, frekanslar ve mod şekilleri, hasara karşı duyarsız olduğu durumlarda hasarın belirlenebileceği tek parametre olabilir.

Deneyisel veriler kullanılarak yapıların sönümleme seviyelerinin belirlenmesine yönelik çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler genel olarak üç ana gruba ayrılabilir: (i) zaman alandaki sönüm oranı yöntemleri, (ii) frekans alandaki modal analiz eğrisi uydurma yöntemleri ve (iii) enerji ve dalga yayılımına dayanan diğer yöntemlerdir (Körük, 2008). Bu çalışmada yapılan deneyisel testler zaman alanda gerçekleştirildiğinden, yukarıda sıralanan ana gruplardan zaman alan dikkate alınmıştır. Zaman alanda bir yapının veya sistemin sönümleme oranının elde edilebileceği üç farklı yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler sırasıyla; zaman alandaki pik ölçümlerine bir eğri uydurma ile eksponansiyel fonksiyonun üssünün bulunması, logaritmik azalış ve yarım güç bant genişliği yöntemidir (Kıral ve ark.,

2012). Çok dereceli serbestlik titreşimine sahip bir yapının sönümlü serbest titreşimi, temel modda sönümsüz doğal frekans ω_n ve sönüm oranına ζ bağlı olarak denklem 4.3 deki görüldüğü gibi,

$$z(t) = Ae^{-\zeta\omega_n t} \cos(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t - \varphi) \quad (4.3)$$

ifade edilebilir. Burada $z(t)$ nodal yer değiştirme vektörünü, A genliği, φ faz değişimini ω_n sönümsüz doğal frekansı ve ζ sönümleme oranını ifade etmektedir. Serbest titreşim frekansı, sönümlenmiş doğal frekans olarak bilinir ve $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ ile formüle edilir. Ekspansiyel terimin üssü, serbest yanıtın azalma oranını belirler ve doğrudan yapının sönümleme karakteristiğine bağlı olarak belirlenir. Sönüm oranı, zarf eğrisi pik değerlerinin ölçülmesine bağlı olarak $Ae^{-\sigma t}$ ifadesinin üssünden hesaplanabilir. Bir yapının serbest titreşim cevabına bağlı olarak ekspansiyel fonksiyonun üssü belirlendikten sonra sönüm oranı, küçük sönümleme oranları için sönümsüz ve sönümlü doğal frekansların aynı olduğu göz önünde bulundurarak, kolayca hesaplanabilir (Kıral ve ark., 2012). Sönümleme oranının saptanması için kullanılan bir diğer yöntem, serbest titreşim cevabındaki ardışık pikler arasındaki oranın logaritmasından türetilen logaritmik düşüştür. Logaritmik azalma denklem 4.4 teki gibi ifade edilebilir (Bulut ve ark., 2016).

$$\delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (4.4)$$

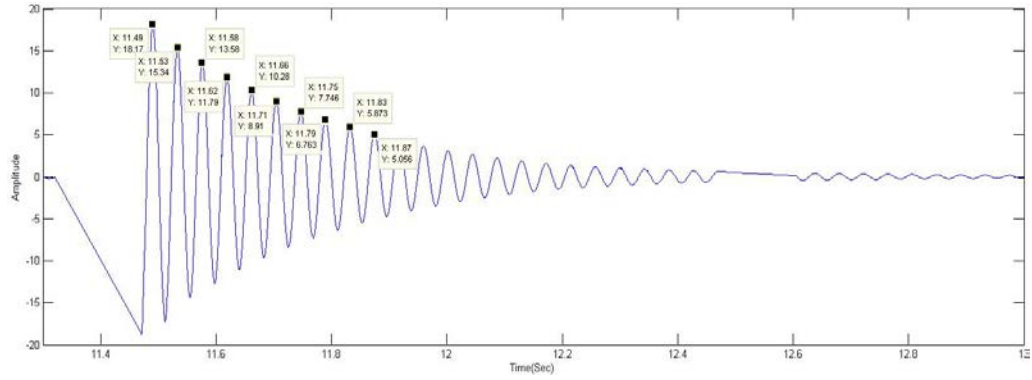
Burada δ logaritmik azalmayı, A_0 maksimum genliği, A ise n çevrim sonraki maksimum genliktir. Sönüm oranı (ζ), denklem 4.4'ten elde edilen logaritmik azalmayı kullanarak denklem 4.5'deki şekilde ifade edilebilir (Kıral ve ark., 2012; Bulut ve ark., 2016).

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}} \cong \frac{\delta}{2 * \pi} \quad (4.5)$$

Sönümleme oranının bulunmasında diğer ve en çok kullanılan yöntem ise yapı-

nın frekans davranışının kullanıldığı yarı güç yöntemidir. *i.* mod için rezonant pikteki 3 dB düşüş ile ilgili frekans bandı, ilgili modal sönüm oranını hesaplamak için kullanılır.

Bu çalışmada, titreşim testimiz ile uygun olması sebebiyle bahsi geçen yöntemlerden logaritmik azalış yöntemi kullanılmıştır (Kıral ve ark., 2012). Dokunmuş Aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlere ait zaman alandaki serbest titreşim cevabında bulunan bir zaman aralığı seçilerek gerçekleştirilmiştir. Burada çekiç ile uyarılan kompozit kirişlerin serbest titreşim cevabında hem piklerin belirlenememesi hem de pik sayısının az olması sebebiyle bütün sönümlenme oranları için el ile uyarılan zaman alandaki dinamik test cevapları kullanılmıştır. Her numunenin daha önceden belirlenen 1 cm uzaklıktan serbest bırakılması ile testler tamamlanmıştır. Bu test titreşim cevabında 10 adet ardışık piklerin seçilmesi ile denklem 3 kullanılarak logaritmik azalış elde edilmiş ve daha sonra da denklem 4 kullanılarak sönümlenme oranı bulunmuştur. Piklerin seçiminde, kompozit numunelerin büyük çoğunluğunda ilk maksimum genlik değerinde muhtemelen titreşimin elle yapılmasından dolayı sönümlenme oran hesaplanmasını etkileyebilecek diğer pik davranışlarından farklı olarak ani pikler olduğu gözlenmiştir. Kompozit kirişlerin büyük çoğunluğu bu davranışı gösterirken diğerleri ise göstermemiştir. Bu yüzden, bahsi geçen davranışı gösteren kiriş sonuçlarında sönüm oranlarını yanlış olarak hesaplamamak ve analiz sonuçlarının güvenilirliğini sağlamak için ilk maksimum genlikten sonraki ardışık 10 değer göz önüne alınarak sönümlenme oranları hesaplanmıştır. Logaritmik azalış metoduna dair dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerinden 5.numuneye ait analiz sonucu örneği Şekil 4.27’de gösterilmiştir. Bu değer kullanılması ile söz konusu kompozit kirişlere ait sönümlenme oranı hesaplanmıştır. Çizelge 4.57’de, dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit kirişlerin her yaşlandırma faktörü ve süresi için 5 adet numunenin ortalama sönümlenme oranı toplu olarak verilmiştir. Frekans değişimlerinde ortalama sonuçlarda aşırı sapmalara neden olan numuneler sönümlenme oranı için de değerlendirme dışı bırakılmıştır. Çizelgelerdeki farklı yaşlandırma koşulları için elde edilen değerler incelendiğinde genel olarak her yaşlandırma koşulu için bir artış gerçekleştiği ifade edilebilir.



Şekil 4.27 Dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit kirişlerin sönümleme oranı için ardıl piklerin belirlenmesi

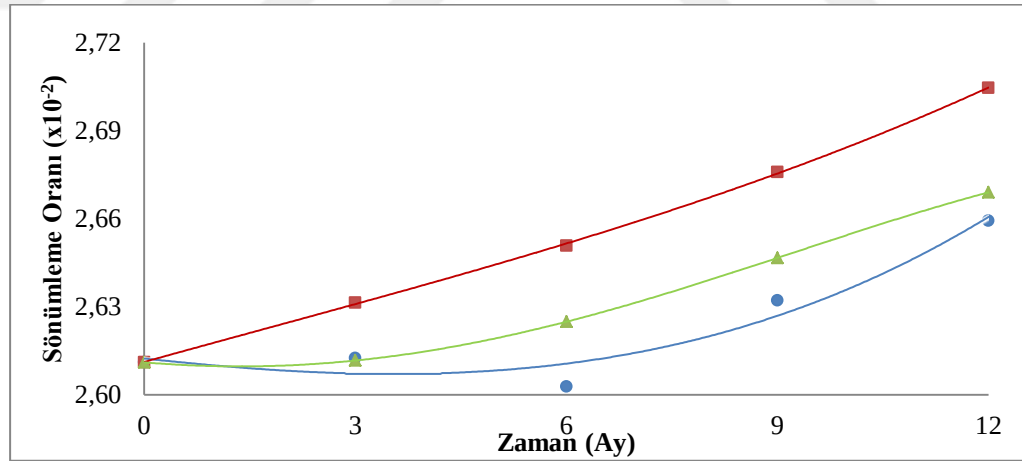
Çizelge 4.57 Dokunmuş aramid elyaf takviyeli 5 adet numunenin çevresel koşullara göre ortalama sönüm değerleri

Çevresel Koşullar		Güneş	Su	Toprak	Sönüm Oranı
Yaşlanma Süresi	Referans	0,026110515	0,026110515	0,026110515	
	3 ay yaşlanmış	0,026124759	0,026313852	0,026116599	
	6 ay yaşlanmış	0,026027756	0,026508268	0,026248871	
	9 ay yaşlanmış	0,026321471	0,026759148	0,026466438	
	12 ay yaşlanmış	0,026593316	0,027046223	0,026689832	

Dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozit numunler için hesaplanan Çizelge 4.57'deki sönüm oranları değişimi verileri, yaşlanma koşullarına göre grafiksel olarak Şekil 4.28'de verilmiştir. Burada dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitler için en şiddetli ve yıkıcı çevresel faktörün suda (güneş altında) yaşlanma olduğu görülmektedir. Bu karakterisitik yaşlanma eğilimi dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerin doğal frekans değişimleri ile örtüşmekte ancak sönüm oranlarındaki değişim, doğal frekans değişimlerin aksine daha belirgin ve lineer bir seyir izlemektedir. Güneş altında suda yaşlanma çevresel faktörü sırasıyla nemli bir ortam olan toprak ve güneş altında yaşlanma takip etmektedir. Toprak altında yaşlanmanın güneş altında yaşlanma faktörüne göre aramid elyaf takviyeli kompozitlerin sönüm oranları üzerinde etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca güneş ve toprak altında yaşlandırmanın ilk 6 aylık yaşlanma boyunca küçük değişimler gösterdiği ancak sonraki süreçte artış seviyesinin daha ciddi oranda olduğu görülebilir. Şekil 4.28'deki grafik incelendiğinde; güneş altında suda, toprak ve güneş altında şartlandırılmanın sönüm oranlarındaki değişimine yüzde olarak sırasıyla 3.6, 2.2 ve 1.85 oranında etki ettiği görülmüştür. Şartlandırma faktörlerine bağlı olarak sönüm oranlarındaki değişimlerin doğal frekans değişimlerine oranla daha

düşük olarak gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu durum dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerin doğal frekans değişimlerini gösteren Şekil 4.14 ile 4.28 karşılaştırılarak görülebilir.

Sönümlenmeye dayanan bir yapıdaki çatlak tespiti, doğal frekanslara ve mod şekillerine dayalı diğer algılama yöntemlerine göre avantajlıdır. Çünkü Modena ve ark. (1999), görsel olarak algılanamayan çatlakların rezonans frekanslarında çok az değişikliğe neden olduğunu ve çatlakların algılanması için daha yüksek mod şekillerini gerektirdiğini ve aynı çatlakların sönümlemede daha büyük değişikliklere neden olduğunu ifade etmiştir. Zonta ve Modena. (2001), çatlakların sönümlemeyi hasara karşı daha duyarlı hale getiren vizkoz olmayan bir dağılım mekanizmasına yol açtığını gözlemlemiştir. Bu durum, sönümleme özelliklerinin, çatlakların ürettiği doğrusal olmayan ve dağılma değişikliklerini algılama kapasitesine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Sönümlenmeye dayalı yöntemler diğer algılama yöntemlerine oranla daha üstün olduğundan frekans değişimlerinde elde edilen daha büyük degradasyon oranları, numunelerin daha fazla sayıda tutulması önermektedir.

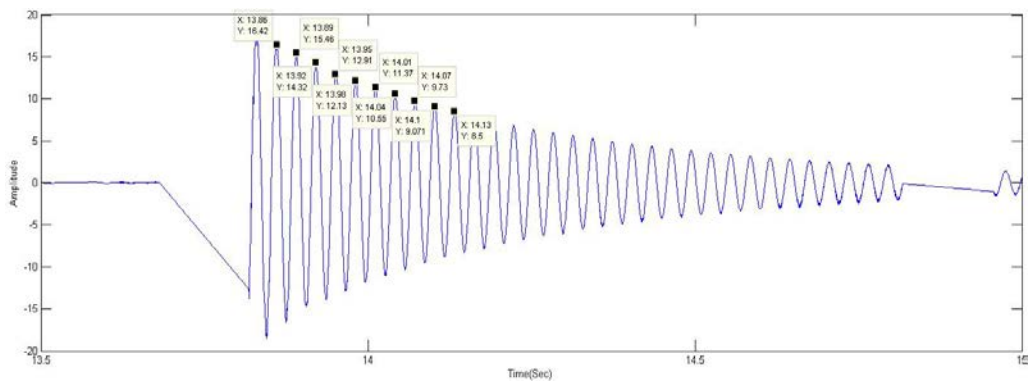


Şekil 4.28 Dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerin yaşlandırma koşullarına göre sönümleme oranı değişimi (Seriler: Daire; Güneş, Kare; Su ve Üçgen; Toprak)

4.5 Yaşlandırılmış Dokunmuş Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Sönümleme Oranı Değişimi

Bölüm 4.4 te dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitler için uygulanan yön

tem, dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlere de uygulanmıştır. Dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit kirişler için ardıl piklerin seçimini gösteren grafik Şekil 4.29'da verilmiştir. Söz konusu kirişler için elde sönümleme oranları değişimi her yaşlandırma koşulu için 5 adet olmak üzere ortalama olarak Çizelge 4.58'den görülebilir. Bu grafiklerdeki veriler incelendiğinde, dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlerin sönümleme oranı değişimlerinin Şekil 4.30'daki dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitler ile hemen hemen aynı davranışı gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum iki kompozit kiriş grubunun epoksi matrisli olmasına bağlanmıştır. Dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerde olduğu gibi en şiddetli çevresel degradasyon/bozunma güneş altındaki su içerisinde gerçekleşmiştir. Bu durumu, sırasıyla toprak ve güneş altında yaşlandırma izlemiştir. Dokunmuş karbon elyaf takviyeli kirişlerin sönümleme oranı değişimi, dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerin yaşlanma eğiliminde olduğu gibi hemen hemen lineer bir artış göstermiştir. Yaşlanma sonuçlarının her iki kompozit kiriş grubu için lineer bir davranış göstermemesinin sebebi; kompozit malzemelerin heterojen yapısının yanı sıra rastgele mikro boşluklar, yeni başlamış hasar bölgeleri ve farklı boyut ve yönlerde mikro çatlaklar içermesinden kaynaklanmaktadır (Cech ve ark., 2014). Dolayısıyla, bu malzemelerdeki bölgesel mukavemet ve dinamik özellikler rastgele bir şekilde değişir. Hasarın konumu ve malzemede oluşan hasarın derecesi de öngörülemeyen bir şekilde değişir (Ray, 2006a).



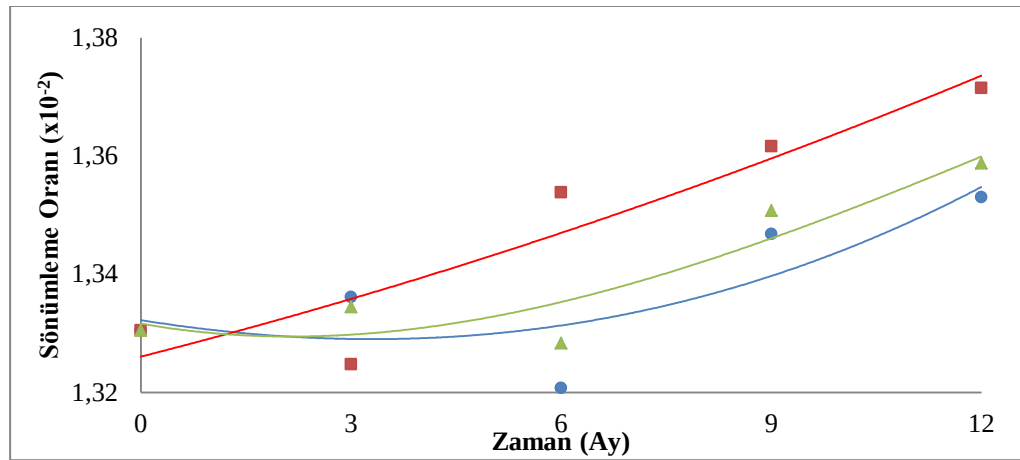
Şekil 4.29 Dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlerin sönümleme oranı için ardıl piklerin belirlenmesi

Göz önüne alınan doğal yaşlandırma koşulların sırasıyla %3, %2 ve 1.8 civarında sönüm oranı değişimine sebep olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.28). Bu

çevresel şartlar arasında sulu ortamların en yıkıcı etkiye sahip olması, epoksi malzemelerin suya karşı olan duyarlılığından kaynaklandığı ifade edilebilir (Jones, 2003; Wang ve ark., 2016b). Nemin kompozit malzemelerin gövdesine taşınması, polimer zincirlerinin bölümsel hareketliliğine ve aynı zamanda epoksi matris kütlelerinde bulunan serbest hacme bağlıdır. Bölümsel hareketlilik ise doymamışlık derecesi, çapraz bağlanma ve kristallilik derecesi faktörlerinden etkilenir. Emilen nemin oranı, epoksi malzemelerin termomekanik özelliklerini etkiler ve özellikle yüksek sıcaklıklarda camsı geçiş sıcaklığını (T_g), elastik modülünü ve mukavemetini düşürür. Polimer kompozitlerinde emilen su moleküllerinin, özellikle uzun süreli kullanımlarında kompozit yapıların nihai performansı üzerinde dikkat edilmesi gereken etkileri olduğundan literatür bölüm içeriğinde bahsedilmiştir. Bu yapılardaki nem artışı, (a) şişme ve boyutsal değişiklikler, (b) reçine matrisin camsı geçiş sıcaklığında (T_g) azalma ve (c) matris esaslı kompozitlerin kesme ve basma mukavemetleri gibi özelliklerinin bozulmasına neden olabilir (Mangalgiri, 1999; Guermazi ve ark., 2016). Nemin polimerlerin ve polimer kompozitlerin mekanik dav

Çizelge 4.58 Dokunmuş karbon elyaf takviyeli 5 adet numunenin çevresel koşullara göre ortalama sönüm değer değişimleri

Çevresel Koşullar		Güneş	Su	Toprak	Sönüm Oranı
Yaşlanma Süresi	Referans	0,013304712	0,013304712	0,013304712	
	3 ay yaşlanmış	0,013361265	0,013247464	0,013344306	
	6 ay yaşlanmış	0,013207284	0,013537923	0,013283333	
	9 ay yaşlanmış	0,013467803	0,013616054	0,013507128	
	12 ay yaşlanmış	0,013529992	0,013714546	0,013587565	



Şekil 4.30 Dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yaşlandırma koşullarına göre sönümleme oranı değişimi (Seriler: Daire; Güneş, Kare; Su ve Üçgen; Toprak)

ranışı ve dayanıklılığı üzerindeki olumsuz etkileri, özellikle uzun hizmet ömrü için tasarlanmış yapısal yük taşıma uygulamalarında, bu materyallerin emilim davranışını ve nem soğurma kapasitesini doğru bir şekilde tahmin etme ihtiyacının önemini vurgulamaktadır.

Polimerlerde nem taşınması, polimer matrisindeki molekül boyutlu deliklerle (nano boyuttaki boşluklar) ve polimer matrisin suya olan ilgisi ile ilgilidir. Epoksi sisteminde emilen suyun iki suyun hali mevcuttur. Biri, nano boyuttaki boşlukları dolduran bağlanmamış serbest su, materyalde şişme ile sonuçlanmaz, iken diğeri ise hidrojen ile epoksiyle bağ gerçekleştirmiş olan sudur, polimerin şişmesine neden olur. Nem kaynaklı şişme nedeniyle gerçekleşen hacim değişikliği miktarı, absorbe edilen nem hacminden belirgin bir şekilde daha düşüktür. Bu durum emilen suyun büyük bir bölümünün nano boyutlu boşluklarda bulunduğunu göstermektedir (Haque ve ark., 1991; Mangalgiri, 1999). Literatür çalışmalarında çeşitli elyaf takviyeli kompozitlerin neme maruz kalması nedeniyle mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler detaylı olarak sıralanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları ile de hem doğal yaşlandırma koşullarının dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin dinamik özelliklerini etkilediği hem de göz önüne alınan çevresel koşullar arasındaki degradasyon/bozunma etkileri dinamik testler ile belirlenmiştir.

Her iki kompozit grubu için sönümleme oranlarındaki değişim oranları (Şekil 4.28 ile 4.30) incelendiğinde, dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlerin sönüm oranı değişiminin dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerden daha fazla gerçekleştiği görülebilir. Bu durum aramid kompozitlerin suya olan hassasiyetine bağlanabilir (Aronhime ve ark., 1987; Haque ve ark., 1991; Bank ve ark., 1995, Jones, 2003; Pegoretti, 2012; Sethi ve Ray, 2015). Sönüm oranlarındaki meydana gelen artışlar bir hasar başlangıcının göstergesi olabilir ve yapılarda muhtemel çatlak başlangıçlarını ima etmektedir (Salawu, 1997; Williams ve Salawu, 1997). Burada her iki kompozit grubu için en yüksek sönümleme ve doğal frekans değişimlerinin güneş altında iken suda şartlandırmada gerçekleştirilmesi; suyun, (Güneydoğu Anadolu sıcaklıkları ile beraber) epoksi esaslı malzemeler için yıkıcı sonuçlarını göstermektedir. Bu durum literatür çalışmalarıyla paralellik göstermektedir (Gaur ve

ark., 1994, Zhou ve Lucas 1999a; 1999b; Botelho ve ark., 2006; 2007, Tian ve Hodgkin, 2010, 2015, Naebe ve ark., 2016, Guermazi ve ark., 2016). Dikkat edilmesi gereken diğer bir durum ise 1 yıl boyunca güneş ve toprakta yaşlandırmanın, her iki kompozit grubu için sönüm ve doğal frekans değişimlerinde ciddi bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

Dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kirişlerin şartlandırma koşullarına bağlı olarak doğal frekans ve sönümlenme oranı yüzde değişimleri, karşılaştırma amaçlı Çizelge 4.61’de verilmiştir. Burada, çekiç ile tahrik edilen analiz sonuçları esas alınmıştır. Frekans değişimleri incelendiğinde karbon kompozitlerin aramid kompozitlerden daha fazla frekans değişim gösterdiği gözlenmiştir. Ancak sönümlenme oranı değişimleri için tam tersi bir durum söz konusudur. Şartlandırma sonuçları incelendiğinde sönümlenme oranı değişimlerinin, doğal frekanslara oranla daha az gerçekleştiği görülebilir. Daha önce belirtildiği gibi sönümlenme oranı, doğal frekanslara göre bozunmalara karşı daha hassastır. Bu durum, doğal frekans değişimlerinin daha çok numune ile araştırılmasının yerinde olacağını göstermektedir ve bu durumun daha sonraki çalışmalarda gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Çizelge 4.59 Çekiç ile uyarılan 12 ay yaşlandırmış dokunmuş kompozit kirişlerin yüzde frekans ve sönümlenme oranı değişim karşılaştırılması

Kompozit	Şartlandırma	1.frekans(%)	2.frekans(%)	3.frekans(%)	Sönümlenme oranı (%)
Aramid	Suda	4	4,5	3,7	3,6
	Toprakta	3	4	3,2	2,2
	Güneşte	2	3	1,8	1,85
Karbon	Suda	4,5	5,2	4	3
	Toprakta	2,8	3	3,1	2
	Güneşte	3	3,3	3,2	1,8

Şekil 4.13 ile 4.14 ve Şekil 4.25 ile 4.26 incelendiğinde, hem aramid hem de karbon kompozitlerin frekans değişimleri güneş altında kuru yaşlandırma durumunda ortamdaki bağıl nem ile doğru orantılı ve sıcaklık ile ters orantılı (Şekil 3.32 ve 3.33) olarak önce artış daha sonra ise azalış göstermiştir. Bu durum, kirişlerde herhangi bir rijitlik kaybı olmaksızın ortamdaki bağıl nem miktarına bağlı olarak kompozit malzemelerdeki nem difüzyonunun artmasına ve daha sıcaklığın artması ile beraber

nem difüzyonunun azalmasına bağlanmıştır. Kompozit kirişlerde yaşanan bu nem difüzyonunun kirişlerin kütlesini artırdığı dolayısıyla doğal frekanslarda bir düşüşe neden olmuştur. Göz önüne alınan hem her iki kompozit grubu için hem de bu kompozitlerin her üç doğal frekansı için aynı artış ve azalışın yaşanması bağıl nem ve sıcaklığa bağlı olarak değişimin yaşandığını desteklemektedir.

