

T. C.  
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇATLAKLI EĞRİ KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM DAVRANIŞLARININ  
DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZLERİ

Ayşe YILMAZ

TEMMUZ 2018

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalında** Ayşe YILMAZ tarafından hazırlanan ÇATLAKLI EĞRİ KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZLERİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof . Dr. Ali ERİŞEN  
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Dr. Öğr.Üyesi Memik Taylan DAŞ  
Ortak Danışman

Dr. Öğr.Üyesi Barış KALAYCIOĞLU  
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan	: Doç. Dr. Murat DEMİRAL	_____
Üye	: Doç. Dr. Tuncay KARACAY	_____
Üye(Danışman)	:Dr.Öğr.ÜyesiBarışKALAYCIOĞLU	_____
Üye	:Dr. Öğr. Üyesi Memik Taylan DAŞ	_____
Üye	:Dr.Öğr.Üyesi Masoud Latif NAVİD	_____

30/07/2018

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ÖZET

### ÇATLAKLI EĞRİ KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZLERİ

Ayşe YILMAZ

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doktor Öğretim Üyesi Barış KALAYCIOĞLU

Eş Danışman: Doktor Öğretim Üyesi Memik Taylan DAŞ

Temmuz 2018, 78 Sayfa

Bu çalışmada, farklı derinlik ve konumlardaki çatlaklara sahip eğri kompozit kirişler ile çatlaksız eğri kompozit kirişlerin ilk üç modundaki doğal frekans değerlerinin değişimi hem sayısal hem de deneysel olarak hesaplanmıştır. Kompozit kirişler 3 mm kalınlığında, 2.864 m eğrilik yarıçapında, 0° - 90° elyaf yönlenme açısında, cam elyaf – epoksi malzemesinden elle yatırma yöntemiyle üretilmiştir. Kirişteki dairesel eğrilik boyuna eksende düzlemsel olarak modellenmiştir. Çalışma sırasında kiriş, ankastre (Sabit - Serbest) ve iki ucu sabit (Sabit - Sabit) mesnetli bağlantı şekilleri ile tutturulmuştur. Çatlak, kılcal çatlak olarak ele alınmıştır. Kirişlere ait sayısal analizler ANSYS sonlu eleman programı yardımıyla üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda çatlak derinliği arttıkça her iki mesnet durumu için kompozit kirişlerde doğal frekans değerlerinin azaldığı, çatlak konumu sabit mesnetten uzaklaştıkça kirişlere ait doğal frekans değerlerinin arttığı hem sayısal hem de deneysel olarak bulunmuştur. Bunların yanında çatlaksız eğri kirişler için doğal frekans değerlerinin çatlaklı eğri kirişlerden daha yüksek olduğu sonucu elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çatlaklı eğri kompozit kiriş, doğal frekans, mod analizi

## ABSTRACT

### EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF VIBRATIONS BEHAVIOR OF CRACKED CURVED COMPOSITE BEAMS

Ayşe YILMAZ

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Eng., M. Sc. Thesis

Supervisor: Doctor Lecturer Barış KALAYCIOĞLU

Co- Supervisor: Doctor Lecturer Memik Taylan DAŞ

July 2018, 78 pages

In this study, the first three modes of natural frequency change of curved composite cracked (CCC) beams and without cracks which is at different depths and locations was investigated both numerically and experimentally. Composite beams were made of glass fiber – epoxy material that has 3.00 mm thickness, 2.864 m curvature radius and  $0^{\circ}$  -  $90^{\circ}$  fiber orienting angle by hand laying method. The circular curvature of the beam is modeled as a longitudinal axial plane. During the study, cantilever (fixed-free) and both ends fixed (fixed-fixed) supports are used as a support element. The crack is treated as a capillary crack. Numerical analysis of beams was performed in three dimensions by using ANSYS finite element program. It is observed that when the crack depth increases, the natural frequency value of CCC beams decrease for both support conditions. The natural frequency value of CCC beam increase as the crack location moves away from the fixed support, both quantitatively and experimentally. In addition, the result is that the natural frequency values for uncracked curved beams higher than the cracked curved beams.