Her iki kompozit grubu için suda yaşlandırmanın hem doğal frekans hem de sönümleme oranı değişimi üzerinde en yıkıcı etkiye sahip olduğu ve çevresel koşulların en çok 2.doğal frekans üzerinde bozunmaya sebep olduğu görülmüştür. Suda şartlandırmayı genel olarak toprakta ve güneşte yaşlandırma takip etmiştir. Ayrıca daha önce belirtildiği gibi, her ne kadar karbon kompozitlerin doğal frekans değişimleri aramid numunelerden daha yüksek oranda bozunduğu görülsede sönümleme oranları için tam tersi bir durum söz konusudur. Karbon kompozitlerin sönümleme değişimi aramid kompozitlere nazaran daha düşük olarak gerçekleşmiştir. Bu durum, Bölüm 2’de bahsedildiği üzere aramid elyafların susever olduğu vurgulanmaktadır. Bu çizelgede aramid elyafların karbon kompozitlere göre sönümleme oranlarındaki değişiminin daha fazla gerçekleşmesi bu bilgiyi desteklemektedir.

Toprak ve güneşte yaşlandırma sonuçlarına bakıldığında ise aramid kirişlerin her üç doğal frekansları için toptakta şartlandırmanın, yani nemli ortamda, daha yıkıcı olduğu görülmüştür. Karbon kompozitler için ise tam tersi bir durum söz konusudur yani güneşte şartlandırma, toprakta şartlandırmaya göre daha çok frekans değişimine sebebiyet verdiği gözlenmiştir. Sönümle oranı değişiminde ise aramid kompozitlerdeki yüzde değişimin karbon kompozitlere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Sönüm oranları değişiminde en yıkıcı çevresel koşul sırlamasının her iki kompozit grubu için suda, toprakta ve güneşte olduğu görülmüştür. Dolayısıyla çevresel yaşlandırma koşullarının sönüm oranı üzerindeki değişimlerinin her iki kompozit grubu için aynı eğilim gösterdiği görülmüştür. Bu durumun temel sebebi kompozitlerin aynı matris elemanına sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu çalışmada incelenen ilk üç doğal frekans için çevresel etmenlerden en çok etkilenen frekans modunun her iki kompozit grubu için de 2.mod olduğu görülmüştür. Bu modu sırasıyla 1.mod ve 3.mod izlemiştir. Bu sonuçlardan görüleceği üzere ilk modlar yaşlandırma etmenlerine karşı daha hassastır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlerin seçilen doğal çevresel koşullarda (suda, güneşte ve toprakta) bir yıllık süre boyunca şartlandırılmasına bağlı olarak bazı dinamik özelliklerindeki değişimleri incelenmiştir. Kompozit plakalar üretilirken matris malzemesi olarak her iki elyaf için de epoksi matris seçilmiştir. Üretim yöntemi olarak endüstride yaygın olarak kullanılan vakum destekli reçine infüzyon metodu kullanılmıştır. Çevresel şartlandırılmaya tabi tutulacak kompozit kirişlerin ebatları ile ilgili herhangi bir standart bulunmadığı için test kuponlarının ebatları hususunda literatürdeki bazı çalışmalardan faydalanılmıştır.

Dinamik parametrelerin belirlenmesinde kullanılan deneysel test düzeneği güvenilirliğinin belirlenmesi, nümerik olarak Ansys yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dahası, deneysel yöntemin güvenilirliği kanıtlandıktan sonra titreşim esaslı yöntemlerin, çevresel koşullarda şartlandırılmış dokunmuş elyaf takviyeli kompozitlerin dinamik özelliklerinin değişiminin belirlenmesinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla, söz konusu metodoloji, yaşlandırılmış kompozitlerin dinamik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Yaşlandırılan kompozit kirişler her üç ayda bir dinamik teste tabi tutulmuş ve doğal frekans ile sönüm oranı değişimleri referans veriler ile karşılaştırılmıştır.

Her iki dokunmuş elyaf takviyeli kompozit grubun yaşlanmaya bağlı olarak doğal frekans ve sönümleme oranlarındaki değişim eğiliminin benzerlikler gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durumun sebebi olarak; her iki dokunmuş kompozit grubunun aynı matris malzemesi kullanılarak üretilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü burada epoksi matrisin susever yapısı belirleyici olmuştur (Haque ve ark., 1991; Robert ve ark., 2010). Dinamik parametrelerin genel itibariyle, en çok sırasıyla

olmak üzere su, toprak ve güneş şartlandırılması çevresel koşullarından etkilendiği görülmüştür.

Bu çalışmada incelenen şartlandırma koşulları arasından en yıkıcı çevresel faktörün güneş altındaki suda yaşlandırma olduğu görülmüştür. Bu çevresel şartlandırmada, hem nem hem de sıcaklık beraber kompozitlere etki ettiği için nem alımının daha da fazla gerçekleştiği ve oluşan muhtemel hasar etkisini daha da artırdığı düşünülmektedir. Çünkü, literatürde sıcaklık arttıkça kompozitlerin nem absorpsiyon oranının ve delaminasyon başlangıcın ortaya çıkmasının o kadar yüksek olacağı bildirilmiştir (Joshi 1983; Selzer ve Friedrich, 1995; Chou ve Ding, 2000; Wang ve ark., 2002; Botelho ve ark., 2006; Botelho ve ark., 2007; Ray 2006a). Suda şartlandırılmayı, sırasıyla toprak altında ve güneşte yaşlandırma çevresel koşulları takip etmiştir.

Dinamik testler gerçekleştirilirken doğal frekanslar için hem çekiç hem de el ile tahrik uygulanmıştır ancak sönümleme oranı için sadece el ile tahrik yöntemi uygulanmıştır. Sönümleme oranı elde edilirken çekiç ile yapılan testlerde piklerin belirlenememesi nedeniyle böyle bir uygulamaya gidilmiştir. Dokunmuş aramid elyaf takviyeli kirişlerin el ile tahrik edilen doğal frekans değişimleri, çekiç ile tahrik edilen değişimlere göre daha fazla gerçekleştiği görülmüştür. Ancak dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitler için yaklaşık olarak aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, karbon kompozitlerin rijitliğine bağlanmıştır ki bu da bu kompozit grubunu titreşim testi sırasında ilk uyarıcının türünden bağımsız olarak yaklaşık aynı sonuçları verebileceği çıkarımına bağlanmıştır.

Şartlandırma koşullarının dokunmuş kompozitlerin yalnızca ilk üç doğal frekansı üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Bu durumun sebebi ise hizmet ömrü sırasında bir yapının en kritik doğal frekanslarının ilk frekanslar olmasından kaynaklanmaktadır. Şartlandırma sonunda incelenen ilk üç doğal frekans arasından ikinci doğal frekansın hem aramid hem de karbon kirişler için en çok etkilenen frekans olduğu gözlenmiştir. Bu durum, nem alımına bağlı olarak kütle artışının en çok yaşandığı yerlerin yani, yapısal muhtemel bir hasarın konumunun ikinci modal

bölgede gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Williams ve Salawu, 1997).

İncelenen şartlandırma koşullarına bağlı olarak dokunmuş karbon kompozitlerin doğal frekans değişiminin dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlere oranla daha yüksek gerçekleştiği gözlenmiştir. Aramid elyaf ve epoksi matrisin susever yapısı düşünüldüğünde aksi bir durumun gerçekleşmesi daha muhtemeldir (Jones, 2003; Pegoretti, 2012; Sethi ve Ray, 2015). Bu durumun sebebinin karbon kompozitlerdeki mikro çatlakların aramid kompozitlere oranla daha fazla olmasına bağlanmıştır. Bu mikro çatlak bölgeleri nem emiliminin artmasına ve rijitliğin azalmasına sebebiyet verebilmektedir (Herrera-Franco ve Drzal, 1992; Jones 2001; Ray 2006a; Ray ve Rathore, 2015).

Kompozit kırılgarlığın yaşlanmaya bağlı olarak doğal frekans ve sönüm oranı değişimlerinin sürekli artış veya azalış gibi lineer bir davranış göstermemesi; kompozit malzemelerin heterojen olmayan yapısının yanı sıra rastgele mikro boşluklar, yeni başlamış hasar bölgeleri ve farklı boyut ve yönlerde mikro çatlaklar içermesinden kaynaklanmaktadır (Kıral ve ark., 2012; Cech ve ark., 2014). Bu durum, bu malzemelerdeki bölgesel mukavemet ve dinamik özelliklerin rastgele bir şekilde dağılım gösterebileceğini ifade etmektedir. Dolayısıyla, hasarın konumu ve malzemede oluşan hasarın derecesi de öngörülemeyen bir şekilde değişebilmektedir (Ray, 2006a).

Bir yapıda, muhtemel bir hasara bağlı olarak sönümleme oranlarında artış yaşanması beklenir (Williams ve Salawu, 1997). Çevresel şartlandırmaya bağlı olarak dokunmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerin sönümleme oranındaki artış, dokunmuş aramid elyaf takviyeli kompozitlere göre daha az gerçekleşmiştir. Özellikle nemli şartlandırmalar için bu durum, aramid kompozitlerin suya karşı olan hassasiyetine bağlanabilir (Haque ve ark., 1991; Robert ve ark., 2010). Dolayısıyla nemli ortamlarda aramid kompozitlerin karbon kompozitlere göre çevresel şartlandırmalardan daha çok etkilendiği görülmüştür.

Bu çalışmada 12 ay boyunca şartlandırılan dokunmuş aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin doğal frekanslarında yaklaşık olarak %3-4 oranında bir azalma değişimi görülürken, sönüm oranlarında ise %2-3 oranında bir artış yaşandığı görülmüştür. Kompozit yapıların yıllarca kullanılacağı düşünüldüğünde, bu yapıdaki frekans düşüşlerinin yıllar geçtikçe yaşlanmaya bağlı olarak daha da artacağı ve çok daha büyük rakamlara ulaşabileceği sonucu çıkarılabilir. Böyle bir durumda, kompozit yapıların servis hizmeti sırasında, yaşlanmaya bağlı olarak yapısal kusurlardan kaynaklı rezonansa girme veya yapıda geri dönülmez hasarlarla karşılaşılması sonucunu doğurabilecektir. Bu nedenle çevresel şartların kompozit yapıların dinamik davranışlarına ne gibi etkilerinin olduğu tespitine dair yapılan bu çalışma, kompozit yapı tasarımcıları ve üreticileri için önemli bilgiler sağlamaktadır.

5.2 Öneriler

Bu çalışmada, dokunmuş aramid ve karbon kompozitlerin dinamik özelliklerinin çevresel koşullara bağlı olarak degradasyona uğradığı görülmüştür. Uygulamalarda yaşanabilecek muhtemel problemlerin önüne geçilmesi amacıyla bu kompozitlerin doğal yaşlanması önem taşımaktadır. Dolayısıyla, önerilen çalışmaların yapılması ile bu konu ile ilgili araştırmalar derinleştirilebilir.

- Genel olarak, sönümlleme oranları değişimi doğal frekanslara nazaran daha az gerçekleşmiştir. Sönümlleme oranlarının hasarlara karşı daha hassas olduğu düşünüldüğünde, doğal frekanslardaki değişimi daha da hassas olarak belirleyebilmek için sonraki çalışmalarda numune sayısı artırılarak çalışma derinleştirilebilir.
- Aynı yaşlandırma koşullarının aynı kompozit kırılgarın mod şekilleri üzerine olan etkisinin incelenerek doğal frekans ve sönümlleme oranları ile karşılaştırılması gerçekleştirilebilir.
- Aynı şartlandırma koşullarının daha yüksek doğal frekanslar üzerindeki etkisinin incelenmesi araştırılabilir.
- Çevresel koşulların, aynı kompozit grubu elyafların farklı dizilimlerine sahip hibrid kompozitler üzerine etkisinin araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- ABDEL-MAGID, B., LOPEZ-ANIDO, R., SMITH, G. and TROFKA, S., 2003. Flexure creep properties of E-glass reinforced polymers. *Composite structures*, 62(3): 247-253.
- ABDEL-MAGID, B., ZIAEE, S., GASS, K. and SCHNEIDER, M., 2005. The combined effects of load, moisture and temperature on the properties of E-glass/epoxy composites. *Composite Structures*, 71(3): 320-326.
- ABOT, J.L., YASMIN, A., and DANIEL, I.M., 2005. Hygroscopic behavior of woven fabric carbon-epoxy composites. *Journal of reinforced plastics and composites*, 24(2): 195-207.
- ADITYA, P.K. and SINHA, P.K., 1992. Diffusion coefficients of polymeric composites subjected to periodic hygrothermal exposure. *Journal of reinforced plastics and composites*, 11(9): 1035-1047.
- ADVANI, S.G. and SOZER, E.M., 2002. *Process modeling in composites manufacturing*. CRC Press, New York, 13s.
- AGARWAL, B.D., BROUTMAN, L.J. and CHANDRASHEKHARA, K., 2006. *Analysis and performance of fiber composites*. John Wiley & Sons, New Delhi, 416s.
- AKAY, M., MUN, S.K.A. and STANLEY, A., 1997. Influence of moisture on the thermal and mechanical properties of autoclaved and oven-cured Kevlar-49/epoxy laminates. *Composites Science and Technology*, 57(5): 565-571.
- ALIAS, M.N. and BROWN, R., 1993. Corrosion behavior of carbon fiber composites in the marine environment. *Corrosion science*, 35(1-4): 395-402.
- ALLEMANG, R., 1999. *Vibrations: Experimental Modal Analysis*. Structural Dynamics Research Laboratory, University of Cincinnati, 20: 263-662.
- ALLRED, R.E., 1981. The effect of temperature and moisture content on the flexural response of Kevlar/epoxy laminates: Part II.[± 45 , 0/90] filament orientation. *Journal of Composite Materials*, 15(2): 117-132.
- ALLRED, R.E. and ROYLANCE, D.K., 1983. Transverse moisture sensitivity of aramid/epoxy composites. *Journal of Materials Science*, 18(3): 652-656.
- AMER, M.S., KOCZAK, M.J. and SCHADLER, L.S., 1996. Relating hydrothermal degradation in single fibre composites to degradation behaviour in bulk composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27(9): 861-867.
- AMER, M.S. and SCHADLER, L.S., 1998. Micromechanical Behavior of Graphite/Epoxy Composites. Part II: Interfacial Durability. *Science and Engineering of Composite Materials*, 7: 115-150.
- ANDERSON, T.J. and NAYFEH, A.H., 1996. Natural frequencies and mode shapes of laminated composite plates: experiments and FEA. *Journal of Vibration and Control*, 2(4): 381-414.
- APICELLA, A., MIGLIARESI, C., NICODEMO, L., NICOLAIS, L., IACCARINO, L. and ROCCOTELLI, S., 1982. Water sorption and mechanical properties of a glass-reinforced polyester resin. *Composites*, 13(4): 406-410.

- APICELLA, A., MIGLIARESI, C., NICOLAIS, L., IACCARINO, L. and ROCCOTELLI, S., 1983. The water ageing of unsaturated polyester-based composites: influence of resin chemical structure. *Composites*, 14(4): 387-392.
- ARONHIME, M.T., NEUMANN, S., and MAROM, G., 1987. The anisotropic diffusion of water in Kevlar-epoxy composites. *Journal of materials science*, 22(7): 2435-2446.
- ASP, LE., 1998. The effects of moisture and temperature on the interlaminar delamination toughness of a carbon/epoxy composite. *Composites Science and Technology*. 58: 967-977.
- AVITABLE, P., 2000. Experimental modal analysis (a simple non-mathematical presentation). In *Annual Technical Meeting-Institute Of Environmental Sciences And Technology*, 46: 434-448.
- AWAJA, F., NGUYEN, M.T., ZHANG, S. and ARHATARI, B., 2011. The investigation of inner structural damage of UV and heat degraded polymer composites using X-ray micro CT. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(4): 408-418.
- AWAJA, F., ZHANG, S., TRIPATHI, M., NIKIFOROV, A. and PUGNO, N., 2016. Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair. *Progress in Materials Science*, 83: 536-573.
- BANK, L.C., GENTRY, T.R. and BARKATT, A., 1995. Accelerated test methods to determine the long-term behavior of FRP composite structures: environmental effects. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 14(6): 559-587.
- BARBOSA, A.P.C., FULCO, A.P.P., GUERRA, E.S., ARAKAKI, F.K., TOSATTO, M., COSTA, M.C.B. and MELO, J.D.D., 2017. Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 110: 298-306.
- BARKOULA, N.M., 2013. Environmental Degradation of Carbon Nanotube Hybrid Aerospace Composites. In *Carbon Nanotube Enhanced Aerospace Composite Materials*, Springer, Netherlands, 337-376
- BAZLI, M., ASHRAFI, H. and OSKOUEI, A.V., 2016. Effect of harsh environments on mechanical properties of GFRP pultruded profiles. *Composites Part B: Engineering*, 99: 203-215.
- BRADY, R.L. and PORTER, R.S., 1990. Interfacial adsorption and crystallization of polycarbonate in carbon fiber composites. *Journal of applied polymer science*, 39(9), 1873-1885.
- BRIGHAM, E.O., 1988. *The fast Fourier transform and its applications*. Prentice Hall, London, 156s.
- BROAD, A.I., 2012. Development of Vacuum Assisted Composites Manufacturing Technology for Wind Turbine Blade Manufacture. University of Central Lancashire, Doctoral dissertation, Preston, 28s.
- BOCKENHEIMER, C., FATA, D. and POSSART, W., 2004. New aspects of aging in epoxy networks. II. Hydrothermal aging. *Journal of Applied Polymer Science*, 91(1): 369-377.
- BOTELHO, E.C., COSTA, M.L., PARDINI, L.C. and REZENDE, M.C., 2005a. Processing and hygrothermal effects on viscoelastic behavior of glass fiber/epoxy composites. *Journal of materials science*, 40(14): 3615-3623.

- BOTELHO, E.C., PARDINI, L.C. and REZENDE, M.C., 2005b. Hygrothermal effects on damping behavior of metal/glass fiber/epoxy hybrid composites. *Materials Science and Engineering: A*, 399(1): 190-198.
- BOTELHO, E.C., PARDINI, L.C., and REZENDE, M.C., 2006. Hygrothermal effects on the shear properties of carbon fiber/epoxy composites. *Journal of materials science*, 41(21): 7111-7118.
- BOTELHO, E.C., PARDINI, L.C. and REZENDE, M.C., 2007. Damping behavior of hygrothermally conditioned carbon fiber/epoxy laminates. *Journal of applied polymer science*, 106(5): 3143-3148.
- BOWLES, K.J., ROBERTS, G.D. and KAMVOURIS, J.E., 1997. In *High Temperature and Environmental Effects on Polymeric Composites*, ASTM Publication, Philadelphia, 175s.
- BÖER, P., HOLLIDAY, L. and KANG, T.H.K., 2013. Independent environmental effects on durability of fiber-reinforced polymer wraps in civil applications: a review. *Construction and Building Materials*, 48: 360-370.
- BULUT, M., BOZKURT, Ö.Y., and ERKLIĞ, A., 2016. Damping and vibration characteristics of basalt-aramid/epoxy hybrid composite laminates. *Journal of Polymer Engineering*, 36(2): 173-180.
- BUNSELL, A.R. and RENARD, J., 2005. *Fundamentals of fibre reinforced composite materials*. IOP Publishing, Bristol, 32s, 378s.
- BUXTON, A. and BAILLIE, C., 1994. A study of the influence of the environment on the measurement of interfacial properties of carbon fibre/epoxy resin composites. *Composites*, 25(7): 604-608.
- BYARS, E.A., WALDRON, P., DEJKE, V., DEMIS, S. and HEDDADIN, S., 2003. Durability of FRP in concrete-deterioration mechanisms. *International Journal of Materials and Product Technology*, 19(1-2): 28-39.
- CANDIDO, G.M., COSTA, M.L., REZENDE, M.C. and ALMEIDA, S.F.M., 2008. Hygrothermal effects on quasi-isotropic carbon epoxy laminates with machined and molded edges. *Composites Part B: Engineering*, 39(3): 490-496.
- CAPOZUCCA, R., 2014. Vibration of CFRP cantilever beam with damage. *Composite Structures*, 116: 211-222.
- CARLSSON, L.A., ADAMS, D.F. and PIPES, R.B., 2014. *Experimental characterization of advanced composite materials*. CRC press, USA, 72s, 127s.
- CECH, V., KNOB, A., HOSEIN, H.A., BABIK, A., LEPCIO, P., ONDREAS, F. and DRZAL, L.T., 2014. Enhanced interfacial adhesion of glass fibers by tetravinylsilane plasma modification. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 58: 84-89.
- CERNÝ, I. and MAYER, R.M., 2010. Evaluation of static and fatigue strength of long fiber GRP composite material considering moisture effects. *Composite Structures*, 92(9): 2035-2038.
- CERVENKA, A.J., BANNISTER, D.J. and YOUNG, R.J., 1998. Moisture absorption and interfacial failure in aramid/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29(9): 1137-1144.
- CHAKRABORTY, S., MUKHOPADHYAY, M. and MOHANTY, A.R., 2000. Free vibrational responses of FRP composite plates: experimental and numerical studies. *Journal of reinforced plastics and composites*, 19(7): 535-551.

- CHATEAUMINOIS, A., CHABERT, B., SOULIER, J.P. and VINCENT, L., 1993. Hygrothermal ageing effects on the static fatigue of glass/epoxy composites. *Composites*, 24(7): 547-555.
- CHAUDHURI, R.A., BALARAMAN, K. and KUNUKKASSERIL, V.X., 2005. A combined theoretical and experimental investigation on free vibration of thin symmetrically laminated anisotropic plates. *Composite Structures*, 67(1): 85-97.
- CHAUDHURI, S.N., CHAUDHURI, R.A., BENNER, R.E. and PENUGONDA, M.S., 2006. Raman spectroscopy for characterization of interfacial debonds between carbon fibers and polymer matrices. *Composite structures*, 76(4): 375-387.
- CHIOU, P., and BRADLEY, W.L., 1995. Effects of seawater absorption on fatigue crack development in carbon/epoxy EDT specimens. *Composites*, 26(12): 869-876.
- CHOU, P.J.C. and DING, D.J., 2000. Characterization of moisture absorption and its Influence on composite structures. *J. Thermoplast. Compos.* 13: 207-225.
- CUI, D. and HU, H., 2016. Thermal buckling and natural vibration of a rectangular thin plate with in-plane stick-slip-stop boundaries. *Journal of Vibration and Control*, 22(7): 1950-1966.
- CURADELLI, R.O., RIERA, J.D., AMBROSINI, D. and AMANI, M.G., 2008. Damage detection by means of structural damping identification. *Engineering Structures*, 30(12): 3497-3504
- ÇAKAR, O., 2003. Titreşim Testlerinden Elde Edilen Verilerin Kalitesinin İyileştirilmesi, Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, Doctoral Thesis, Istanbul, 7s.
- DAO, B., HODGKIN, J., KRSTINA, J., MARDEL, J. and TIAN, W., 2006a. Accelerated aging versus realistic aging in aerospace composite materials. I. The chemistry of thermal aging in a low-temperature-cure epoxy composite. *Journal of applied polymer science*, 102(5): 4291-4303.
- DAO, B., HODGKIN, J., KRSTINA, J., MARDEL, J. and TIAN, W., 2006b. Accelerated aging versus realistic aging in aerospace composite materials. II. Chemistry of thermal aging in a structural composite. *Journal of applied polymer science*, 102(4): 3221-3232.
- DAO, B., HODGKIN, J., KRSTINA, J., MARDEL, J. and TIAN, W., 2007a. Accelerated ageing versus realistic ageing in aerospace composite materials. III. The chemistry of thermal ageing in bismaleimide based composites. *Journal of applied polymer science*, 105(4): 2062-2072.
- DAO, B., HODGKIN, J.H., KRSTINA, J., MARDEL, J. and TIAN, W., 2007b. Accelerated ageing versus realistic ageing in aerospace composite materials. IV. Hot/wet ageing effects in a low temperature cure epoxy composite. *Journal of applied polymer science*, 106(6): 4264-4276.
- DASH, P.K. and SINGH, D., 2011. Shear Characterisation of Woven Carbon/Epoxy Composite Under Various Adverse Environments. *Strain*, 47(5): 458-468.
- DEROINÉ, M., LE DUIGOU, A., CORRE, Y.M., LE GAC, P.Y., DAVIES, P., CÉSAR, G. and BRUZAUD, S., 2014. Accelerated ageing of polylactide in aqueous environments: Comparative study between distilled water and seawater. *Polymer Degradation and Stability*, 108: 319-329.

- DETASSIS, M., PEGORETTI, A. and MIGLIARESI, C., 1995. Effect of temperature and strain rate on interfacial shear stress transfer in carbon/epoxy model composites. *Composites Science and Technology*, 53(1): 39-46.
- DEWIMILLE, B. and BUNSELL, A.R., 1983. Accelerated ageing of a glass fibre-reinforced epoxy resin in water. *Composites*, 14(1): 35-40.
- DRZAL, L.T., RICH, M. J. and LLOYD, P.F., 1983. Adhesion of graphite fibers to epoxy matrices: I. The role of fiber surface treatment. *The Journal of Adhesion*, 16(1): 1-30.
- DODSON, M.M. and SILVA, A.M., 1985. Fourier analysis and the sampling theorem. In *Proceedings of the Royal Irish Academy. Section A: Mathematical and Physical Sciences*, Royal Irish Academy, 81-108
- DOXSEE JR, L.E., JANSSENS, W., VERPOEST, I. and DE MEESTER, P., 1991. Strength of aramid-epoxy composites during moisture absorption. *Journal of reinforced plastics and composites*, 10(6): 645-655.
- ELLYIN, F. and ROHRBACHER, C., 2000. Effect of aqueous environment and temperature on glass-fibre epoxy resin composites. *Journal of reinforced plastics and composites*, 19(17): 1405-1427.
- ELLYIN, F. and MASER, R., 2004. Environmental effects on the mechanical properties of glass-fiber epoxy composite tubular specimens. *Composites Science and Technology*, 64(12): 1863-1874.
- ETCHES, J., POTTER, K., WEAVER, P. and BOND, I., 2009. Environmental effects on thermally induced multistability in unsymmetric composite laminates. *Composites part A: applied science and manufacturing*, 40(8): 1240-1247.
- EWINS, D.J., 2000. *Modal testing: theory, practice and application*. Research studies press ltd, England, 11s, 17s, 27s, 155s.
- FAN, J., HU, X. and YUE, C.Y., 2003. Thermal degradation study of interpenetrating polymer network based on modified bismaleimide resin and cyanate ester. *Polymer international*, 52(1): 15-22.
- FAZZOLARI, F.A. and CARRERA, E., 2013. Free vibration analysis of sandwich plates with anisotropic face sheets in thermal environment by using the hierarchical trigonometric Ritz formulation. *Composites Part B: Engineering*, 50: 67-81.
- FENG, L., LI, K., XUE, B., FU, Q. and ZHANG, L., 2017. Optimizing matrix and fiber/matrix interface to achieve combination of strength, ductility and toughness in carbon nanotube-reinforced carbon/carbon composites. *Materials & Design*, 113: 9-16.
- FIGUEIREDO, J.L., BERNARDO, C., BAKER, R.T.K. and HÜTTINGER, K.J., 2013. *Carbon fibers filaments and composites*. Springer Science & Business Media, 4-5s.
- FUQUA, M.A., HUO, S. and ULVEN, C.A., 2012. Natural fiber reinforced composites. *Polymer Reviews*, 52(3): 259-320.
- GARCIA-ESPINEL, J.D., CASTRO-FRESNO, D., GAYO, P.P. and BALLESTER-MUÑOZ, F., 2015. Effects of sea water environment on glass fiber reinforced plastic materials used for marine civil engineering constructions. *Materials & Design*, 66: 46-50.
- GAUR, U. and MILLER, B., 1990. Effects of environmental exposure on fiber/epoxy interfacial shear strength. *Polymer Composites*, 11(4): 217-222.

- GAUR, U., CHOU, C.T. and MILLER, B., 1994. Effect of hydrothermal ageing on bond strength. *Composites*, 25(7): 609-612.
- GAUTIER, L., MORTAIGNE, B. and BELLENGER, V., 1999. Interface damage study of hydrothermally aged glass-fibre-reinforced polyester composites. *Composites Science and Technology*, 59(16): 2329-2337.
- GHORBEL, I. and VALENTINE, D., 1993. Hydrothermal effects on the physico-chemical properties of pure and glass fiber reinforced polyester and vinylester resins. *Polymer Composites*, 14(4): 324-334.
- GRIMSLEY, B.W., 2005. Characterization of the vacuum assisted resin transfer molding process for fabrication of aerospace composites. Virginia Polytechnic Institute and State University, Master Thesis, Virginia, 7s.
- GOREN, A. and ATAS, C., 2008. Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding. *Archives of materials Science and Engineering*, 34(2): 117-120.
- GUERMAZI, N., TARJEM, A.B., KSOURI, I. and AYEDI, H.F., 2016. On the durability of FRP composites for aircraft structures in hygrothermal conditioning. *Composites Part B: Engineering*, 85: 294-304.
- GUETTA, B., BUNSELL, A.R., BELINSKI, C. and LALAUKERALY, F., 1989. Effect of thermal spiking on carbon Toray 300B reinforced polystyrylpyridine composites: a kinetic, spectroscopic and mechanical study. *Composites*, 20(5): 461-465.
- HANCOX, N.L., 1998. Thermal effects on polymer matrix composites: Part 2. Thermal degradation. *Materials & design*, 19(3): 93-97.
- HAQUE, A., MAHMOOD, S., WALKER, L. and JEELANI, S., 1991. Moisture and temperature induced degradation in tensile properties of Kevlar-graphite/epoxy hybrid composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 10(2): 132-145.
- HAQUE, M.H., UPADHYAYA, P., ROY, S., WARE, T., VOIT, W. and LU, H., 2014. The changes in flexural properties and microstructures of carbon fiber bismaleimide composite after exposure to a high temperature. *Composite Structures*, 108: 57-64.
- HELBLING, C.S. and KARBHARI, V.M., 2008. Investigation of the sorption and tensile response of pultruded E-glass/vinylester composites subjected to hygrothermal exposure and sustained strain. *Journal of reinforced plastics and composites*, 27(6): 613-638.
- HERRERA-FRANCO, P.J. and DRZAL, L.T., 1992. Comparison of methods for the measurement of fibre/matrix adhesion in composites. *Composites*, 23(1): 2-27.
- HOA, S.V., LIN, S. and CHEN, J.R., 1992. Hygrothermal effect on Mode II interlaminar fracture toughness of a carbon/polyphenylene sulfide laminate. *Journal of reinforced plastics and composites*, 11(1): 3-31.
- HU, H.W., 2007. Physical aging in long term creep of polymeric composite laminates. *Journal of Mechanics*, 23(03): 245-252.
- HUANG, X.L., SHEN, H.S. and ZHENG, J.J., 2004. Nonlinear vibration and dynamic response of shear deformable laminated plates in hygrothermal environments. *Composites Science and Technology*, 64(10): 1419-1435.
- HUANG, G. and SUN, H., 2007. Effect of water absorption on the mechanical properties of glass/polyester composites. *Materials & design*, 28(5): 1647-1650.

- IMIELŃSKA, K. and GUILLAUMAT, L., 2004. The effect of water immersion ageing on low-velocity impact behaviour of woven aramid-glass fibre/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 64(13): 2271-2278.
- ISHAK, Z.A. and BERRY, J.P., 1994. Hygrothermal aging studies of short carbon fiber reinforced nylon 6.6. *Journal of applied polymer science*, 51(13): 2145-2155.
- JEYARAJ, P., PADMANABHAN, C. and GANESAN, N., 2011. Vibro-acoustic behavior of a multilayered viscoelastic sandwich plate under a thermal environment. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 13(5): 509-537.
- JONES, D.P., LEACH, D.C. and MOORE, D. R., 1985. Mechanical properties of poly (ether-ether-ketone) for engineering applications. *Polymer*, 26(9): 1385-1393.
- JONES, R.H., 2001. Environmental effects on engineered materials. Marcel Dekker Inc, New York, 419s.
- JONES, F.R., 2003. The effects of aggressive environments on long-term behaviour. *Fatigue in composites*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 117-46.
- JOSHI, O.K., 1983. The effect of moisture on the shear properties of carbon fibre composites. *Composites*, 14(3): 196-200.
- KAJORNCHAPPUNNGAM, S., GUPTA, R.K. and GANGARAO, H.V., 2002. Effect of aging environment on degradation of glass-reinforced epoxy. *Journal of composites for construction*, 6(1): 61-69.
- KARGER-KOCSIS, J., MAHMOOD, H. and PEGORETTI, A., 2015. Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites. *Progress in Materials Science*, 73: 1-43.
- KARBHARI, V.M., 2006. Dynamic mechanical analysis of the effect of water on E-glass-vinylester composites. *Journal of reinforced plastics and composites*, 25(6): 631-644.
- KARBHARI, V.M. and GHOSH, K., 2009. Comparative durability evaluation of ambient temperature cured externally bonded CFRP and GFRP composite systems for repair of bridges. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(9): 1353-1363.
- KARBHARI, V.M. and XIAN, G., 2009. Hygrothermal effects on high V F pultruded unidirectional carbon/epoxy composites: moisture uptake. *Composites Part B: Engineering*, 40(1): 41-49.
- KAWAI, M., YAJIMA, S., HACHINOHE, A. and KAWASE, Y., 2001. High-temperature off-axis fatigue behaviour of unidirectional carbon-fibre-reinforced composites with different resin matrices. *Composites Science and Technology*, 61(9): 1285-1302.
- KHAJEH, A., MUSTAPHA, F., SULTAN, M.T.H., BĀNHEGYI, G., KARÁCSONY, Z. and BARANYAI, V., 2015. The effect of thermooxidative aging on the durability of glass fiber-reinforced epoxy. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015:1-13
- KIRAL, Z., İÇTEN, B.M. and KIRAL, B.G., 2012. Effect of impact failure on the damping characteristics of beam-like composite structures. *Composites Part B: Engineering*, 43(8): 3053-3060
- KIM, J.K. and MAI, Y.W., 1998. Engineered interfaces in fiber reinforced composites. Elsevier Science Ltd, United Kingdom, 1s, 56s, 62s.

- KISA, M., 2004. Free vibration analysis of a cantilever composite beam with multiple cracks. *Composites Science and Technology*, 64(9): 1391-1402.
- KISA, M. and GÜREL, A., 2005. Modal analysis of cracked cantilever composite beams. *Structural Engineering and Mechanics*, 20(2): 143-160.
- KISA, M., 2012. Vibration and stability of axially loaded cracked beams. *Structural Engineering and Mechanics*, 44(3): 305-323.
- KOOTSOOKOS, A. and MOURITZ, A.P., 2004. Seawater durability of glass-and carbon-polymer composites. *Composites Science and Technology*, 64(10): 1503-1511.
- KOYANAGI, J., YOSHIMURA, A., KAWADA, H. and AOKI, Y., 2010. A numerical simulation of time-dependent interface failure under shear and compressive loads in single-fiber composites. *Applied Composite Materials*, 17(1): 31-41.
- KÖRÜK, H., 2008. Measurement, Modelling and Modal Analyses of Helicopter Structures. İstanbul Technical University, Institute of Science and Technology, Doctoral Thesis, 24s, 34s, 38s.
- KUMAR, B. G., SINGH, R.P. and NAKAMURA, T., 2002. Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation. *Journal of Composite materials*, 36(24): 2713-2733.
- LAI, J.Y. and YOUNG, K.F., 1995. Dynamics of graphite/epoxy composite under delamination fracture and environmental effects. *Compos. Struct.* 30: 25-32.
- LI, Y., MIRANDA, J. and SUE, H.J., 2001. Hygrothermal diffusion behavior in bismaleimide resin. *Polymer*, 42(18): 7791-7799.
- LI, M., LIU, H., GU, Y., LI, Y. and ZHANG, Z., 2014. Effects of carbon fiber surface characteristics on interfacial bonding of epoxy resin composite subjected to hygrothermal treatments. *Applied Surface Science*, 288: 666-672.
- LI, W. and LI, Y., 2015. Vibration and sound radiation of an asymmetric laminated plate in thermal environments. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 28(1): 11-22.
- LIAU, W.B. and TSENG, F.P., 1998. The effect of long-term ultraviolet light irradiation on polymer matrix composites. *Polymer composites*, 19(4): 440-445.
- LIN, Y.C. and CHEN, X., 2005. Moisture sorption-desorption-resorption characteristics and its effect on the mechanical behavior of the epoxy system. *Polymer*, 46(25): 11994-12003.
- LIU, C. F. and HUANG, C. H., 1996. Free vibration of composite laminated plates subjected to temperature changes. *Computers & structures*, 60(1): 95-101.
- LO, S.H., ZHEN, W., CHEUNG, Y.K. and WANJI, C., 2010. Hygrothermal effects on multilayered composite plates using a refined higher order theory. *Composite Structures*, 92(3): 633-646.
- LU, T., SOLIS-RAMOS, E., YI, Y.B. and KUMOSA, M., 2016. Synergistic environmental degradation of glass reinforced polymer composites. *Polymer Degradation and Stability*, 131: 1-8.
- MANGALGIRI, P.D., 1999. Composite materials for aerospace applications. *Bulletin of Materials Science*, 22(3): 657-664.
- MASCIA, L. and ZHANG, J., 1995. Mechanical properties and thermal ageing of a perfluoroether-modified epoxy resin in castings and glass fibre composites. *Composites*, 26(5): 379-385.

- MATSUNAGA, H., 2007. Free vibration and stability of angle-ply laminated composite and sandwich plates under thermal loading. *Composite structures*, 77(2): 249-262.
- MENAIL, Y., EL MAHI, A., ASSARAR, M., REDJEL, B. and KONDRATAS, A., 2016. The effects of water aging on the mechanical properties of glass-fiber and kevlar-fiber epoxy composite materials. *Mechanics*, 76(2): 28-32.
- MENDELS, D.A., PAGE, S.A., LETERRIER, Y., MANSON, J.A. E. and NAIRN, J.A., 2000. A modified double lap-shear test as a mean to measure intrinsic properties of adhesive joints. 9th European Conference on Composite Materials (ECCM9), 4-7 June 2000, Brighton, s.1-10.
- MIJOVIC, J., 1985. Interplay of physical and chemical aging in graphite/epoxy composites. *Journal of composite materials*, 19(2): 178-191.
- MINOSHIMA, K., MAEKAWA, Y. and KOMAI, K., 2000. The influence of vacuum on fracture and fatigue behavior in a single aramid fiber. *International journal of fatigue*, 22(9): 757-765.
- MODENA, C., SONDA, D. and ZONTA, D., 1999. Damage localization in reinforced concrete structures by using damping measurements. In *Key engineering materials*, Trans Tech Publications, 167: 132-141.
- MODI, D., 2008. Modelling and active control of the vacuum infusion process for composites manufacture. University of Nottingham, Doctoral Thesis, Nottingham, 3s.
- NAEBE, M., ABOLHASANI, M.M., KHAYYAM, H., AMINI, A. and FOX, B., 2016. Crack damage in polymers and composites: A review. *Polymer Reviews*, 56(1): 31-69.
- NAKAMURA, T., SINGH, R.P. and VADDADI, P., 2006. Effects of environmental degradation on flexural failure strength of fiber reinforced composites. *Experimental mechanics*, 46(2): 257-268.
- NATARAJAN, S., DEOGEKAR, P.S., MANICKAM, G. and BELOUETTAR, S., 2014. Hygrothermal effects on the free vibration and buckling of laminated composites with cutouts. *Composite Structures*, 108: 848-855.
- ODEGARD, G.M. and BANDYOPADHYAY, A., 2011. Physical aging of epoxy polymers and their composites. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 49(24): 1695-1716.
- OGI, K. and TAKEDA, N., 1997. Effect of moisture content on non-linear deformation behaviour of CF/epoxy composites. *Journal of Composite Materials*. 31: 530-551.
- PANDA, H.S., SAHU, S.K. and PARHI, P.K., 2013. Hygrothermal effects on free vibration of delaminated woven fiber composite plates-Numerical and experimental results. *Composite Structures*, 96: 502-513.
- PAPANICOLAOU, G.C., PAIPETIS, S.A. and THEOCARIS, P.S., 1978. The concept of boundary interphase in composite mechanics. *Colloid & Polymer Science*, 256(7): 625-630.
- PAPANICOLAOU, G.C., KOSMIDOU, T.V., VATALIS, A.S. and DELIDES, C.G., 2006. Water absorption mechanism and some anomalous effects on the mechanical and viscoelastic behavior of an epoxy system. *Journal of applied polymer science*, 99(4): 1328-1339.

- PARK, S.J., CHANG, Y.H., KIM, Y.C. and RHEE, K.Y., 2010. Anodization of carbon fibers on interfacial mechanical properties of epoxy matrix composites. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 10(1), 117-121.
- PATEL, B.P., GANAPATHI, M. and MAKHECHA, D.P., 2002. Hygrothermal effects on the structural behaviour of thick composite laminates using higher-order theory. *Composite Structures*, 56(1): 25-34.
- PEGORETTI, A., DELLA VOLPE, C., DETASSIS, M., MIGLIARESI, C. and WAGNER, H.D., 1996. Thermomechanical behaviour of interfacial region in carbon fibre/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27(11): 1067-1074.
- PEGORETTI, A. and TRAINA, M., 2009. Liquid crystalline organic fibres and their mechanical behaviour. *Handbook of tensile properties of textile and technical fibres*. Woodhead Publishing, Cambridge, 354-436.
- PEGORETTI, A., 2012. Environmental Resistance: Stability of Structural Composites under Aggressive Conditions. In *Wiley Encyclopedia of Composites*, John Wiley & Sons, Inc., United States, 791-803s.
- PRADEEP, V. and GANESAN, N., 2008. Thermal buckling and vibration behavior of multi-layer rectangular viscoelastic sandwich plates. *Journal of Sound and Vibration*, 310(1): 169-183.
- PRIAN, L. and BARKATT, A., 1999. Degradation mechanism of fiber-reinforced plastics and its implications to prediction of long-term behavior. *Journal of Materials Science*, 34(16): 3977-3989.
- POLOWICK, C.L.R., 2013. Optimizing Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM) Processing Parameters to Improve Part Quality. Carleton University, Master Thesis, Ottawa, 9s.
- RABEK, J.F., 1995. Photochemical aspects of degradation of polymers. In *Polymer photodegradation*. Springer, Netherlands, 24-66
- RAGONDET, A., 2005. Experimental characterisation of the vacuum infusion process. University of Nottingham, Doctoral Thesis, Nottingham 1s.
- RAHAMAN, M.S.A., ISMAIL, A.F. and MUSTAFA, A., 2007. A review of heat treatment on polyacrylonitrile fiber. *Polymer Degradation and Stability*, 92(8): 1421-1432.
- RAM, K.S. and SINHA, P.K., 1992. Hygrothermal effects on the free vibration of laminated composite plates. *Journal of Sound and Vibration*, 158(1): 133-148.
- RAMIREZ, F.A., CARLSSON, L.A. and ACHA, B.A., 2008. Evaluation of water degradation of vinylester and epoxy matrix composites by single fiber and composite tests. *Journal of Materials Science*, 43(15): 5230-5242.
- RAO, V.V.S. and SINHA, P.K., 2004. Dynamic response of multidirectional composites in hygrothermal environment. *Composite Structures*, 64(3): 329-338.
- RAO, P.S., HUSAIN, M.M. and RAMULU, P.J., 2014. Effect of hydrothermal ageing on glass fibre reinforced plastic (GFRP) composite laminates exposed to water and salt water. *International Journal of Current Engineering and Technology*, Special issue-2: 47-53 .
- RATH, M.K. and SAHU, S.K., 2012. Vibration of woven fiber laminated composite plates in hygrothermal environment. *Journal of Vibration and Control*, 18(13): 1957-1970.

- RAY, B.C., BISWAS, A. and SINHA, P.K., 1991. Hygrothermal effects on the mechanical behaviour of fiber reinforced polymeric composites. *Metals Materials and Process*, 3(2): 99-108
- RAY, B.C., 2006a. Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites. *Journal of Colloid and Interface Science*, 298(1): 111-117.
- RAY, B.C., 2006b. Effects of changing environment and loading speed on mechanical behavior of FRP composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25(12): 1227-1240.
- RAY, B.C., MULA, S., BERA, T. and RAY, P.K., 2006. Prior thermal spikes and thermal shocks on mechanical behavior of glass fiber-epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25(2): 197-213.
- RAY, B.C. and RATHORE, D., 2014. Durability and integrity studies of environmentally conditioned interfaces in fibrous polymeric composites: Critical concepts and comments. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209: 68-83.
- RAY, B.C. and RATHORE, D., 2015. Environmental damage and degradation of FRP composites: A review report. *Polymer Composites*, 36(3): 410-423.
- REIFSNIDER, K.L., 2012. *Fatigue of composite materials*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 386s.
- ROBERT, M., ROY, R. and BENMOKRANE, B., 2010. Environmental effects on glass fiber reinforced polypropylene thermoplastic composite laminate for structural applications. *Polymer Composites*, 31(4): 604-611.
- ROSU, D., ROSU, L. and CASCAVAL, C.N., 2008. Effect of ultraviolet radiation on vinyl ester network based on bisphenol A. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 194(2): 275-282.
- ROSU, L., CASCAVAL, C.N. and ROSU, D., 2009. Effect of UV radiation on some polymeric networks based on vinyl ester resin and modified lignin. *Polymer Testing*, 28(3): 296-300.
- SARLIN, E., SIRONEN, R., PÄRNÄNEN, T., LINDGREN, M., KANERVA, M. and VUORINEN, J., 2017. The effect of matrix type on ageing of thick vinyl ester glass-fibre-reinforced laminates. *Composite Structures*, 168:840-850
- SALAWU, O.S., 1997. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering Structures*, 19(9): 718-723.
- SCHOEPPNER, G.A., TANDON, G.P. and POCHIRAJU, K.V., 2008. Predicting thermooxidative degradation and performance of high-temperature polymer matrix composites. In *Multiscale modeling and simulation of composite materials and structures*. Springer, United States, 359-462.
- SCHUTTE, C.L., MCDONOUGH, W., SHIOYA, M., MCAULIFFE, M. and GREENWOOD, M., 1994. The use of a single-fibre fragmentation test to study environmental durability of interfaces/interphases between DGEBA/MPDA epoxy and glass fibre: the effect of moisture. *Composites*, 25(7): 617-624.
- SELZER, R. and FRIEDRICH, K., 1995. Influence of water up-take on interlaminar fracture properties of carbon fibre-reinforced polymer composites. *Journal of Material Science*, 30: 334-338.
- SETHI, S. and RAY, B.C., 2014. An assessment of mechanical behavior and fractography study of glass/epoxy composites at different temperatures and loading speeds. *Materials & Design*, 64: 160-165.

- SETHI, S. and RAY, B.C., 2015. Environmental effects on fibre reinforced polymeric composites: Evolving reasons and remarks on interfacial strength and stability. *Advances in colloid and interface science*, 217: 43-67.
- SHAN, Y. and LIAO, K., 2002. Environmental fatigue behavior and life prediction of unidirectional glass-carbon/epoxy hybrid composites. *International Journal of Fatigue*, 24(8): 847-859.
- SHIAU, L.C. and KUO, S.Y., 2006. Free vibration of thermally buckled composite sandwich plates. *Journal of Vibration and Acoustics*, 128(1): 1-7.
- SHOKRIEH, M.M. and BAYAT, A., 2007. Effects of ultraviolet radiation on mechanical properties of glass/polyester composites. *Journal of Composite materials*, 41(20): 2443-2455.
- SHEN, C.H. and SPRINGER, G.S., 1977a. Effects of moisture and temperature on the tensile strength of composite materials. *Journal of Composite Materials*, 11(1): 2-16.
- SHEN, C.H. and SPRINGER, G.S., 1977b. Environmental effects on the elastic moduli of composite materials. *Journal of Composite Materials*, 11(3): 250-264.
- SIDDIQUI, F.N., SALEH, N., RAHAT, A., ISRAR, A. and REHMAN, A.U., 2013. An Empirical Relationship to Predict Damages in Carbon Fiber Reinforced Composites under Extreme Thermal Cycling Conditions. In *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications, 531:153-158
- SIH, G.C., CARPINTERI, A. and SURACE, G., 2013. *Advanced Technology for Design and Fabrication of Composite Materials and Structures: Applications to the Automotive, Marine, Aerospace and Construction Industry*. Springer Science Business Media Dordrecht, Amsterdam, 49s..
- SINGH, R.P., KHAIT, M., ZUNJARRAO, S.C., KORACH, C.S. and PANDEY, G., 2010. Environmental degradation and durability of epoxy-clay nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*, 2010(6): 1-13.
- SKOURLIS, T.P. and MCCULLOUGH, R.L., 1993. The effect of temperature on the behavior of the interphase in polymeric composites. *Composites Science and Technology*, 49(4): 363-368.
- SLOAN, F.E. and TALBOT, J.B., 1992. Corrosion of graphite-fiber-reinforced composites I-Galvanic coupling damage. *Corrosion*, 48(10): 830-838.
- SPRINGER, G.S., SANDERS, B.A. and TUNG, R.W., 1980. Environmental effects on glass fiber reinforced polyester and vinylester composites. *Journal of Composite Materials*, 14(3): 213-232.
- STRAIT, L.H., KARASEK, M.L. and AMATEAU, M.F., 1992. Effects of seawater immersion on the impact resistance of glass fiber reinforced epoxy composites. *Journal of Composite Materials*, 26(14): 2118-2133.
- STOCCHI, A., PELLICANO, A., ROSSI, J.P., BERNAL, C. and MONTEMARTINI, P., 2006. Physical and water aging of glass fiber-reinforced plastic pipes. *Composite Interfaces*, 13(8-9): 685-697.
- SUH, D.W., KU, M.K., NAM, J.D., KIM, B.S. and YOON, S.C., 2001. Equilibrium water uptake of epoxy/carbon fiber composites in hygrothermal environmental conditions. *Journal of Composite Materials*, 35(3): 264-278.
- SUN, P., ZHAO, Y., LUO, Y. and SUN, L., 2011. Effect of temperature and cyclic hygrothermal aging on the interlaminar shear strength of carbon fiber/bismaleimide (BMI) composite. *Materials & Design*, 32(8): 4341-4347.