**Keywords:** Cracked curved composite beam, natural frequency, mode analysis

## TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında bana üç dönem danışmanlık yapan, sonrasında yurt dışında görevlendirildiği için eş danışman olarak bütün aşamalarda her an iletişim ve destek halinde olup hiçbir yardımını esirgemeyip, üstün sabrıyla ve değerli bilgileriyle bana yardımcı olan, yol gösteren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Memik Taylan DAŞ'a araştırmaya teşvikleri, yaklaşımı ve bu çalışma dışında hayata karıştı duruşu ve tutumuyla da bana ilham olması sebebiyle şükranlarımı sunarım. Ayrıca danışmanımın yokluğunda bana danışman olarak atanan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Barış KALAYCIOĞLU'na tüm destekleri için teşekkür ederim.

Tez çalışmamın malzeme üretim kısmında hiçbir yardım ve desteğini esirgemeyen Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü hocalarında Sayın Doç. Dr. Ahmet ERKLİĞ, Sayın Doç. Dr. Ömer Yavuz BOZKURT, Sayın Ar. Gör. Nurettin Furkan DOĞAN ve Sayın Ar. Gör. Mehmet Erkan KÜTÜK hocalarıma teşekkür ederim.

Deneysel çalışmamda benimle birebir ilgilenip fikirlerini sunan, yorumlarını dile getiren ve sonuçlar üzerinde çalışmama destek olan Roketsan çalışanlarından Makine Mühendisi Sayın Caner GENÇOĞLU'na teşekkür ederim.

Tez çalışmamda karşılaştığım sorunları paylaştığımda beni aydınlatarak fikir ve görüşlerini benimle paylaşan arkadaşım İbrahim ZENGİN'e ve her türlü konuda olduğu gibi bu konuda da destekleri ile yanımda bulunan dostluğunu esirgemeyen çok değerli arkadaşım Gökçe MÜLAZIMOĞLU'na tüm yaptıkları için teşekkür ederim.

Son olarak, bütün hayatım boyunca yanımda olup bitmek tükenmek bilmeyen bir sabırla maddi manevi destek olan, sabır, sevgi ve güler yüz ile tüm fedakarlığımı gösteren aileme her daim teşekkürü borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÇİZELGE DİZİNİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1.GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>4</b>
2.1. Çatlaksız Düz Konsol Kiriş Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	4
2.2. Çatlaklı Düz Konsol Kirişler Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	5
2.3. Çatlaklı Eğri Kirişler Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	13
2.4. Çatlaksız Eğri Kirişler Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	14
<b>3. KOMPOZİT MALZEMELER VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ</b> .....	<b>18</b>
3.1. Kompozit Malzemeler .....	18
3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması .....	19
3.3. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Malzemeler .....	19
3.4. Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri .....	20
3.4.1. El İle Yatırma Yöntemi.....	20
3.4.2. Püskürtme Yöntemi .....	20
3.4.3. Vakum Torba Kalıplaması Yöntemi.....	21
3.4.4. Elyaf Sarma Yöntemi.....	22
3.4.5. Profil Çekme Yöntemi .....	23
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>24</b>
4.1. Kalıpların Hazırlanması .....	24
4.2. Deney Numunelerinin Üretimi .....	25
4.2.1. Elyafların Hazırlanması .....	25