- TALREJA, R., 1989. Damage development in composites: mechanisms and modelling. *The Journal of strain analysis for engineering design*, 24(4):215-222.
- TANAKA, K., MINOSHIMA, K., GRELA, W. and KOMAI, K., 2002. Characterization of the aramid/epoxy interfacial properties by means of pull-out test and influence of water absorption. *Composites Science and Technology*, 62(16): 2169-2177.
- TANG, H.C., NGUYEN, T., CHUANG, T.J., CHIN, J., LESKO, J. and WU, H.F. 2000. Fatigue model for fiber-reinforced polymeric composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12(2): 97-104.
- TAUCHERT, T.R., 1991. Thermally induced flexure, buckling, and vibration of plates. *Applied Mechanics Reviews*, 44(8): 347-360.
- TIAN, W. and HODGKIN, J., 2010. Long-term aging in a commercial aerospace composite sample: Chemical and physical changes. *Journal of Applied Polymer Science*, 115(5): 2981-2985.
- TSOTSIS, T.K., 1995. Thermo-oxidative aging of composite materials. *Journal of Composite Materials*, 29(3): 410-422.
- TUCKER, W.C. and BROWN, R., 1989. Moisture absorption of graphite/polymer composites under 2000 feet of seawater. *Journal of Composite Materials*, 23(8): 787-797.
- URL-1 <http://www.dupont.com/products-and-services/fabrics-fibers-nonwovens/fibers/brands/kevlar.html>.
- URL-2 https://www.mathworks.com/matlabcentral/newsreader/view_thread/ Erişilen Tarih: Eylül, 2017.
- URL-3 [Ans2.vm.stuba.sk/html/elem_55/chapter4/ES-181.htm](Ans2.vm.stuba.sk/html/elem_55/chapter4/ES-181.htm)
- VADDADI, P., NAKAMURA, T. and SINGH, R.P., 2003. Transient hygrothermal stresses in fiber reinforced composites: a heterogeneous characterization approach. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(8): 719-730.
- WAN, Y.Z., WANG, Y.L., CHENG, G.X. and HAN, K.Y., 2002. Three-dimensionally braided carbon fiber-epoxy composites, a new type of material for osteosynthesis devices. I. Mechanical properties and moisture absorption behavior. *Journal of Applied Polymer Science*, 85(5): 1031-1039.
- WAN, Y.Z., WANG, Y.L., HUANG, Y., HE, B.M. and HAN, K.Y., 2005. Hygrothermal aging behaviour of VARTMed three-dimensional braided carbon-epoxy composites under external stresses. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(8): 1102-1109.
- WAN, Y.Z., WANG, Y.L., HUANG, Y., LUO, H.L., HE, F. and CHEN, G.C., 2006. Moisture absorption in a three-dimensional braided carbon/Kevlar/epoxy hybrid composite for orthopaedic usage and its influence on mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(9): 1480-1484.
- WANG, S., KOWALIK, D.P. and CHUNG, D.D.L., 2002. Effects of the temperature, humidity, and stress on the interlaminar interface of carbon fibre polymer-matrix composites, studied by contact electrical resistivity measurements. *The Journal of Adhesion*, 78, 189-200.

- WANG, Y. and HAHN, T.H., 2007. AFM characterization of the interfacial properties of carbon fiber reinforced polymer composites subjected to hygrothermal treatments. *Composites science and technology*, 67(1): 92-101.
- WANG, J., LIU, W., LIANG, R., GANGARAO, H. and WAN, L., 2016a. Analytical and experimental study on flexural behavior of pultruded fibre reinforced polymer sheet piles. *Journal of Composite Materials*, 50(24): 3415-3429.
- WANG, J., GANGARAO, H., LIANG, R. and LIU, W., 2016b. Durability and prediction models of fiber-reinforced polymer composites under various environmental conditions: A critical review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(3): 179-211.
- WEITSMAN, Y., 1991. Moisture in composites: sorption and damage. In: *Fatigue of Composite Materials*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 385-429s.
- WICAKSONO, S. and CHAI, G.B., 2013. A review of advances in fatigue and life prediction of fiber-reinforced composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 227(3): 179-195.
- WILLIAMS, C. and SALAWU, O.S., 1997. Damping as a damage indication parameter. In *proceedings of the 15th international modal analysis conference*, 3089: 1531-1536.
- WHITCOMB, J. and TANG, X., 2002. Micromechanics of moisture diffusion in composites with impermeable fibers. *Journal of Composite Materials*, 36(9): 1093-1101.
- WRIGHT, W.W., 1981. The effect of diffusion of water into epoxy resins and their carbon-fibre reinforced composites. *Composites*, 12(3): 201-205.
- WOLFRUM, J., EIBL, S. and LIETCH, L., 2009. Rapid evaluation of long-term thermal degradation of carbon fibre epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 69(3): 523-530.
- WOLFRUM, J., DINNEBIER, H. and KÖRWIEN, T., 2014. Rapid high temperature loads on dry and moist carbon fibre epoxy composite materials. *Journal of Composite Materials*, 48(28): 3513-3520.
- WOO, R.S., CHEN, Y., ZHU, H., LI, J., KIM, J.K. and LEUNG, C.K., 2007. Environmental degradation of epoxy-organoclay nanocomposites due to UV exposure. Part I: Photo-degradation. *Composites Science and Technology*, 67(15): 3448-3456.
- WOOD, C.A. and BRADLEY, W.L., 1997. Determination of the effect of seawater on the interfacial strength of an interlayer E-glass/graphite/epoxy composite by in situ observation of transverse cracking in an environmental SEM. *Composites science and Technology*, 57(8): 1033-1043.
- XIAO, G.Z. and SHANAHAN, M.E.R., 1997. Water absorption and desorption in an epoxy resin with degradation. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 35(16): 2659-2670.
- XIAO, G.Z., DELAMAR, M. and SHANAHAN, M.E.R., 1997. Irreversible interactions between water and DGEBA/DDA epoxy resin during hygrothermal aging. *Journal of Applied Polymer Science*, 65(3): 449-458.
- YU, B., JIANG, Z. and YANG, J., 2015. Long-term moisture effects on the interfacial shear strength between surface treated carbon fiber and epoxy matrix. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 78: 311-317.

- ZAFAR, A., BERTOCCO, F., SCHJØDT-THOMSEN, J. and RAUHE, J.C., 2012. Investigation of the long term effects of moisture on carbon fibre and epoxy matrix composites. *Composites Science and Technology*, 72(6): 656-666.
- ZAI, B.A., PARK, M.K., CHOI, H.S., MEHBOOB, H. and ALI, R., 2009. Effect of moisture absorption on damping and dynamic stiffness of carbon fiber/epoxy composites. *Journal of mechanical science and technology*, 23(11): 2998-3004.
- ZHANG, X., FAN, X., YAN, C., LI, H., ZHU, Y., LI, X. and YU, L., 2012. Interfacial microstructure and properties of carbon fiber composites modified with graphene oxide. *ACS applied materials & interfaces*, 4(3): 1543-1552.
- ZHAO, J., HO, K.K., SHAMSUDDIN, S.R., BISMARCK, A. and DUTSCHK, V., 2012. A comparative study of fibre/matrix interface in glass fibre reinforced polyvinylidene fluoride composites. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, 413: 58-64.
- ZHENG, Q. and MORGAN, R.J., 1993. Synergistic thermal-moisture damage mechanisms of epoxies and their carbon fiber composites. *Journal of Composite Materials*, 27(15): 1465-1478.
- ZHOU, J. and LUCAS, J.P., 1999a. Hygrothermal effects of epoxy resin. Part I: the nature of water in epoxy. *Polymer*, 40(20): 5505-5512.
- ZHOU, J. and LUCAS, J.P., 1999b. Hygrothermal effects of epoxy resin. Part II: variations of glass transition temperature. *Polymer*, 40(20): 5513-5522.
- ZONTA, D., and MODENA, C., 2001. Observations on the appearance of dispersive phenomena in damaged structures. *Journal of sound and vibration*, 241(5): 925-933).

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Ali İhsan KAYA
Uyruğu :T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi :Adıyaman, 1984
Telefon :555 716 1511
Faks :
e-mail :alikaya@adiyaman.edu.tr

EĞİTİM

Derece :Adı, İlçe, İl, Bitirme Yılı
Lise :Adıyaman Erdemir Lisesi, Adıyaman, 2000
Üniversite :Dokuz Eylül Üniversitesi, Bornova, İzmir, 2008
Yüksek Lisans :Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, 2012
Doktora :Harran Üniveristesi, Şanlıurfa, (Devam etmektedir)

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2010/2011	Harran Üniversitesi,	Arş. Gör. (Mühendislik Fakültesi)
2011/2013	Adıyaman Üniversitesi	Makine Müh. (Yapı İşleri)
2013/ -	Adıyaman Üniversitesi	Arş. Gör. (Teknoloji Fakültesi)

YAYINLAR

Proje Görevleri:

1. Kaya A.I., KISA M., 2014. Farklı yaşlandırma koşullarının VDRİT ile üretilen karbon ve aramit kompozitlerin dinamik davranışına etkisi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı: Ali ihsan KAYA, Yürütücü: Murat KISA, (Ulusal)
2. Kaya A.I., KISA M., 2011. Femur Protezinin Sonlu Elemanlar Metodu ile Nümerik Analizi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı: Ali ihsan KAYA, Yürütücü: Murat KISA, (Ulusal)

Eserler

A. Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Kaya A.I., KISA M., and Özen M., 2018. Influence of Natural Weathering Conditions on the Natural Frequency Change of Woven Carbon Fibre Reinforced Composites. *Advanced Composites Letters*, 27(2): 49-54. (Doktora tezinden yapılmıştır)
2. Kaya A.I., KISA M., and Özen M., 2018. Effect of Natural Weathering conditions on the Dynamic Behavior of Woven Aramid Composites. *AIP Conference Proceedings*, 1935 (020005): 1-4. (Doktora tezinden yapılmıştır)
3. Kaya A.I., KISA M., ve Özen M., 2017. Doğal Yaşlandırma Koşullarının Dokunmuş Aramid Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Sönümleme Davranışına Olan Etkisi. *HRÜ Müh. Der.*, 03, p.40-46. (Doktora tezinden yapılmıştır)
4. Kaya A.I., KISA M., ve Özen M., Hakem Aşamasında. Dokunmuş Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Sönümleme Davranışının Çevresel Koşullar Altında Değişimi. *HRÜ Müh. Der.*, (Doktora tezinden yapılmıştır)

B. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:

1. Kaya A.I., KISA M., Aslan Z., and Özen M., 2017. Effect of Natural Weathering conditions on the Dynamic Behavior of Woven Aramid Composites. *33rd International Physics Congress*, 6-10 September, Bodrum, p. 164. (Doktora tezinden yapılmıştır)
2. Kaya A.I., KISA M., ve Özen M., 2018. Dokunmuş Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Sönümleme Davranışının Çevresel Koşullar Altında Değişimi. *VI. Uluslararası GAP Mühendislik Kongresi*, 23-25 Ekim, Şanlıurfa, p. (Doktora tezinden yapılmıştır)

3. Aslan Z., Kısa M., Özen M., ve Kaya A.I., (2016). Çevresel Faktörlerin Kompozit Malzemenin Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkileri. 16. International Conference on Natural Science and Engineering, Kilis, p. 1-11.
4. Kaya, A.I., Kısa, M., ve Aslan, Z., 2014. Femur Protezinin Farklı Tasarım Parametreleri Göz Önünde Bulundurularak CoCrMo ve Ti6Al4V Biyomalzemeler için Sonlu Elemanlar Metoduyla Yorulma Analizi. 15. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, Denizli, p. 733-741.
5. Kaya, A.I., Kısa, M., ve Aslan, Z., 2014. Femur Protezinin Farklı Tasarım Parametreleri Göz Önünde Bulundurularak Sonlu Elemanlar Metoduyla Nümerik Analizi, 10. Uluslararası Kırılma Konferansı, Kayseri, p. 259-271.
6. Kısa M., Haskul M., Kaya A.I., Aslan Z., 2014. Çatlak içeren ve Kalınlığı Doğrusal Değişen Kirişlerde Titreşim Probleminin Sonlu Elemanlar Metoduyla Modellenmesi, 10. Uluslararası Kırılma Konferansı, Kayseri, p. 79-85.
7. Aslan, Z., Kısa, M., ve Kaya, A.I., 2014. Eksenel Yüklü Dairesel Kesitli Kusurlu Kirişlerin Stabilite ve Titreşim Davranışlarının Sayısal Analizi, 10. Uluslararası Kırılma Konferansı, Kayseri, p. 315-326.
8. Kaya, A.I., Baran MF., Erdoğan, O., ve Gökdoğan O., 2018. Composite Material Utilization in Agricultural Machinery and Equipment, I. International Agricultural Science Congress, Van, p. 113.

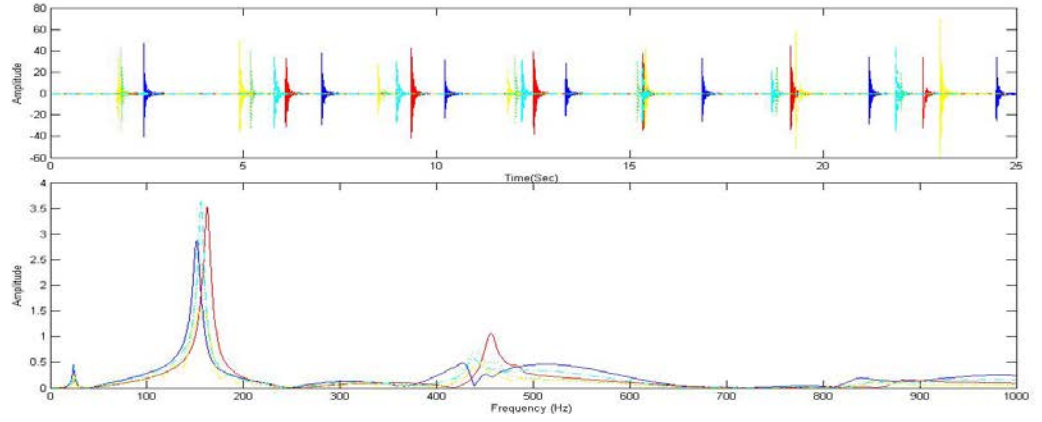
C. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

D. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:

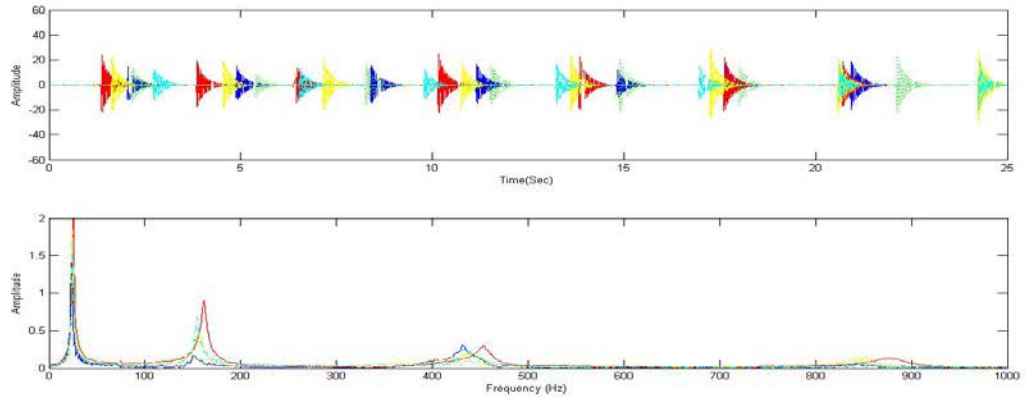
1. Kaya A.I., Kısa M., ve Aslan Z., 2015. Femur Protezinin Farklı Tasarım Parametreleri Göz Önünde Bulundurularak Ti6Al4V Biyomalzeme için Sonlu Elemanlar Metoduyla Nümerik Analizi. II. Adıyaman Üniversitesi Bilim, Kültür ve Sanat Sempozyumu. Adıyaman, p.

EKLER

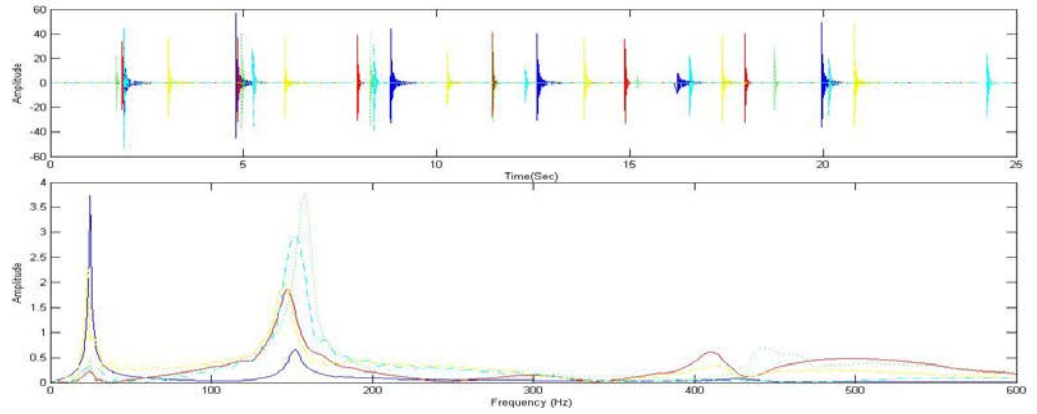
EK 1 Titreşim analiz sonuçları



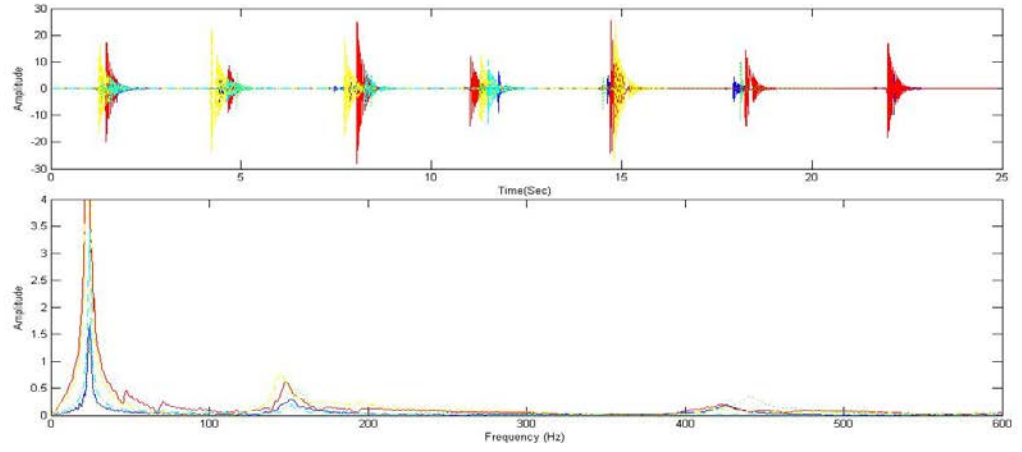
Şekil Ek1.1 Çekiç ile uyarılan Suda 3 ay yaşlandırılmış aramid numunelere ait genel FFT grafiği



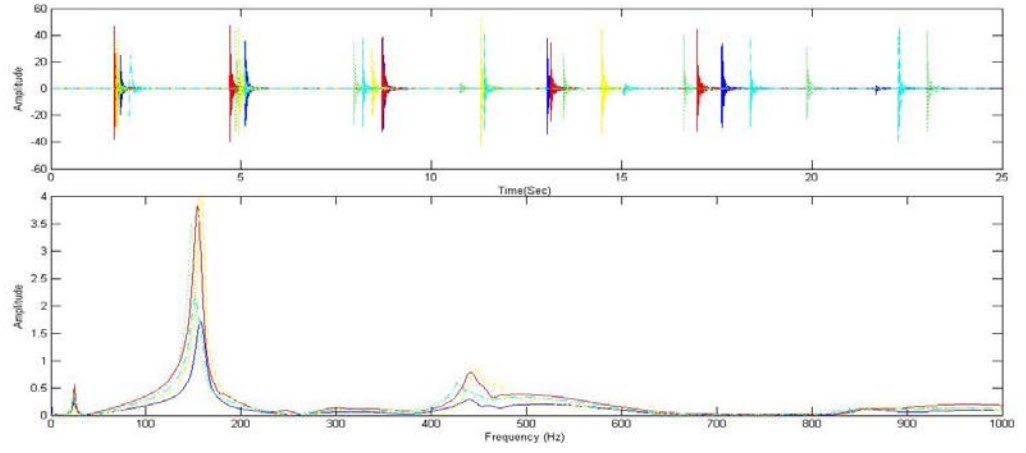
Şekil Ek1.2 El ile uyarılan Suda 3 ay yaşlandırılmış aramid numunelere ait genel FFT grafiği



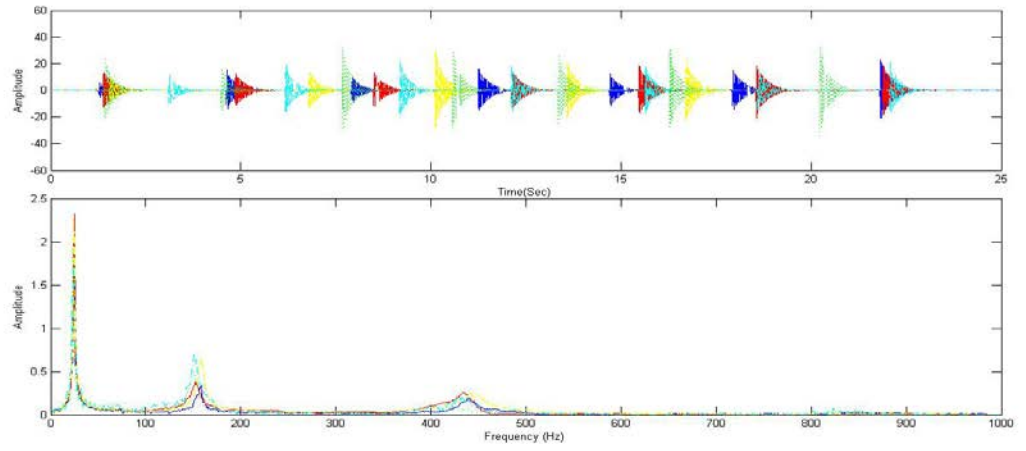
Şekil Ek1.3 Çekiç ile uyarılan Güneşte 3 ay yaşlandırılmış bütün numunelere ait genel FFT grafiği



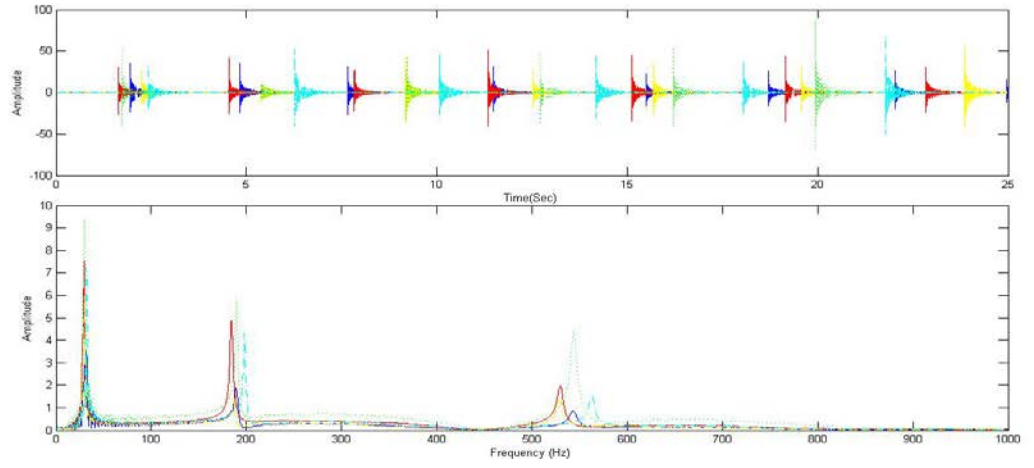
Şekil Ek1.4 El ile uyarılan Güneşte 3 ay yaşlandırılmış aramid numunelere ait genel FFT grafiği



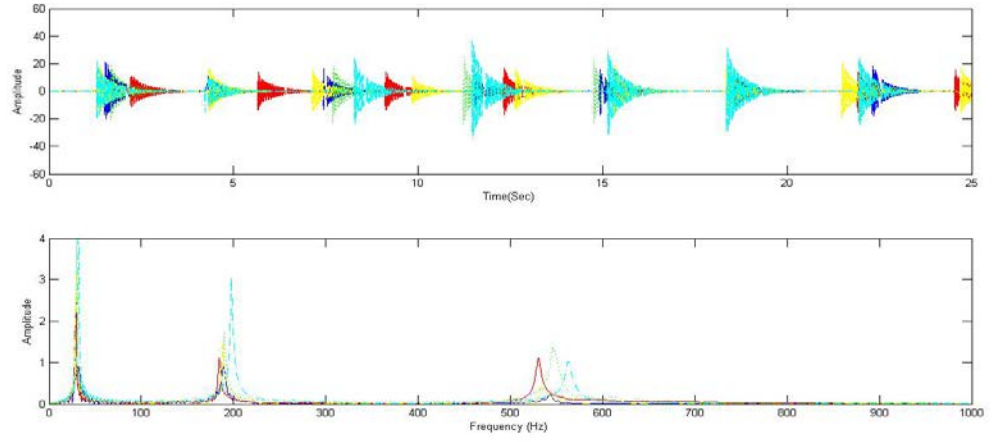
Şekil Ek1.5 Çekiç ile uyarılan Toprakta 3 ay yaşlandırılmış aramid numunelere ait genel FFT grafiği



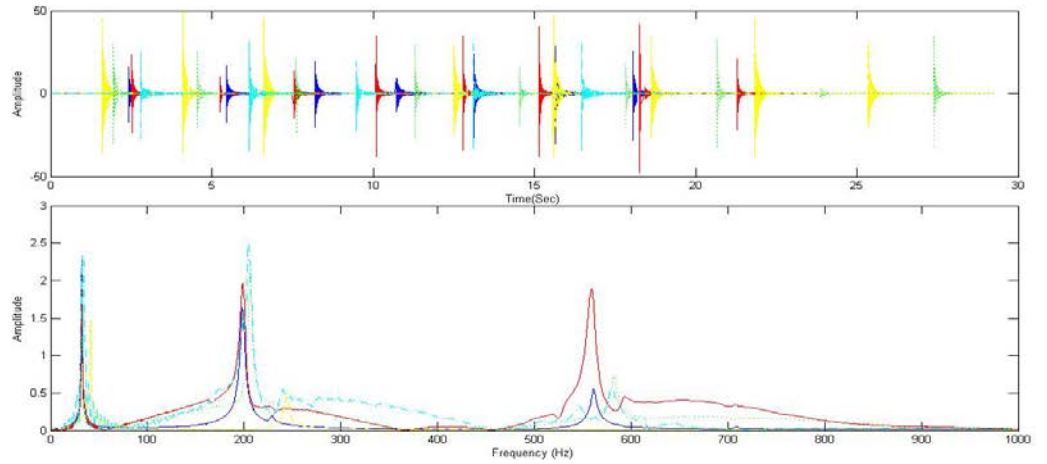
Şekil Ek1.6 El ile uyarılan Toprakta 3 ay yaşlandırılmış aramid numunelere ait genel FFT grafiği



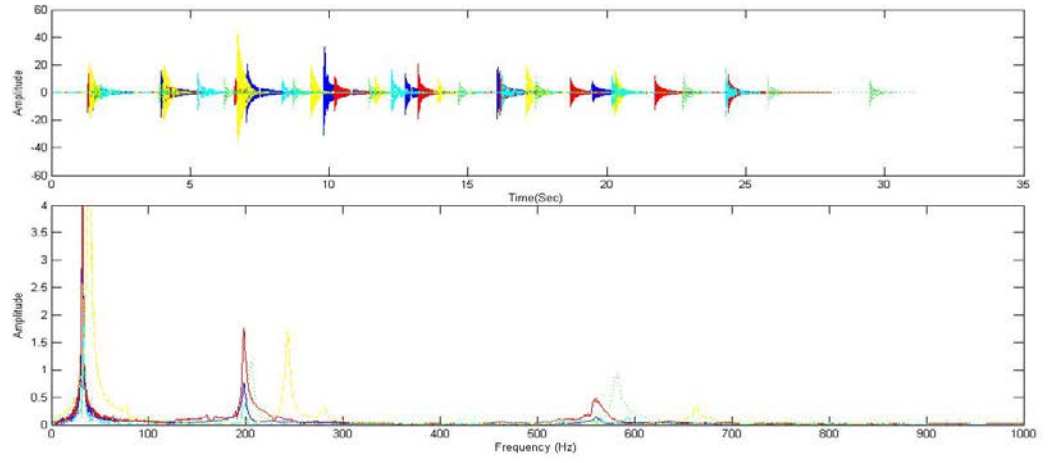
Şekil Ek1.7 Çekiş ile uyarılan Suda 3 ay yaşlandırılmış karbon numuneleri genel FFT grafiği



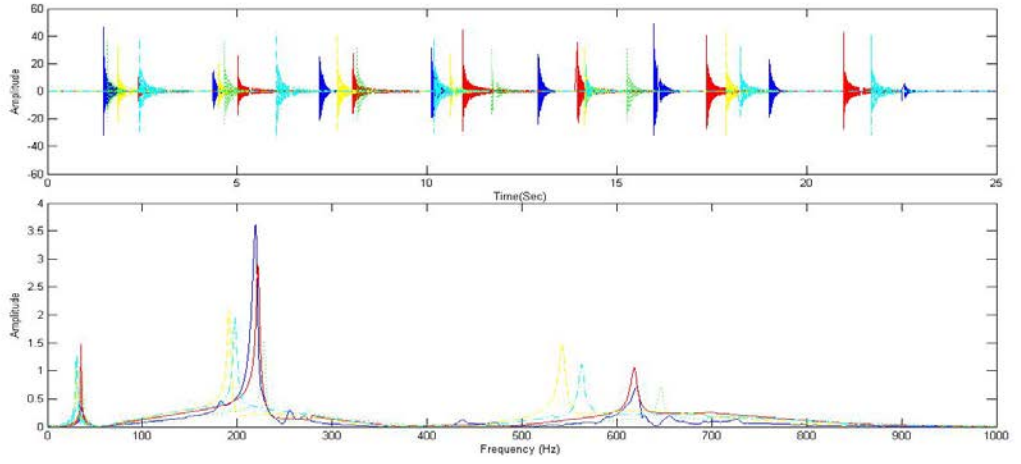
Şekil Ek1.8 El ile uyarılan Suda 3 ay yaşlandırılmış karbon numuneleri genel FFT grafiği



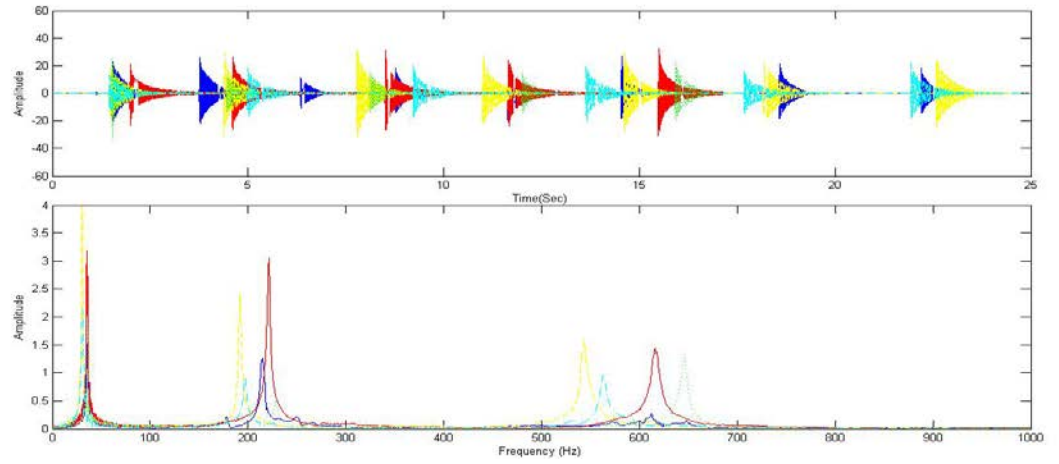
Şekil Ek1.9 Çekiş ile uyarılan Güneşte 3 ay yaşlandırılmış karbon numuneleri genel FFT grafiği



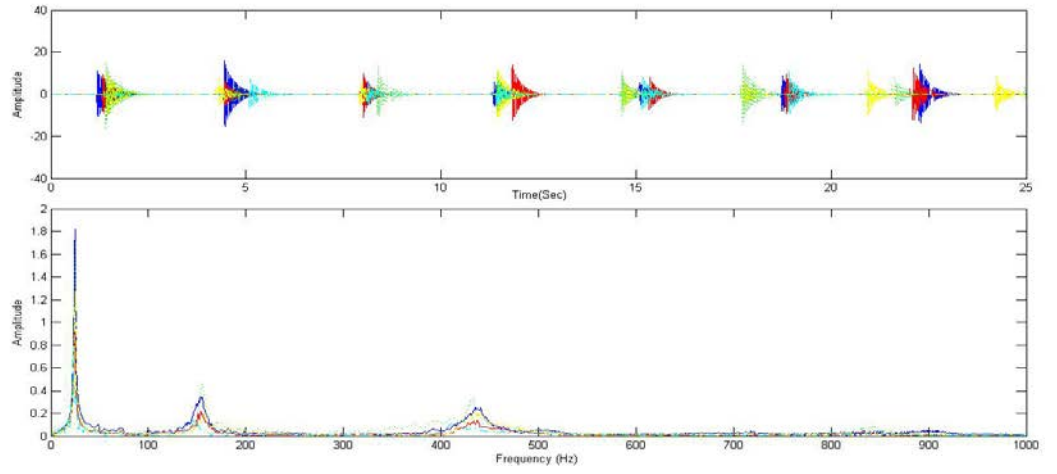
Şekil Ek1.10 El ile uyarılan Güneşte 3 ay yaşlandırılmış karbon numuneleri genel FFT grafiği



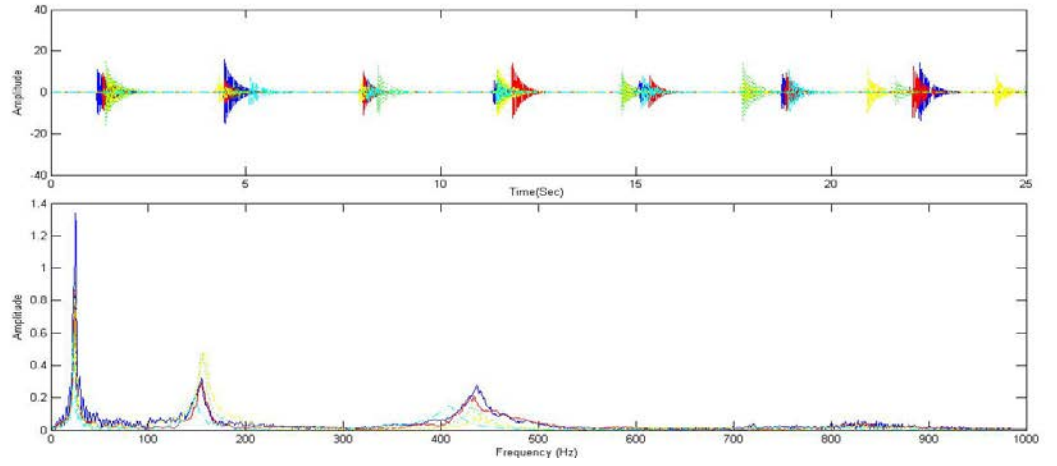
Şekil Ek1.11 Çekiç ile uyarılan Toprakta 3 ay yaşlandırılmış karbon numuneleri genel FFT grafiği



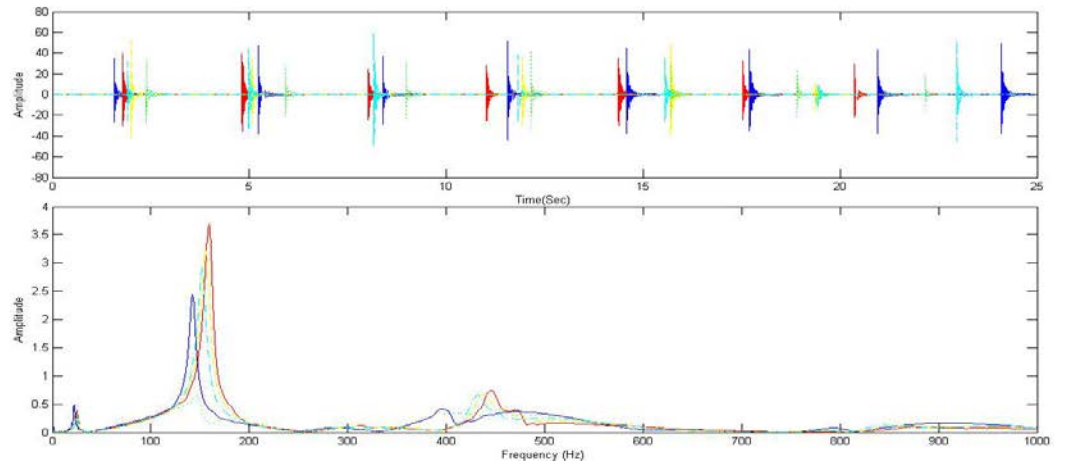
Şekil Ek1.12 El ile uyarılan Toprakta 3 ay yaşlandırılmış karbon numuneleri genel FFT grafiği



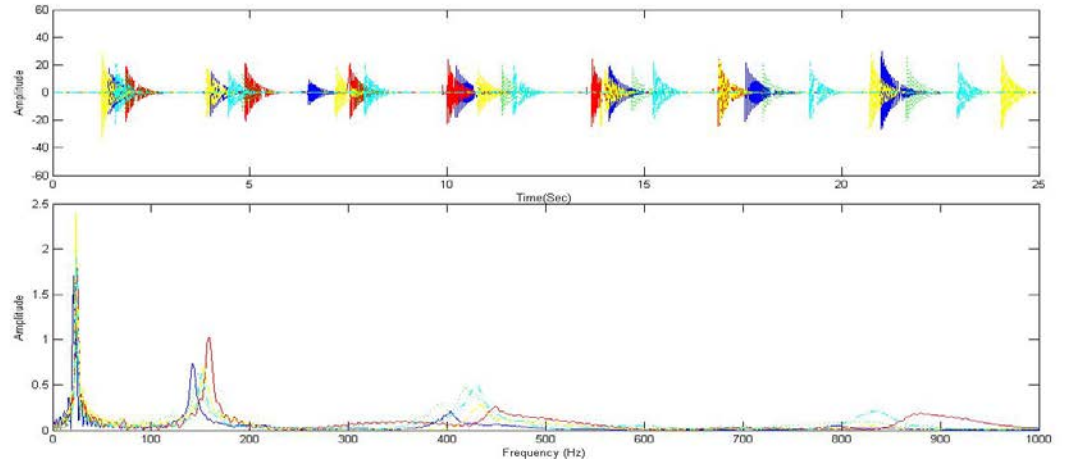
Şekil Ek1.13 Çekiç ile uyarılan Suda 6 ay yaşlandırılmış aramid numuneler genel FFT grafiği



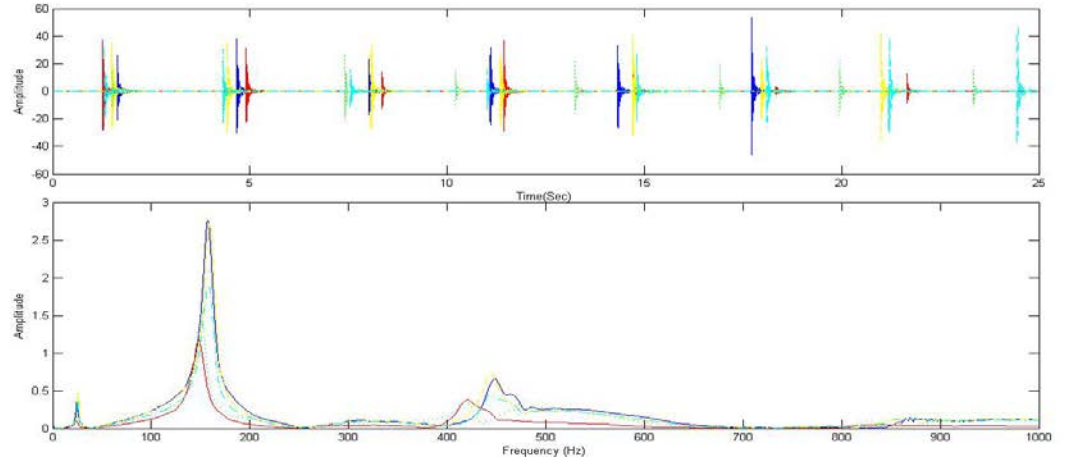
Şekil Ek1.14 El ile uyarılan Suda 6 ay yaşlandırılmış aramid numuneleri genel FFT grafiği



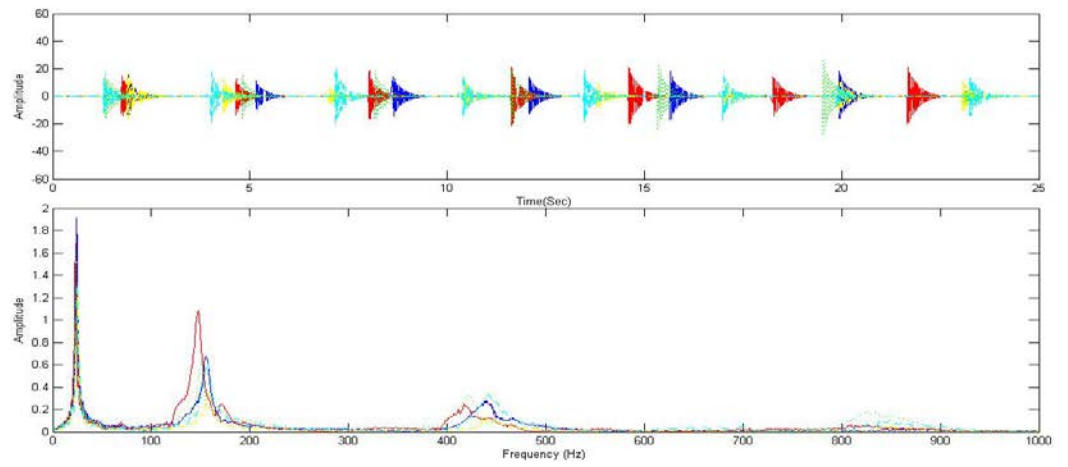
Şekil Ek1.15 Çekiç ile uyarılan Güneşte 6 ay yaşlandırılmış aramid numuneleri genel FFT grafiği



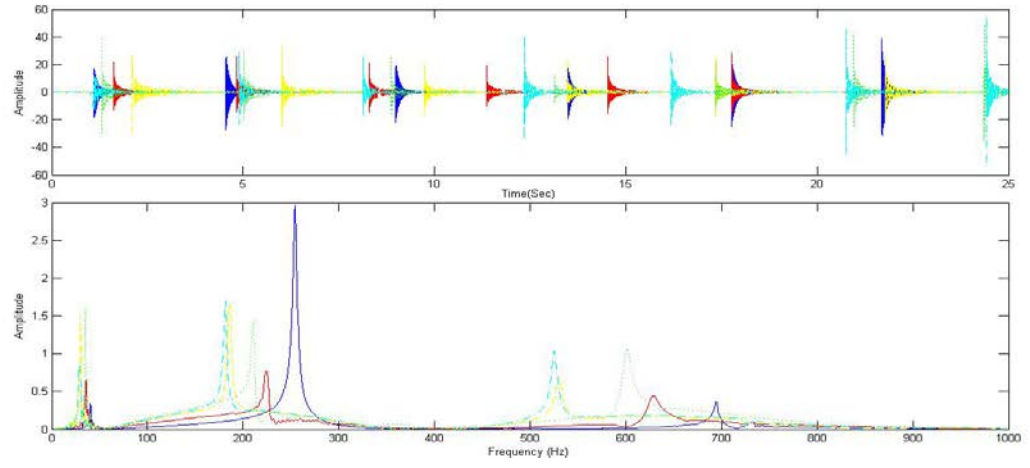
Şekil Ek1.16 El ile uyarılan Güneşte 6 ay yaşlandırılmış aramid numuneleri genel FFT grafiği



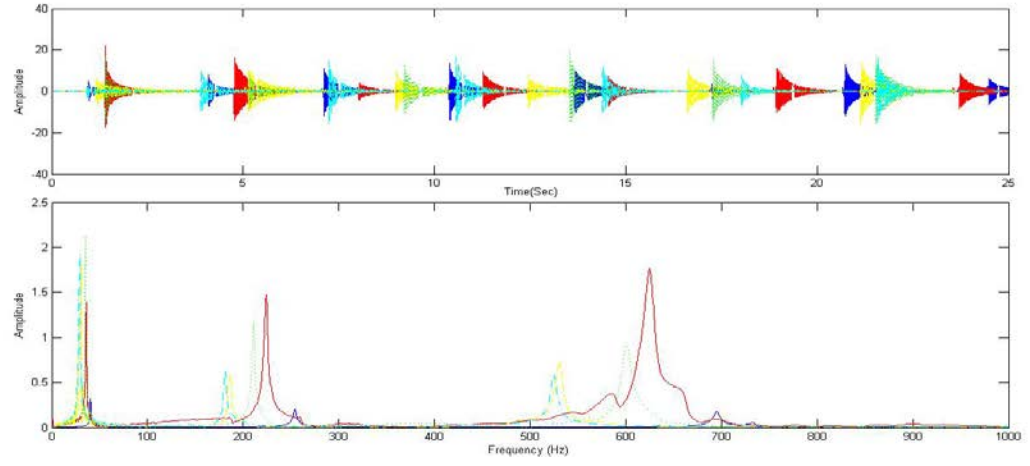
Şekil Ek1.17 Çekiç ile uyarılan Toprakta 6 ay yaşlandırılmış aramid numuneleri genel FFT grafiği



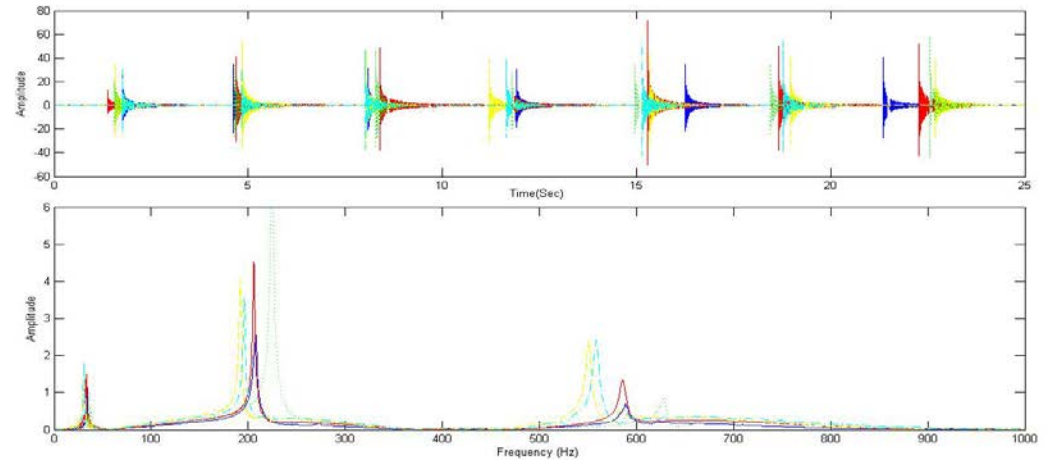
Şekil Ek1.18 El ile uyarılan Toprakta 6 ay yaşlandırılmış aramid numuneleri genel FFT grafiği