4.2.2. Reçinenin Hazırlanması .....	26
4.2.3. Elyafın Serilmesi .....	27
4.2.4. Kiriş Yüzeyinde Çatlakların Açılması .....	29
<b>5. ÇATLAKLI EĞRİ KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM ANALİZLERİ</b>	<b>31</b>
5.1. Sayısal Analiz (Sonlu Elemanlar Yöntemi) .....	31
5.2. Sayısal Analiz Sonuçları .....	38
5.3. Deneysel Analiz .....	41
5.3.1. Deney Düzenegi .....	42
5.3.2. Deneysel Analizde Dikkat Edilmesi Gerekenler .....	44
5.4. Deneysel Analiz Sonuçları .....	44
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....	<b>58</b>
6.1. Sonuçlar .....	58
6.2. Öneriler .....	59
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>62</b>
<b>EKLER</b> .....	<b>66</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİLLER	Sayfa
3.1. Kompozit mazleme oluşumu[48].....	19
3.2. El ile yatırma yöntemi[49] .....	20
3.3. Püskürtme yöntemi[47].....	21
3.4. Vakum torba kalıplaması yöntemi[47].....	22
3.5. Elyaf sarma yöntemi [50].....	22
3.6. Profil çekme yöntemi [50] .....	23
4.1. Silindirde bükülmüş ve destekleri kaynatılan kalıpların genel görünümü.....	24
4.2. Cam elyaf .....	25
4.3. Cam elyafların kesilmesi.....	26
4.4. Reçinenin hazırlanması .....	26
4.5. Elyaf kalıba serilmesi .....	27
4.6. Elyaf serme sonrası sertleşmeye bırakılan kalıplar.....	28
4.7. Kalıptan ayrılan kirişler.....	28
4.8. Üretimi tamamlanmış kirişler .....	29
4.9. Çatlaklı eğri kompozit kiriş.....	30
5.1.Çatlaklı eğri kiriş ve çatlak bölgesinin katı modeli.....	32
5.2. Analiz sistemlerinin seçilmesi .....	33
5.3. Malzemenin seçilmesi.....	34
5.4. Geometrinin seçilmesi .....	34
5.5. Çatlak bölgesinin ağ yapısının oluşturulması .....	35
5.6. Çatlaklı eğri kirişin ve çatlak bölgesinin ağ yapısı .....	35
5.7. Sabit - sabit sınır şartlarının tanımlanması.....	36
5.8. Ankastre sınır şartlarının tanımlanması .....	37
5.9. Analizin yapılması .....	37
5.10. Mod şekilleri ve frekans değerlerinin oluşturulması .....	38
5.11. Çatlaksız eğri kompozit kirişin ankastre sınır şartlarında mod şekli ve doğal frekans değerleri .....	39
5.12. Çatlaksız eğri kompozit kirişin sabit - sabit sınır şartlarında mod şekli ve doğal frekans değerleri .....	39



5.13. Çatlaklı eğri kompozit kirişin ankastre sınır şartlarında mod şekli ve doğal frekans değerleri .....	40
5.14. Çatlaklı eğri kompozit kirişin sabit - sabit sınır şartlarında mod şekli ve doğal frekans değerleri .....	40
5.15. Deneyler için üretilen kirişler .....	42
5.16. Ankastre sınır şartı için deney düzeneği .....	43
5.17. Sabit - sabit sınır şartı için deney düzeneği .....	43
5.18. Çatlaksız eğri kompozit kirişin ankastre sınır şartlarında mod şekli ve doğal frekans değerleri .....	45
5.19. Çatlaksız eğri kompozit kirişin sabit - sabit sınır şartlarında mod şekli ve doğal frekans değerleri .....	45
5.20. Ankastre sınır şartı için çatlaklı eğri kompozit kirişin deneysel mod şekilleri ve doğal frekans değerleri .....	46
5.21. Sabit – sabit sınır şartı için çatlaklı eğri kompozit kirişin deneysel mod şekilleri ve doğal frekans değerleri.....	46
5.22. Ankastre sınır şartlarında $d= 0.3\text{mm}$ çatlak derinliklerinde eğri kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması.....	48
5.23. Ankastre sınır şartlarında $d= 0.6\text{mm}$ çatlak derinliklerinde eğri kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması.....	49
5.24. Ankastre sınır şartlarında $d= 0.9\text{mm}$ çatlak derinliklerinde eğri kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması.....	49
5.25. Ankastre sınır şartlarında $L_c=0.095\text{m}$ çatlak derinliklerine göre eğri kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması.....	50
5.26. Ankastre sınır şartlarında $L_c=0.195\text{m}$ çatlak derinliklerine göre eğri kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması.....	50
5.27. Ankastre sınır şartlarında $L_c=0.295\text{m}$ çatlak derinliklerine göre eğri kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması.....	51
5.28. Sabit - sabit sınır şartlarında çatlaksız kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri .....	51
5.29. Sabit - sabit sınır şartlarında $d=0.3\text{ mm}$ çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri .....	52
5.30. Sabit - sabit sınır şartlarında $d=0.6\text{ mm}$ çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri .....	52