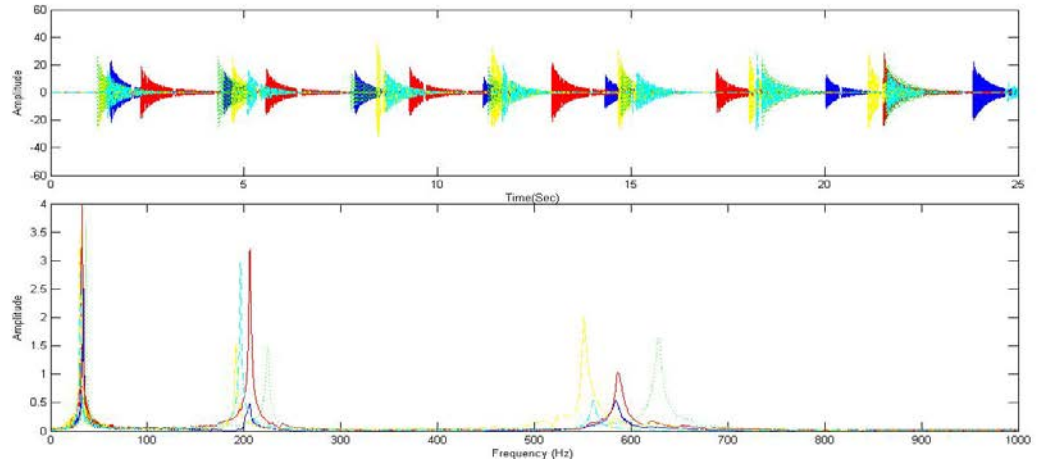
Şekil Ek1.19 Çekiş ile uyarılan Suda 6 ay yaşlandırılmış karbon numuneleri genel FFT grafiği



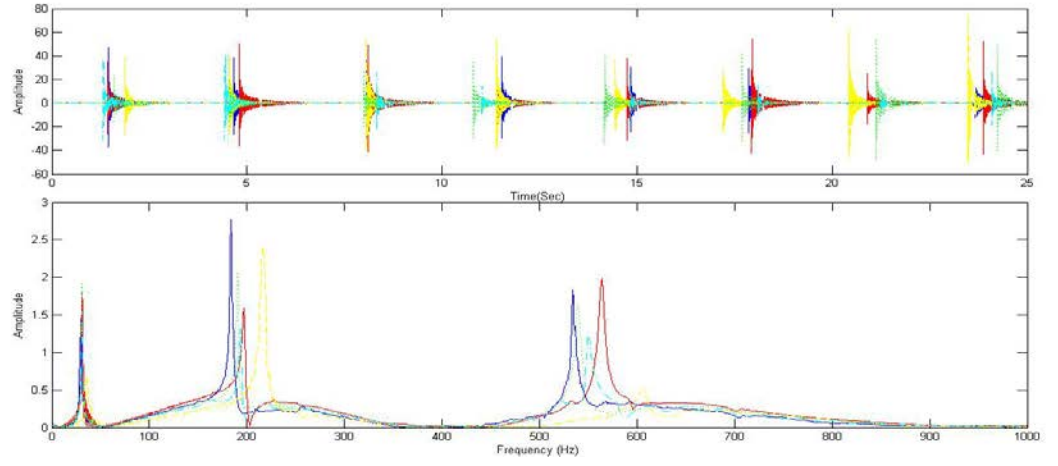
Şekil Ek1.20 El ile uyarılan Suda 6 ay yaşlandırılmış karbon numuneleri genel FFT grafiği



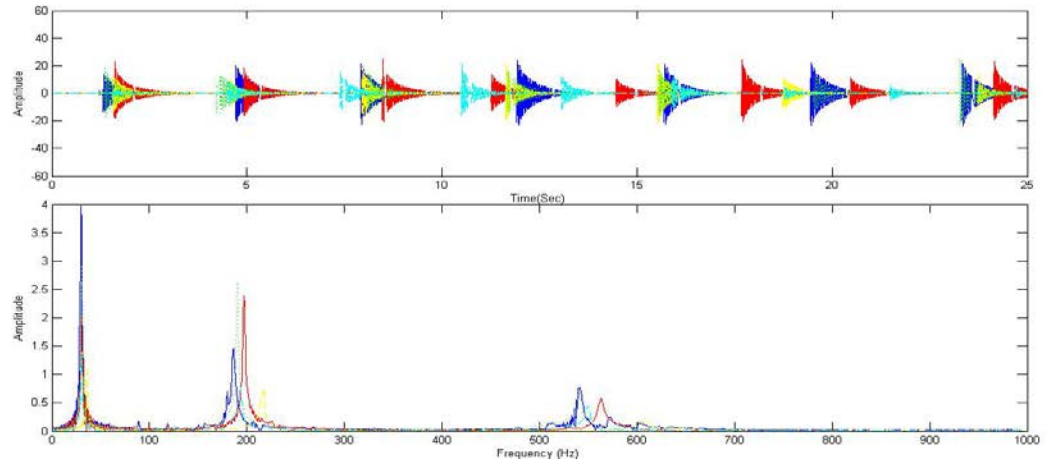
Şekil Ek1.21 Çekiş ile uyarılan Güneşte 6 ay yaşlandırılmış karbon numuneleri genel FFT grafiği



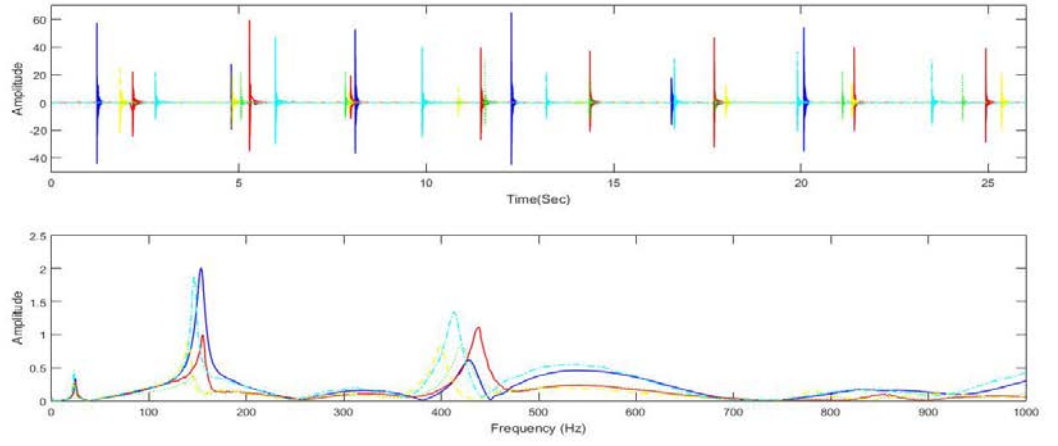
Şekil Ek1.22 El ile uyarılan Güneşte 6 ay yaşlandırılmış karbon numuneleri genel FFT grafiği



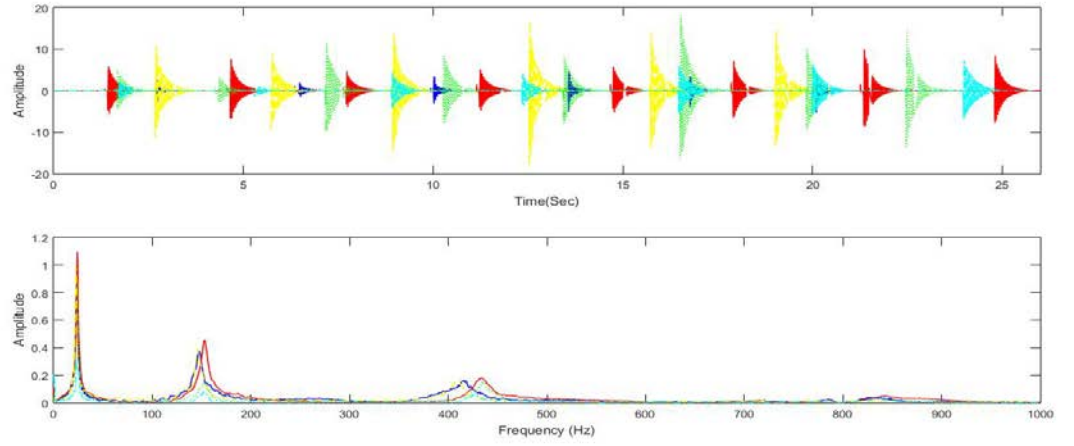
Şekil Ek1.23 Çekiç ile uyarılan Toprakta 6 ay yaşlandırılmış karbon numuneleri genel FFT grafiği



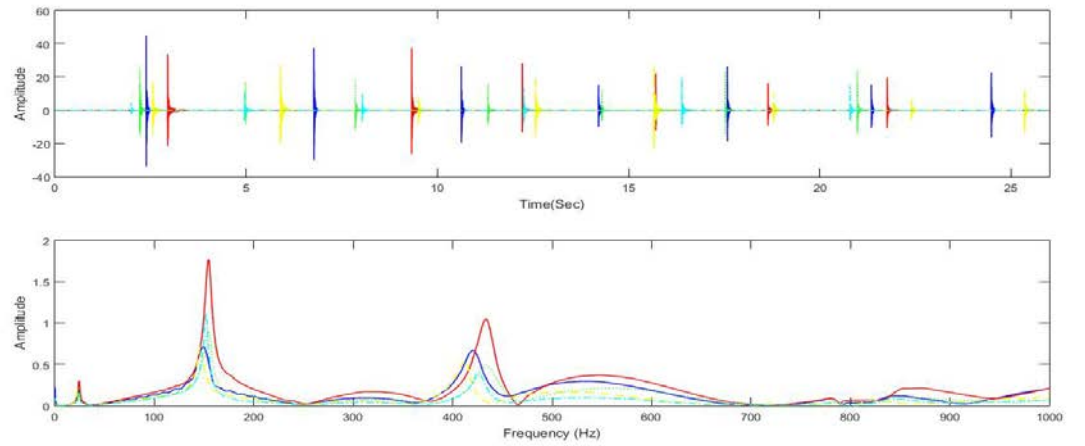
Şekil Ek1.24 El ile uyarılan Toprakta 6 ay yaşlandırılmış karbon numuneleri genel FFT grafiği



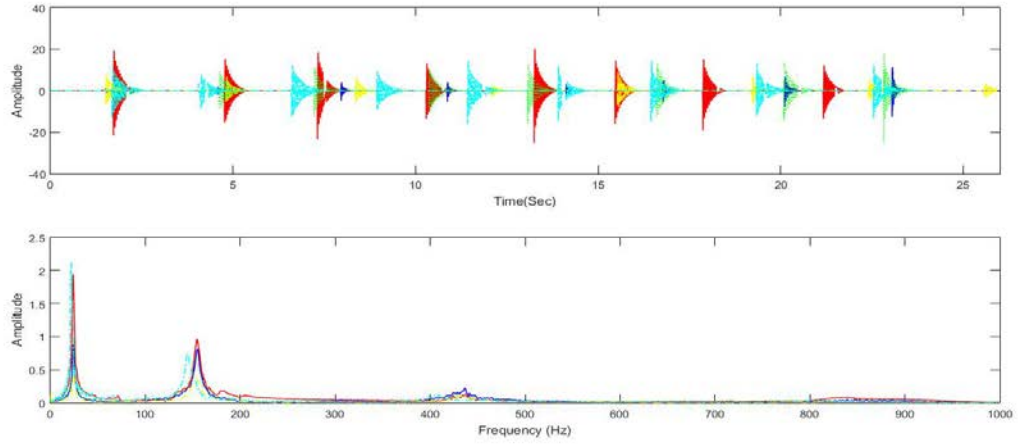
Şekil Ek1.25 Güneşte 9 ay yaşlandırılmış çekiç ile uyarılan aramid numuneleri genel FFT grafiği



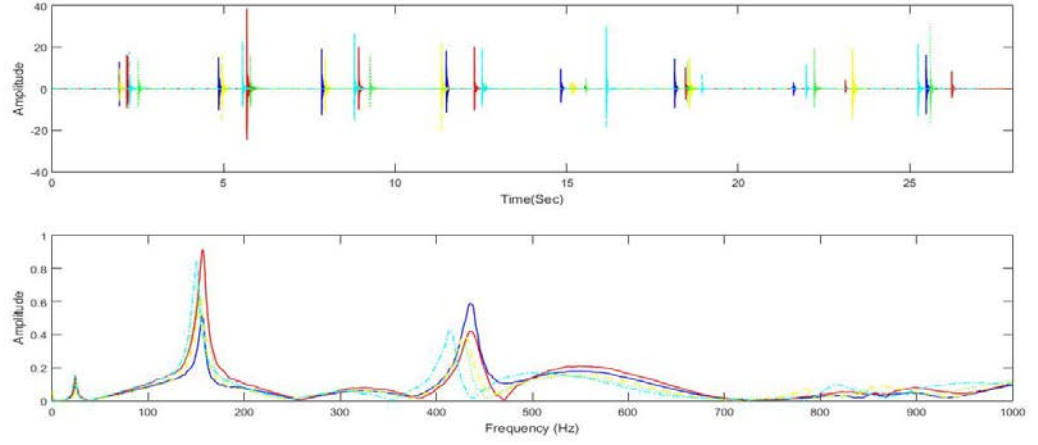
Şekil Ek1.26 Güneşte 9 ay yaşlandırılmış el ile uyarılan aramid numuneleri genel FFT grafiği



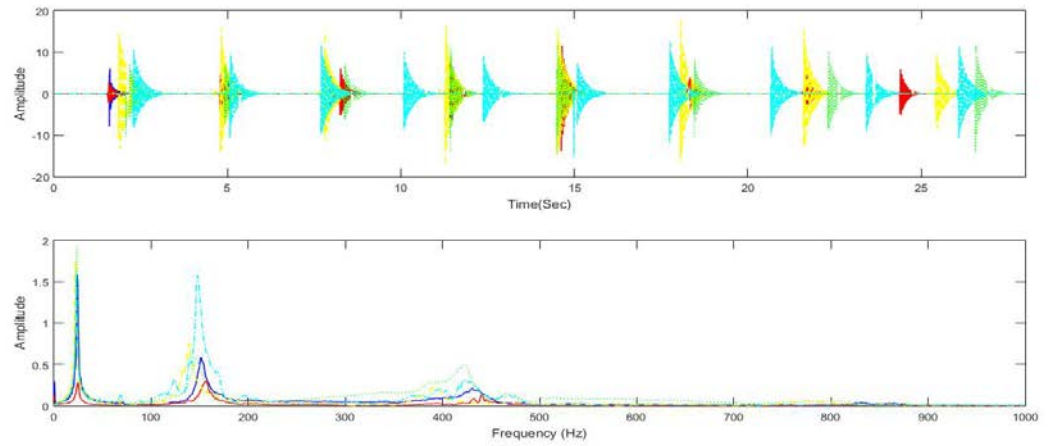
Şekil Ek1.27 Suda 9 ay yaşlandırılmış çekiç ile uyarılan aramid numuneleri genel FFT grafiği



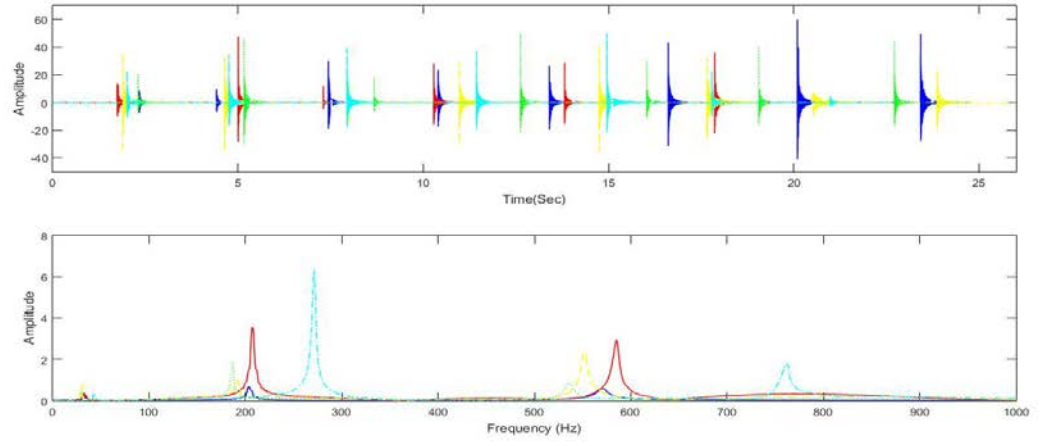
Şekil Ek1.28 Suda 9 ay yaşlandırılmış el ile uyarılan aramid numuneleri genel FFT grafiği



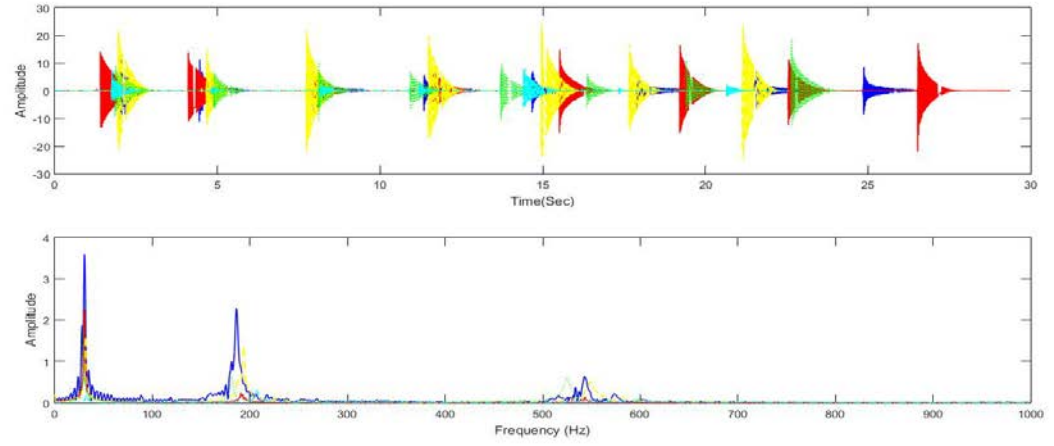
Şekil Ek1.29 Toprakta 9 ay yaşlandırılmış çekiş ile uyarılan aramid numuneleri genel FFT grafiği



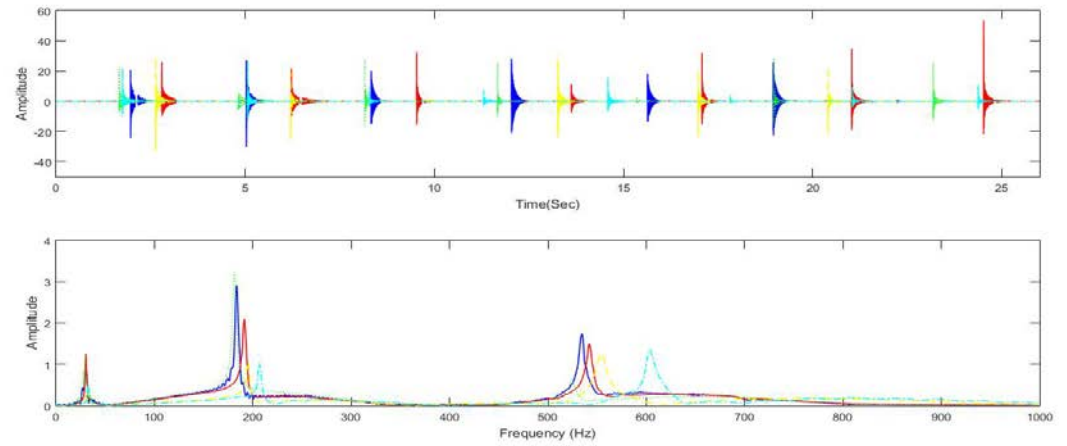
Şekil Ek1.30 Toprakta 9 ay yaşlandırılmış el ile uyarılan aramid numuneleri genel FFT grafiği



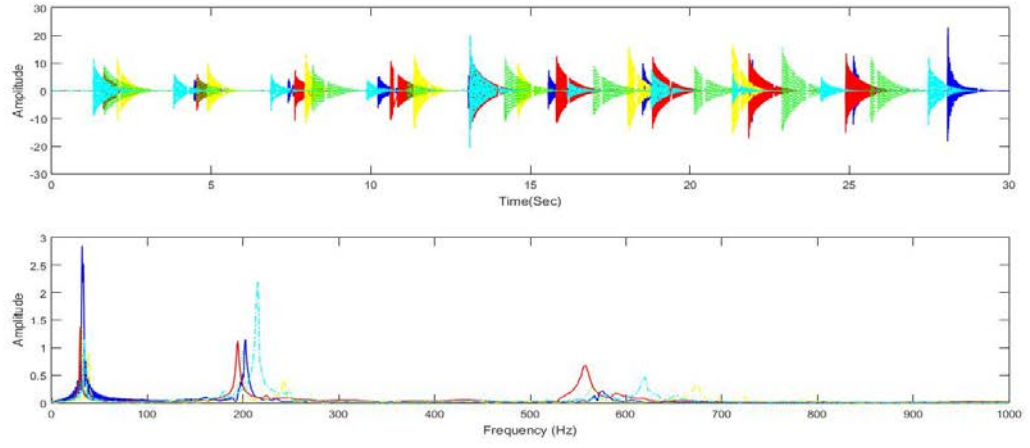
Şekil Ek1.31 Güneşte 9 ay yaşlandırılmış çekiç ile uyarılan karbon numuneleri genel FFT grafiği



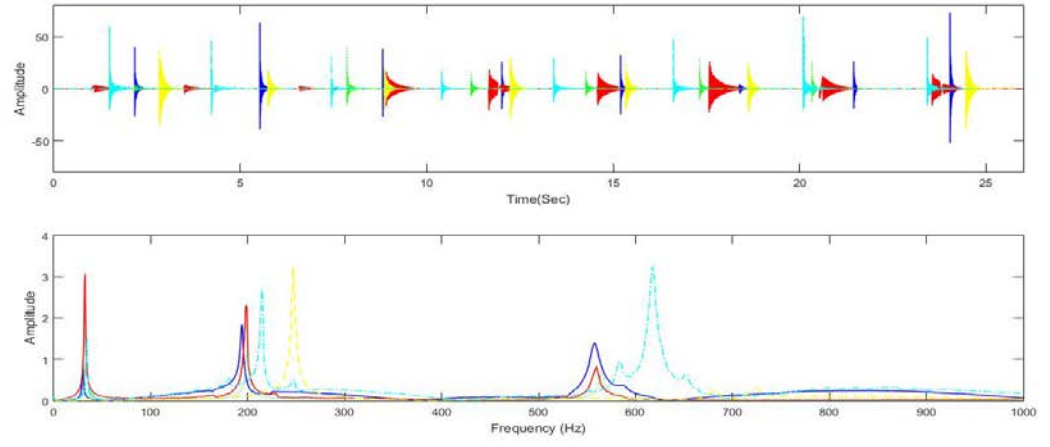
Şekil Ek1.32 Güneşte 9 ay yaşlandırılmış el ile uyarılan karbon numuneleri genel FFT grafiği



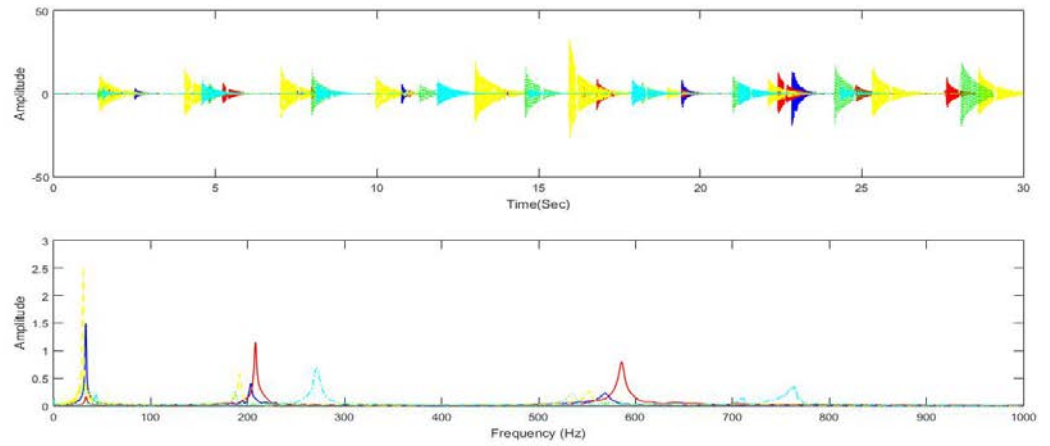
Şekil Ek1.33 Suda 9 ay yaşlandırılmış çekiç ile uyarılan karbon numuneleri genel FFT grafiği



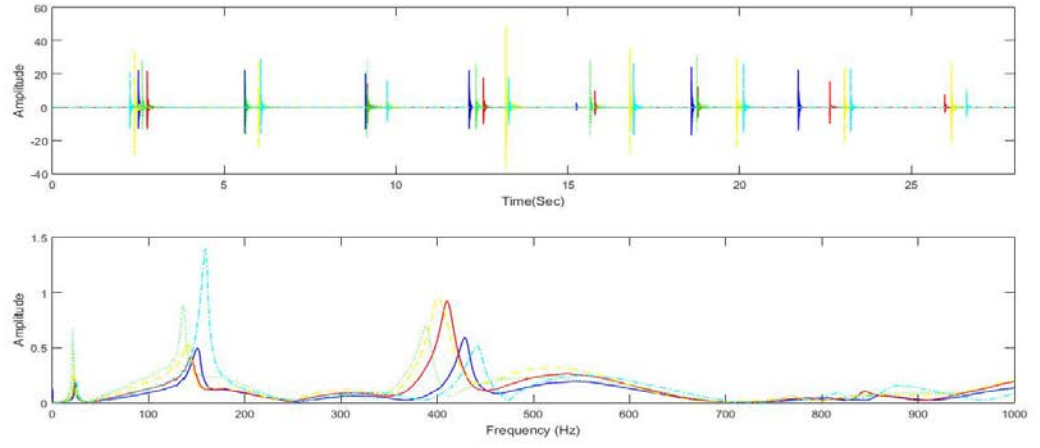
Şekil Ek1.34 Suda 9 ay yaşlandırılmış el ile uyarılan karbon numuneleri genel FFT grafiği



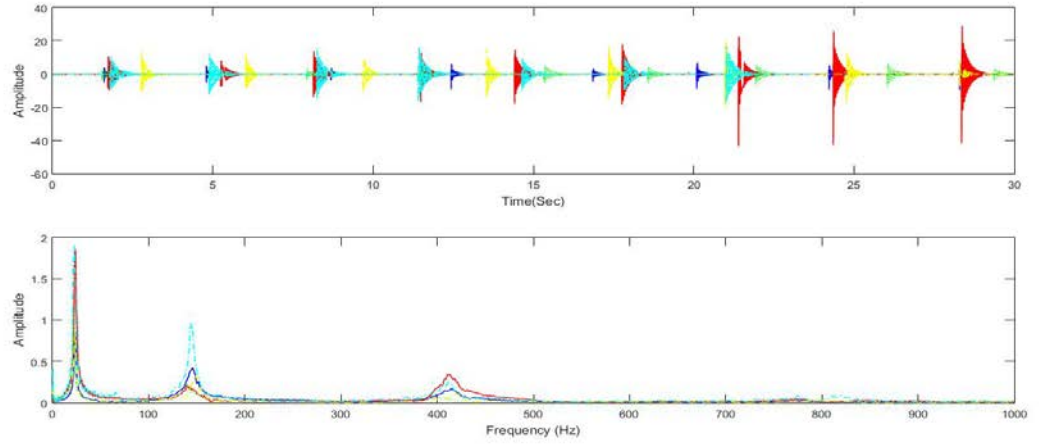
Şekil Ek1.35 Toprakta 9 ay yaşlandırılmış çekiç ile uyarılan karbon numuneleri genel FFT grafiği



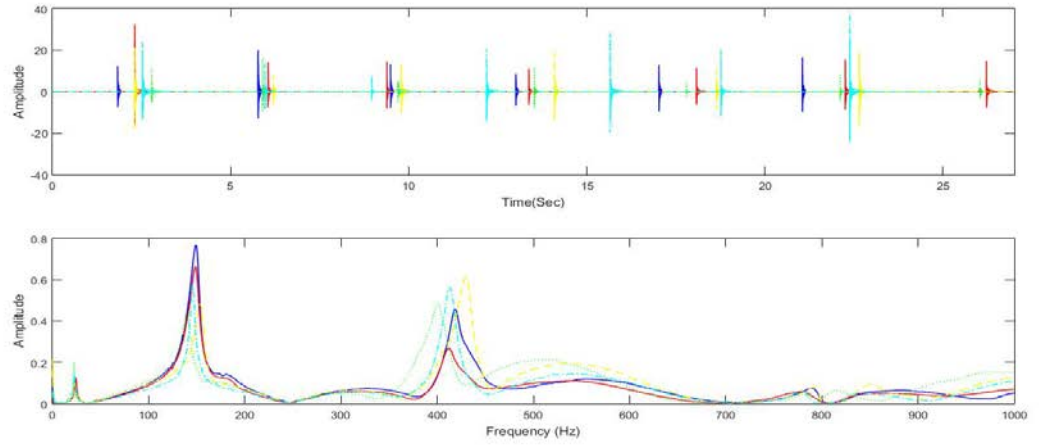
Şekil Ek1.36 Toprakta 9 ay yaşlandırılmış el ile uyarılan karbon numuneleri genel FFT grafiği



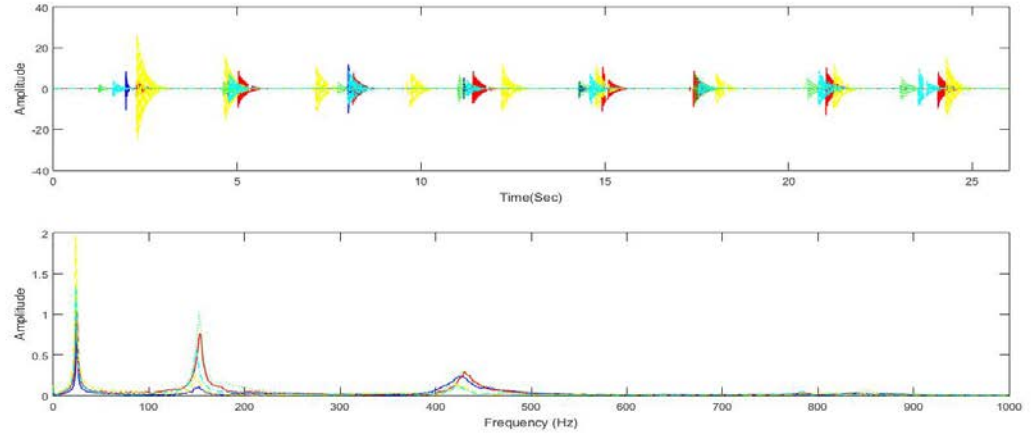
Şekil Ek1.37 Güneşte 12 ay yaşlandırılmış çekiç ile uyarılan aramid numuneleri genel FFT grafiği



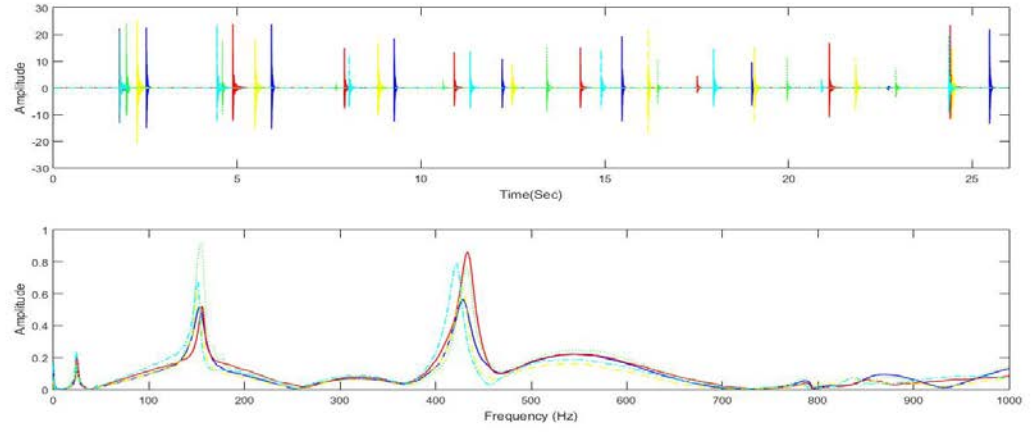
Şekil Ek1.38 Güneşte 12 ay yaşlandırılmış el uyarılan aramid numuneleri genel FFT grafiği



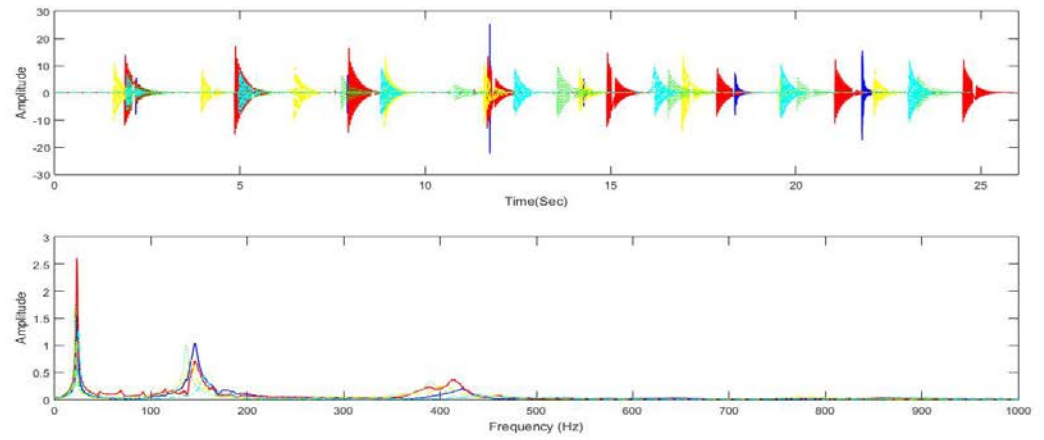
Şekil Ek1.39 Suda 12 ay yaşlandırılmış çekiç ile uyarılan aramid numuneleri genel FFT grafiği



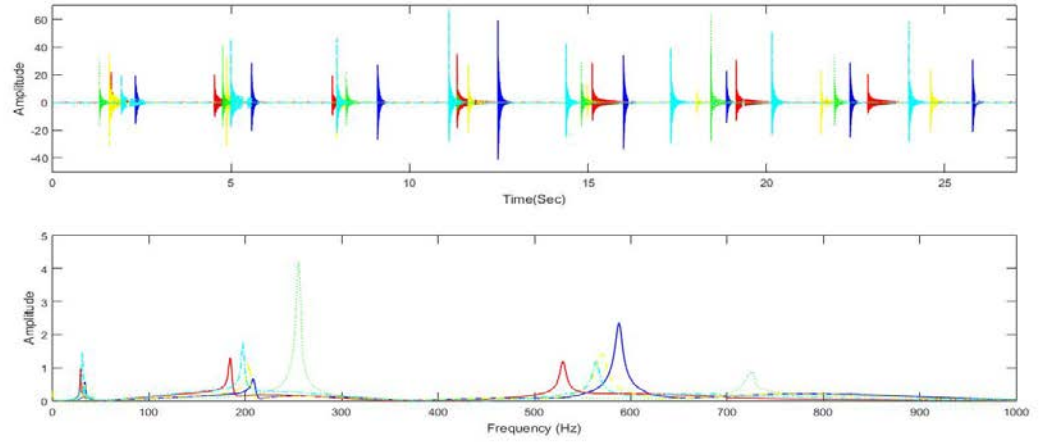
Şekil Ek1.40 Suda 12 ay yaşlandırılmış el ile uyarılan aramid numuneleri genel FFT grafiği



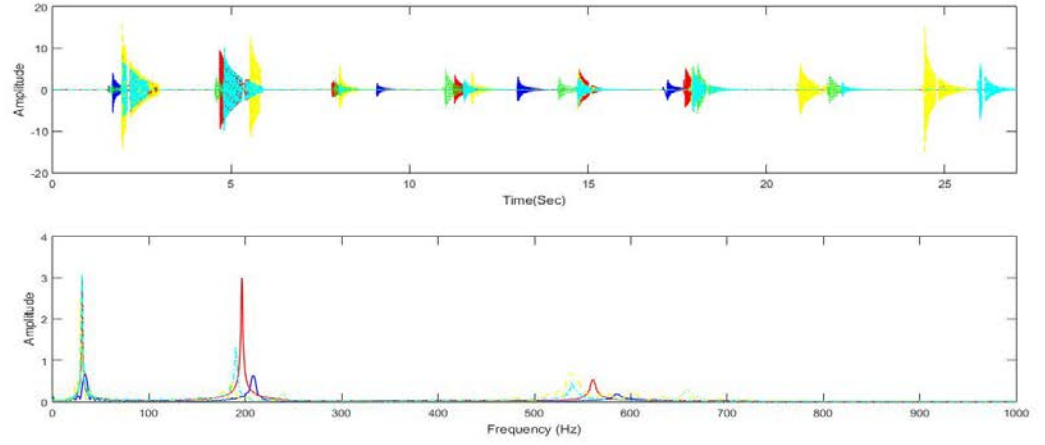
Şekil Ek1.41 Toprakta 12 ay yaşlandırılmış çekiç ile uyarılan aramid numuneleri genel FFT grafiği



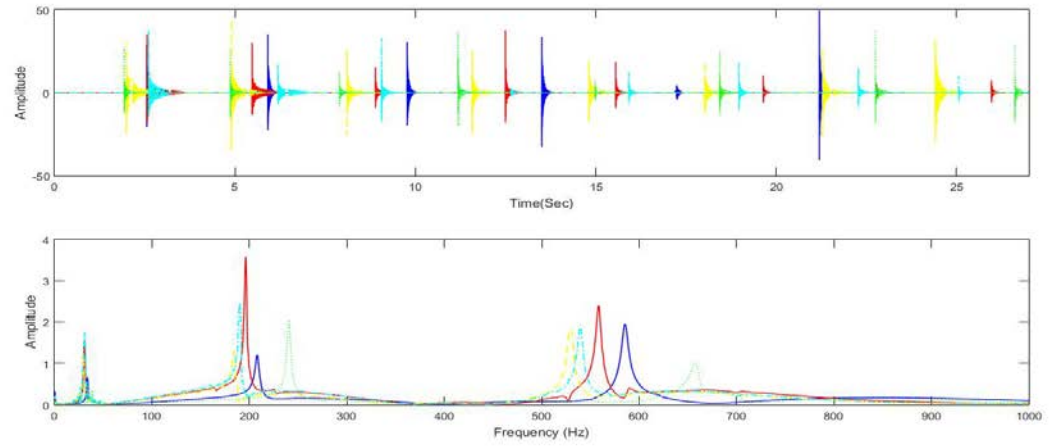
Şekil Ek1.42 Toprakta 12 ay yaşlandırılmış el ile uyarılan aramid numuneleri genel FFT grafiği



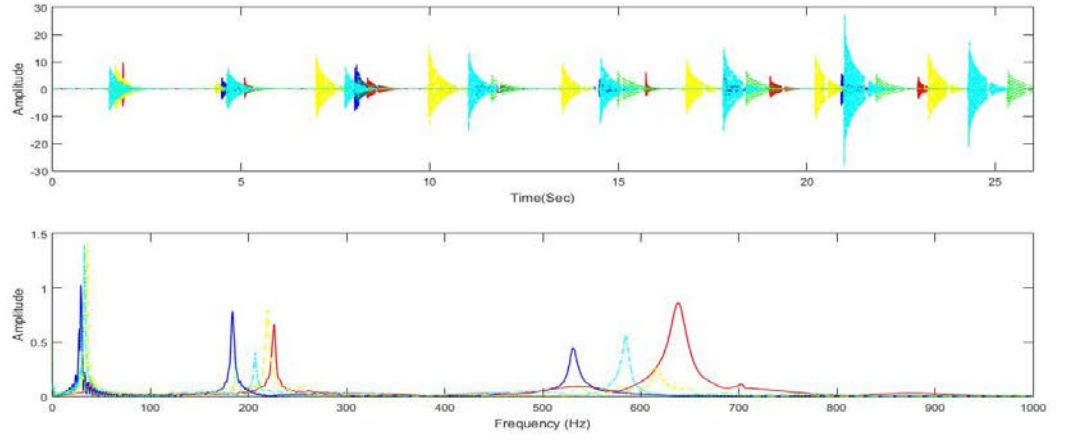
Şekil Ek1.43 Güneşte 12 ay yaşlandırılmış çekiç ile uyarılan karbon numuneleri genel FFT grafiği



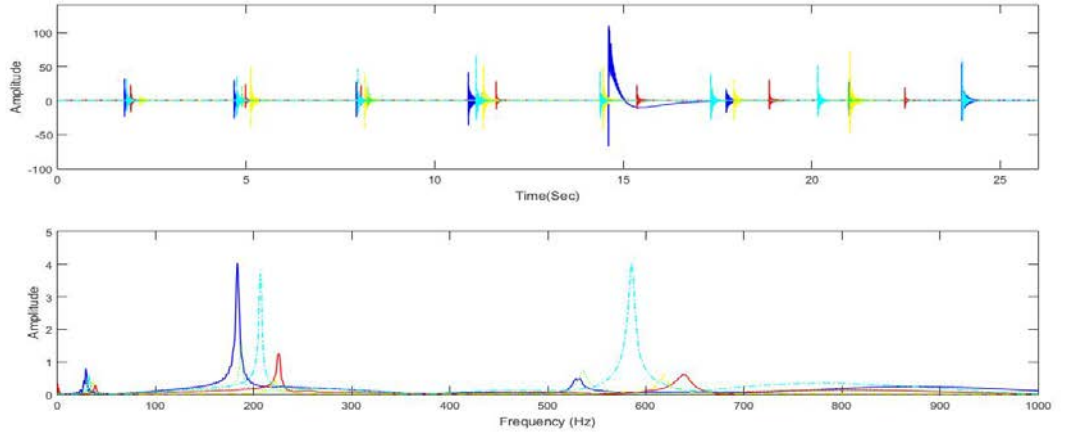
Şekil Ek1.44 Güneşte 12 ay yaşlandırılmış el ile uyarılan karbon numuneleri genel FFT grafiği



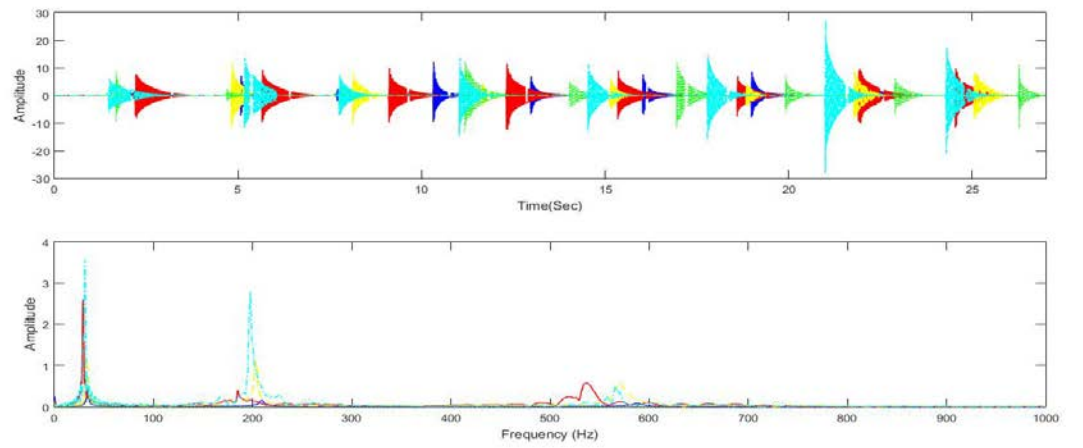
Şekil Ek1.45 Suda 12 ay yaşlandırılmış çekiç ile uyarılan karbon numuneleri genel FFT grafiği



Şekil Ek1.46 Suda 12 ay yaşlandırılmış el ile uyarılan karbon numuneleri genel FFT grafiği



Şekil Ek1.47 Toprakta 12 ay yaşlandırılmış çekiç ile uyarılan karbon numuneleri genel FFT grafiği



Şekil Ek1.48 Toprakta 12 ay yaşlandırılmış el ile uyarılan karbon numuneleri genel FFT grafiği

EK 2 Matlab programı

- Kompozit numunelerin doğal frekans analizinde kullanılan temel program:

```
clc;clear
% Bu program, bir sinyalin Fourier dönüşümünü hesaplar

fs=4000;    %Frekans
dt=1/4000;  %Çözünürlük
z1=load('C:\Dosya_konumu\Analiz_dosyası.txt');
zaman_bas=7; %analiz başlangıç saniyesi
zaman_bit=9; %analiz bitiş saniye

sbas=zaman_bas*fs;
sbit=zaman_bit*fs;

tm=z1(:,1);
a0=z1(:,2);
a1=z1(:,3);
a2=z1(:,4);
a3=z1(:,5);

subplot(5,1,1)
plot(tm,a3); %İvmemetre seçimi
xlabel('Time(Sec)')
ylabel('Amplitude')

display
('=====')

a0=a0(sbas:sbit,1);
a1=a1(sbas:sbit,1);
a2=a2(sbas:sbit,1);
a3=a3(sbas:sbit,1);

%Titreşim sinyalinin FFT'si
nfft=512*256;
f_fft_a0=abs(fft(a0,nfft))*dt*2*pi;
wf=(0:(nfft/2-1))/(nfft/2)*(fs/2);
f_fft_a0=f_fft_a0(1:length(f_fft_a0)/2);

f_fft_a1=abs(fft(a1,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a1=f_fft_a1(1:length(f_fft_a1)/2);

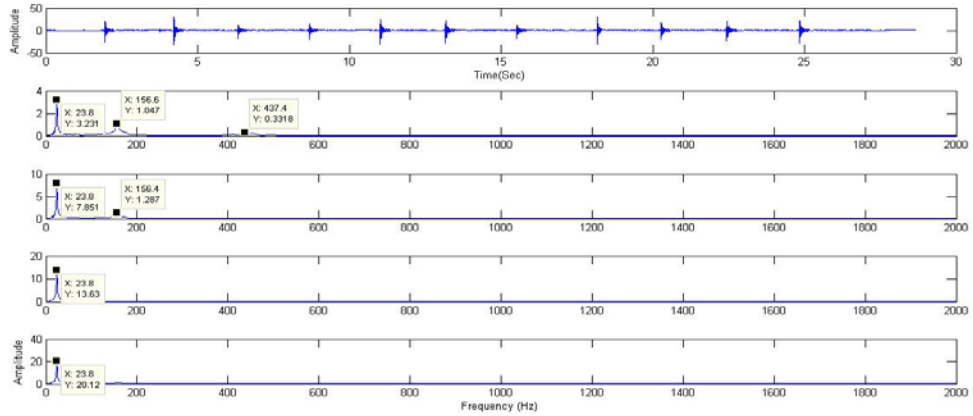
f_fft_a2=abs(fft(a2,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a2=f_fft_a2(1:length(f_fft_a2)/2);
```

```
f_fft_a3=abs(fft(a3,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a3=f_fft_a3(1:length(f_fft_a3)/2);
```

```
fmin=0; %x eksenindeki minumum frekans (Hz)
fmax=1000; %x eksenindeki maxiumum frekans (Hz)
```

```
subplot(5,1,2)
plot(wf,f_fft_a0) % #1 numaralı ivmemetrenin frekans spektrumu
subplot(5,1,3)
plot(wf,f_fft_a1) % #2 numaralı ivmemetrenin frekans spektrumu
subplot(5,1,4)
plot(wf,f_fft_a2) % #3 numaralı ivmemetrenin frekans spektrumu subplot(5,1,5)
plot(wf,f_fft_a3) % #4 numaralı ivmemetrenin frekans spektrumu
```

```
%axis([fmin fmax min(f_fft) max(f_fft)*1.2]);
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Amplitude')
```



Şekil Ek2.1 Yukarıdaki programa ait örnek bir analiz çıktısı

- 5 adet numunenin genlik-zaman titreşim cevabını aynı anda görüntülemek için hazırlanan program:

```
clc;clear
% This program calculates the curve length transform of five signals file together
```

```
fs=4000; %frequency
dt=1/4000; %resolution
z1_1=load('C:\Dosya_konumu\Dosya_adı.txt');
z1_2=load('C:\Dosya_konumu\Dosya_adı.txt');
z1_3=load('C:\Dosya_konumu\Dosya_adı.txt');
z1_4=load('C:\Dosya_konumu\Dosya_adı.txt');
z1_5=load('C:\Dosya_konumu\Dosya_adı.txt');
```

zaman_bas1=15; %first saniye
zaman_bit1=19; %first saniye

zaman_bas2=4; %second saniye
zaman_bit2=6; %second saniye

zaman_bas3=2; %third saniye
zaman_bit3=3.5; %third saniye

zaman_bas4=4.5; %fourth saniye
zaman_bit4=5.5; %fourth saniye

zaman_bas5=4; %fifth saniye
zaman_bit5=5; %fifth saniye

sbas_1=zaman_bas1*fs; %first accelerometer start and finish
sbit_1=zaman_bit1*fs;

sbas_2=zaman_bas2*fs; %second accelerometer start and finish
sbit_2=zaman_bit2*fs;

sbas_3=zaman_bas3*fs; %third accelerometer start and finish
sbit_3=zaman_bit3*fs;

sbas_4=zaman_bas4*fs; %fourth accelerometer start and finish
sbit_4=zaman_bit4*fs;

sbas_5=zaman_bas5*fs; %fifth accelerometer start and finish
sbit_5=zaman_bit5*fs;

tm1=z1_1(:,1); %value assigning to first timeline and accelerometer
a1_0=z1_1(:,2); %in first file
a1_1=z1_1(:,3);
a1_2=z1_1(:,4);
a1_3=z1_1(:,5);

tm2=z1_2(:,1); %value assigning to second timeline and accelerometer
a2_0=z1_2(:,2); %in second file
a2_1=z1_2(:,3);
a2_2=z1_2(:,4);
a2_3=z1_2(:,5);

tm3=z1_3(:,1); %value assigning to third timeline and accelerometer
a3_0=z1_3(:,2); %in third file
a3_1=z1_3(:,3);
a3_2=z1_3(:,4);
a3_3=z1_3(:,5);

```

tm4=z1_4(:,1);    %value assigning to fourth timeline and accelerometer
a4_0=z1_4(:,2);  %in fourth file
a4_1=z1_4(:,3);
a4_2=z1_4(:,4);
a4_3=z1_4(:,5);

tm5=z1_5(:,1);    %value assigning to fifth timeline and accelerometer
a5_0=z1_5(:,2);  %in fifth file
a5_1=z1_5(:,3);
a5_2=z1_5(:,4);
a5_3=z1_5(:,5);

subplot(2,1,1)
plot(tm1,a1_3,'-b','linewidth',1,'markersize',200);    %Select accelerometer
hold on
plot (tm2,a2_0,'-r','linewidth',1,'markersize',200);    %Select accelerometer
hold on
plot (tm3,a3_3,'--y','linewidth',1,'markersize',200);    %Select accelerometer
hold on
plot (tm4,a4_0,':g','linewidth',1,'markersize',200);    %Select accelerometer
hold on
plot (tm5,a5_1,'-.c','linewidth',1,'markersize',200);    %Select accelerometer
hold off
xlabel('Time(Sec)')
ylabel('Amplitude')

display
('=====')

a1_0=a1_0(sbas_1:sbit_1,1);
a1_1=a1_1(sbas_1:sbit_1,1);
a1_2=a1_2(sbas_1:sbit_1,1);
a1_3=a1_3(sbas_1:sbit_1,1);

a2_0=a2_0(sbas_2:sbit_2,1);
a2_1=a2_1(sbas_2:sbit_2,1);
a2_2=a2_2(sbas_2:sbit_2,1);
a2_3=a2_3(sbas_2:sbit_2,1);

a3_0=a3_0(sbas_3:sbit_3,1);
a3_1=a3_1(sbas_3:sbit_3,1);
a3_2=a3_2(sbas_3:sbit_3,1);
a3_3=a3_3(sbas_3:sbit_3,1);

a4_0=a4_0(sbas_4:sbit_4,1);
a4_1=a4_1(sbas_4:sbit_4,1);
a4_2=a4_2(sbas_4:sbit_4,1);

```

```

a4_3=a4_3(sbas_4:sbit_4,1);

a5_0=a5_0(sbas_5:sbit_5,1);
a5_1=a5_1(sbas_5:sbit_5,1);
a5_2=a5_2(sbas_5:sbit_5,1);
a5_3=a5_3(sbas_5:sbit_5,1);

%FFT of original vibration signal
nfft=512*256;
wf=(0:(nfft/2-1))/(nfft/2)*(fs/2);

f_fft_a1_0=abs(fft(a1_0,nfft))*dt*2*pi;    %first file accelerometers
f_fft_a1_0=f_fft_a1_0(1:length(f_fft_a1_0)/2);

f_fft_a1_1=abs(fft(a1_1,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a1_1=f_fft_a1_1(1:length(f_fft_a1_1)/2);

f_fft_a1_2=abs(fft(a1_2,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a1_2=f_fft_a1_2(1:length(f_fft_a1_2)/2);

f_fft_a1_3=abs(fft(a1_3,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a1_3=f_fft_a1_3(1:length(f_fft_a1_3)/2);

f_fft_a2_0=abs(fft(a2_0,nfft))*dt*2*pi;    %second file accelerometers
f_fft_a2_0=f_fft_a2_0(1:length(f_fft_a2_0)/2);

f_fft_a2_1=abs(fft(a2_1,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a2_1=f_fft_a2_1(1:length(f_fft_a2_1)/2);

f_fft_a2_2=abs(fft(a2_2,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a2_2=f_fft_a2_2(1:length(f_fft_a2_2)/2);

f_fft_a2_3=abs(fft(a2_3,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a2_3=f_fft_a2_3(1:length(f_fft_a2_3)/2);

f_fft_a3_0=abs(fft(a3_0,nfft))*dt*2*pi;    %third file accelerometers
f_fft_a3_0=f_fft_a3_0(1:length(f_fft_a3_0)/2);

f_fft_a3_1=abs(fft(a3_1,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a3_1=f_fft_a3_1(1:length(f_fft_a3_1)/2);

f_fft_a3_2=abs(fft(a3_2,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a3_2=f_fft_a3_2(1:length(f_fft_a3_2)/2);

f_fft_a3_3=abs(fft(a3_3,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a3_3=f_fft_a3_3(1:length(f_fft_a3_3)/2);

f_fft_a4_0=abs(fft(a4_0,nfft))*dt*2*pi;    %fourth file accelerometers

```

```

f_fft_a4_0=f_fft_a4_0(1:length(f_fft_a4_0)/2);

f_fft_a4_1=abs(fft(a4_1,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a4_1=f_fft_a4_1(1:length(f_fft_a4_1)/2);

f_fft_a4_2=abs(fft(a4_2,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a4_2=f_fft_a4_2(1:length(f_fft_a4_2)/2);

f_fft_a4_3=abs(fft(a4_3,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a4_3=f_fft_a4_3(1:length(f_fft_a4_3)/2);

f_fft_a5_0=abs(fft(a5_0,nfft))*dt*2*pi;    %fifth file accelerometers
f_fft_a5_0=f_fft_a5_0(1:length(f_fft_a5_0)/2);

f_fft_a5_1=abs(fft(a5_1,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a5_1=f_fft_a5_1(1:length(f_fft_a5_1)/2);

f_fft_a5_2=abs(fft(a5_2,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a5_2=f_fft_a5_2(1:length(f_fft_a5_2)/2);

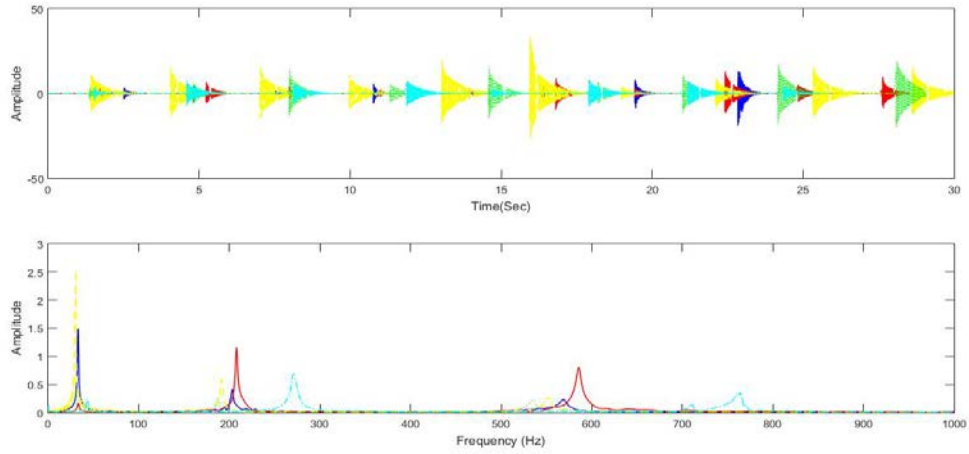
f_fft_a5_3=abs(fft(a5_3,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a5_3=f_fft_a5_3(1:length(f_fft_a5_3)/2);

fmin=0; %minumum frequency on the x axis in Hertz
fmax=1000; %maxiumum frequency on the x axis in Hertz

subplot(2,1,2)
plot(wf,f_fft_a1_3,'-b','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#1 of first file
hold on
plot(wf,f_fft_a2_0,'-r','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#1 of second file
hold on
plot(wf,f_fft_a3_3,'--y','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#1 of third file
hold on
plot(wf,f_fft_a4_0,':g','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#1 of fourth file
hold on
plot(wf,f_fft_a5_1,'-.c','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#1 of fifth file
hold off

%axis([fmin fmax min(f_fft) max(f_fft)*1.2]);
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Amplitude')

```



Şekil Ek2.2 Yukarıdaki programa ait örnek bir analiz çıktısı

- 5 adet numunenin genlik-frekans titreşim cevabını aynı anda görüntülemek için hazırlanan program

```
clc;clear
```

```
% This program calculates the curve length transform of five signals file together
```

```
fs=4000; %frequency
```

```
dt=1/4000; %resolution
```

```
z1_1=load('C:\Users\Go\Desktop\DD\3ay\g\al1c.txt');
```

```
z1_2=load('C:\Users\Go\Desktop\DD\3ay\g\al2c.txt');
```

```
z1_3=load('C:\Users\Go\Desktop\DD\3ay\g\al3c.txt');
```

```
z1_4=load('C:\Users\Go\Desktop\DD\3ay\g\al4c.txt');
```

```
z1_5=load('C:\Users\Go\Desktop\DD\3ay\g\al5c.txt');
```

```
zaman_bas1=20; %first saniye
```

```
zaman_bit1=23; %first saniye
```

```
zaman_bas2=4; %second saniye
```

```
zaman_bit2=6; %second saniye
```

```
zaman_bas3=2; %third saniye
```

```
zaman_bit3=3.5; %third saniye
```

```
zaman_bas4=4.5; %fourth saniye
```

```
zaman_bit4=5.5; %fourth saniye
```

```
zaman_bas5=4; %fifth saniye
```

```
zaman_bit5=5; %fifth saniye
```

```
sbas_1=zaman_bas1*fs; %first accelerometer start and finish
```

```
sbit_1=zaman_bit1*fs;
```

```

sbas_2=zaman_bas2*fs; %second accelerometer start and finish
sbit_2=zaman_bit2*fs;

sbas_3=zaman_bas3*fs; %third accelerometer start and finish
sbit_3=zaman_bit3*fs;

sbas_4=zaman_bas4*fs; %fourth accelerometer start and finish
sbit_4=zaman_bit4*fs;

sbas_5=zaman_bas5*fs; %fifth accelerometer start and finish
sbit_5=zaman_bit5*fs;

tm1=z1_1(:,1); %value assigning to first timeline and accelerometer
a1_0=z1_1(:,2); %in first file
a1_1=z1_1(:,3);
a1_2=z1_1(:,4);
a1_3=z1_1(:,5);

tm2=z1_2(:,1); %value assigning to second timeline and accelerometer
a2_0=z1_2(:,2); %in second file
a2_1=z1_2(:,3);
a2_2=z1_2(:,4);
a2_3=z1_2(:,5);

tm3=z1_3(:,1); %value assigning to third timeline and accelerometer
a3_0=z1_3(:,2); %in third file
a3_1=z1_3(:,3);
a3_2=z1_3(:,4);
a3_3=z1_3(:,5);

tm4=z1_4(:,1); %value assigning to fourth timeline and accelerometer
a4_0=z1_4(:,2); %in fourth file
a4_1=z1_4(:,3);
a4_2=z1_4(:,4);
a4_3=z1_4(:,5);

tm5=z1_5(:,1); %value assigning to fifth timeline and accelerometer
a5_0=z1_5(:,2); %in fifth file
a5_1=z1_5(:,3);
a5_2=z1_5(:,4);
a5_3=z1_5(:,5);

subplot(5,1,1)
plot(tm1,a1_3,'-b','linewidth',1,'markersize',200); %Select accelerometer
hold on
plot (tm2,a2_0,'-r','linewidth',1,'markersize',200); %Select accelerometer
hold on

```

```

plot (tm3,a3_3,'--y','linewidth',1,'markersize',200); %Select accelerometer
hold on
plot (tm4,a4_0,'g','linewidth',1,'markersize',200); %Select accelerometer
hold on
plot (tm5,a5_1,'-c','linewidth',1,'markersize',200); %Select accelerometer
hold off
xlabel('Time(Sec)')
ylabel('Amplitude')

display
('=====')

a1_0=a1_0(sbas_1:sbit_1,1);
a1_1=a1_1(sbas_1:sbit_1,1);
a1_2=a1_2(sbas_1:sbit_1,1);
a1_3=a1_3(sbas_1:sbit_1,1);

a2_0=a2_0(sbas_2:sbit_2,1);
a2_1=a2_1(sbas_2:sbit_2,1);
a2_2=a2_2(sbas_2:sbit_2,1);
a2_3=a2_3(sbas_2:sbit_2,1);

a3_0=a3_0(sbas_3:sbit_3,1);
a3_1=a3_1(sbas_3:sbit_3,1);
a3_2=a3_2(sbas_3:sbit_3,1);
a3_3=a3_3(sbas_3:sbit_3,1);

a4_0=a4_0(sbas_4:sbit_4,1);
a4_1=a4_1(sbas_4:sbit_4,1);
a4_2=a4_2(sbas_4:sbit_4,1);
a4_3=a4_3(sbas_4:sbit_4,1);

a5_0=a5_0(sbas_5:sbit_5,1);
a5_1=a5_1(sbas_5:sbit_5,1);
a5_2=a5_2(sbas_5:sbit_5,1);
a5_3=a5_3(sbas_5:sbit_5,1);

%FFT of original vibration signal
nfft=512*256;
wf=(0:(nfft/2-1))/(nfft/2)*(fs/2);

f_fft_a1_0=abs(fft(a1_0,nfft))*dt*2*pi; %first file accelerometers
f_fft_a1_0=f_fft_a1_0(1:length(f_fft_a1_0)/2);

f_fft_a1_1=abs(fft(a1_1,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a1_1=f_fft_a1_1(1:length(f_fft_a1_1)/2);

f_fft_a1_2=abs(fft(a1_2,nfft))*dt*2*pi;

```

```

f_fft_a1_2=f_fft_a1_2(1:length(f_fft_a1_2)/2);

f_fft_a1_3=abs(fft(a1_3,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a1_3=f_fft_a1_3(1:length(f_fft_a1_3)/2);

f_fft_a2_0=abs(fft(a2_0,nfft))*dt*2*pi;    %second file accelerometers
f_fft_a2_0=f_fft_a2_0(1:length(f_fft_a2_0)/2);

f_fft_a2_1=abs(fft(a2_1,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a2_1=f_fft_a2_1(1:length(f_fft_a2_1)/2);

f_fft_a2_2=abs(fft(a2_2,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a2_2=f_fft_a2_2(1:length(f_fft_a2_2)/2);

f_fft_a2_3=abs(fft(a2_3,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a2_3=f_fft_a2_3(1:length(f_fft_a2_3)/2);

f_fft_a3_0=abs(fft(a3_0,nfft))*dt*2*pi;    %third file accelerometers
f_fft_a3_0=f_fft_a3_0(1:length(f_fft_a3_0)/2);

f_fft_a3_1=abs(fft(a3_1,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a3_1=f_fft_a3_1(1:length(f_fft_a3_1)/2);

f_fft_a3_2=abs(fft(a3_2,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a3_2=f_fft_a3_2(1:length(f_fft_a3_2)/2);

f_fft_a3_3=abs(fft(a3_3,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a3_3=f_fft_a3_3(1:length(f_fft_a3_3)/2);

f_fft_a4_0=abs(fft(a4_0,nfft))*dt*2*pi;    %fourth file accelerometers
f_fft_a4_0=f_fft_a4_0(1:length(f_fft_a4_0)/2);

f_fft_a4_1=abs(fft(a4_1,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a4_1=f_fft_a4_1(1:length(f_fft_a4_1)/2);

f_fft_a4_2=abs(fft(a4_2,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a4_2=f_fft_a4_2(1:length(f_fft_a4_2)/2);

f_fft_a4_3=abs(fft(a4_3,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a4_3=f_fft_a4_3(1:length(f_fft_a4_3)/2);

f_fft_a5_0=abs(fft(a5_0,nfft))*dt*2*pi;    %fifth file accelerometers
f_fft_a5_0=f_fft_a5_0(1:length(f_fft_a5_0)/2);

f_fft_a5_1=abs(fft(a5_1,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a5_1=f_fft_a5_1(1:length(f_fft_a5_1)/2);

f_fft_a5_2=abs(fft(a5_2,nfft))*dt*2*pi;

```

```

f_fft_a5_2=f_fft_a5_2(1:length(f_fft_a5_2)/2);

f_fft_a5_3=abs(fft(a5_3,nfft))*dt*2*pi;
f_fft_a5_3=f_fft_a5_3(1:length(f_fft_a5_3)/2);

fmin=0;      %minumum frequency on the x axis in Hertz
fmax=1000;   %maxiumum frequency on the x axis in Hertz

subplot(5,1,2)
plot(wf,f_fft_a1_0,'linewidth',1,'markersize',200)    %frequency spectrum of acc
#1 of first file
hold on
plot(wf,f_fft_a2_0,'-r','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#1 of second file
hold on
plot(wf,f_fft_a3_0,'--y','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#1 of third file
hold on
plot(wf,f_fft_a4_0,':g','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#1 of fourth file
hold on
plot(wf,f_fft_a5_0,'-.c','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#1 of fifth file
hold off

subplot(5,1,3)
plot(wf,f_fft_a1_1,'linewidth',1,'markersize',200)    %frequency spectrum of acc
#2 of first file
hold on
plot(wf,f_fft_a2_1,'-r','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#2 of second file
hold on
plot(wf,f_fft_a3_1,'--y','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#2 of third file
hold on
plot(wf,f_fft_a4_1,':g','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#2 of fourth file
hold on
plot(wf,f_fft_a5_1,'-.c','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#2 of fifth file
hold off

subplot(5,1,4)
plot(wf,f_fft_a1_2,'linewidth',1,'markersize',200)    %frequency spectrum of acc
#3 of first file
hold on
plot(wf,f_fft_a2_2,'-r','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#3 of second file
hold on

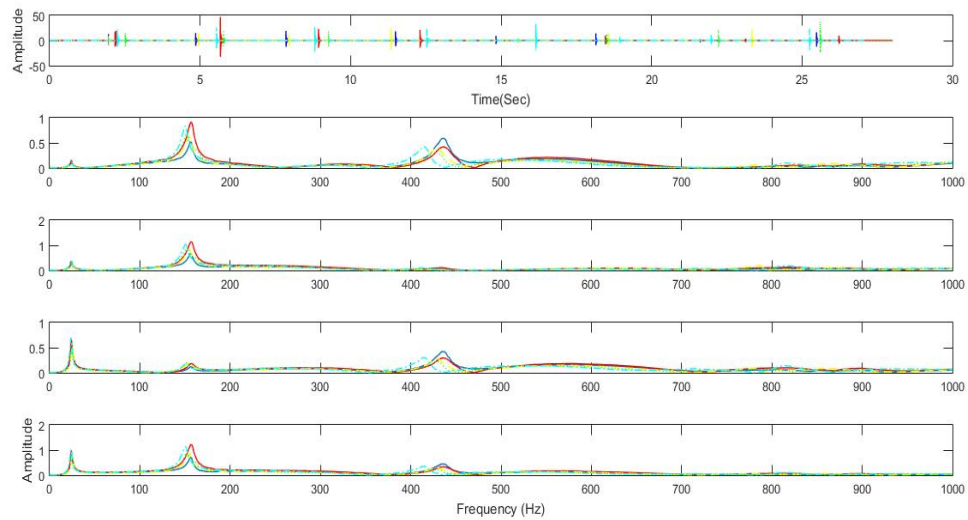
```

```

plot(wf,f_fft_a3_2,'-y','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#3 of third file
hold on
plot(wf,f_fft_a4_2,':g','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#3 of fourth file
hold on
plot(wf,f_fft_a5_2,'-.c','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#3 of fifth file
hold off
subplot(5,1,5)
plot(wf,f_fft_a1_3,'linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#4 of first file
hold on
plot(wf,f_fft_a2_3,'-r','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#4 of second file
hold on
plot(wf,f_fft_a3_3,'-y','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#4 of third file
hold on
plot(wf,f_fft_a4_3,':g','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#4 of fourth file
hold on
plot(wf,f_fft_a5_3,'-.c','linewidth',1,'markersize',200) %frequency spectrum of acc
#4 of fifth file

%axis([fmin fmax min(f_fft) max(f_fft)*1.2]);
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Amplitude')

```



Şekil Ek2.3 Yukarıdaki programa ait örnek bir analiz çıktısı

- Kompozit kirişlerin logaritmik azalışını belirlemek için zarf eğrisinin görüntülenmesi için hazırlanan program:

```
clc;clear
```

```
% This program calculates the curve length transform of a signal
```

```
fs=4000; %frequency
```

```
dt=1/4000; %resolution
```

```
z1=load('C:\Users\Go\Desktop\A\0\0a2c.txt');
```

```
zaman_bas=11; %saniye
```

```
zaman_bit=13; %saniye
```

```
sbas=zaman_bas*fs;
```

```
sbit=zaman_bit*fs;
```

```
tm=z1(:,1);
```

```
a0=z1(:,2);
```

```
a1=z1(:,3);
```

```
a2=z1(:,4);
```

```
a3=z1(:,5);
```

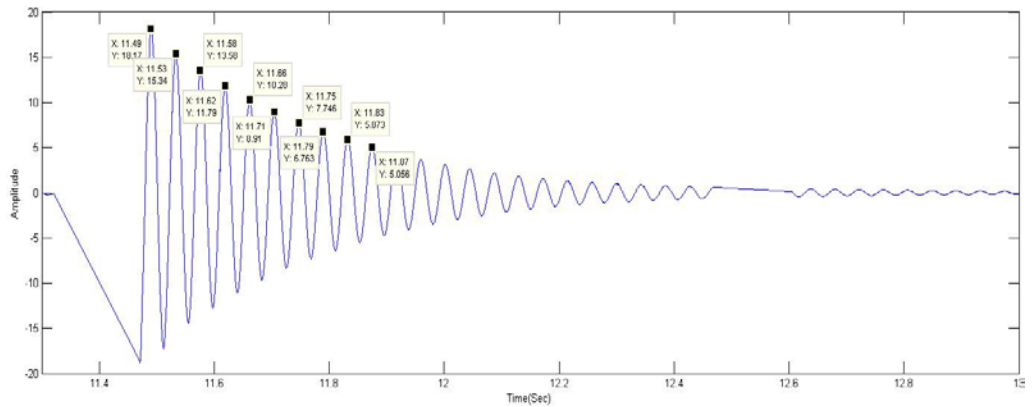
```
plot(tm,a2); %Select accelerometer
```

```
xlabel('Time(Sec)')
```

```
ylabel('Amplitude')
```

```
display
```

```
('=====')
```



Şekil Ek2.4 Yukarıdaki programa ait örnek bir analiz çıktısı

EK 3 Toprak ve su analizi sonuçları

Toprak analizi için toprak altında yaşlandırılmaya bırakılan numunelerin olduğu yerden numuneler alınmıştır. Numuneler yaşlandırılmaya bırakıldığı zaman ve yaşlandırma süresi tamamlandığında aynı analiz gerçekleştirilmiştir. Toprak analizi Adıyaman Üniversitesi Kâhta Meslek Yüksek Okulu Toprak Analizi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Toprak Analizi sonuçları aşağıdaki gibidir;

Çizelge Ek3.1 Toprak analizi sonuçları

Analiz Parametreleri	Yaşlandırılma başlangıcı	12 ay sonra
Tekstür(Saturasyon(%))	87	78
Tuz, %	0,045	0.066
pH (1:2,5)	7,35	7,21
Kireç, %	13,081	16,944
Organik Madde (%)	3,485	3,186
P, (P205) kg/da	6,173	21,173
K, (K20) kg/da	17,897	20,249
N	0,196	0,1512
Mn	4,144	3,124
Cu	1,016	0,952
Fe	1,316	0,96
Zn	0,38	0,308

Su analizi için şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Su analizi Adıyaman Üniversitesi Biyoloji Bölümü Laboratuvarında yapılmıştır. Su analizi sonuçları aşağıdaki gibidir.

Çizelge Ek3.2 Şebeke suyu analiz sonuçları

Sıcaklık	Basınç	D.O	D.O	SPC	C	TDS	SA L	pH	NH ₄ N	NH ₄ N	NH ₃ N
16,1 °C	706,2 mmHg	65,0 %L	5,92 mg/L	2,7 µs/cm	2,2 µs/cm	1,95 mg/L	0.00 ppt	6,97	0,25 mg/L	-19,6 mV	0,00 mg/L