<b>5.31.</b> Sabit - sabit sınır şartlarında $d=0.9\text{mm}$ çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri .....	53
<b>5.32.</b> Sabit - sabit sınır şartlarında $d=0.3\text{mm}$ çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri .....	54
<b>5.33.</b> Sabit - sabit sınır şartlarında $d=0.6\text{mm}$ çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri .....	54
<b>5.34.</b> Sabit - sabit sınır şartlarında $d=0.9\text{mm}$ çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri .....	55
<b>5.35.</b> Sabit - sabit sınır şartlarında $d=0.3\text{mm}$ çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri .....	56
<b>5.36.</b> Sabit - sabit sınır şartlarında $d=0.6\text{mm}$ çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri .....	56
<b>5.37.</b> Sabit - sabit sınır şartlarında $d=0.9\text{mm}$ çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri .....	57

## ÇİZELGE DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

2.1. Literatürde yapılan çalışmaların sınıflandırılması .....	16
5.1. Giriş özellikleri.....	32



## 1.GİRİŞ

Kompozit malzemelerin günümüzde hemen hemen her alanda aktif olarak kullanılması, konunun mühendislik uygulamalarında yer alması 1940'lı yıllara kadar dayanmaktadır. Son 30 yılda meydana gelen teknolojik ve endüstriyel gelişmeler ile pek çok uygulamada geleneksel malzemelerden daha üstün özelliklere sahip yeni malzemelerin kullanımı artmaya başlamıştır. Özellikle havacılık, uzay, mühendislik, otomotiv sektörlerinin gelişmesi sonucu yapılan uygulamalarda kullanılacak olan malzemelerden hafiflik, yüksek dayanım gibi daha iyi performanslar beklenmektedir. Kompozit malzemelerin bu gereksinimlerin çoğunu karşılaması nedeniyle duyulan ihtiyaç artmış ve kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu amaç doğrultusunda araştırma ve geliştirme faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda, kompozit malzeme adı verilen, malzemelerin üstün özelliklerini taşıyan yeni malzemeler üretilmiştir [1].

Kompozit malzemeler, kimyasal ve fiziksel özellikler bakımından farklı özelliklere sahip en az iki geleneksel malzemenin, beklentileri karşılayacak şekilde farklı yöntemlerle bir araya getirilmesi ile oluşturulan karma yapılardır.

İnce cidarlı kompozit elemanlar havacılık, enerji, inşaat ve otomotiv sanayide olmak üzere pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu elemanların pek çoğu kiriş formuna sahiptir. Yüksek mukavemet ve direngenlik değerine sahip kompozit malzemelerden imal edilen kirişler de özellikle havacılık endüstrisinin vazgeçilmez yapı elemanları arasında yer almaktadır. Düşük özgül mukavemet ve direngenliği ve korozyon direnci nedeniyle tercih edilen kompozit kirişlerde oluşabilecek deformasyonların boyutu önem arz etmektedir. Yapılarda düz kirişlerle beraber eğri kirişlerde mevcuttur. Eğri kirişler dişlilerde, elektrik makinelerinde, pompa ve türbinlerde, gemilerde, köprülerde turbo makineler gibi geniş kapsamlı kullanım alanlarına sahiptirler. Kirişler, kullanıldığı yerler göz önüne alındığında fonksiyonel ve taşıyıcı eleman olarak, önemli yapı elemanları arasında bulunmaktadır. Önemli bir konumda yer alan yapı elemanında meydana gelebilecek olan hasar ve oluşturulan yüklemeler de önem

taşımaktadır. Bu etkiler kiriş yapıda hareketlenmelere ve sonuç olarak titreşimlere sebep olmaktadır.

Kiriş titreşimlerinin; yorulma, deformasyon ve hasar gibi genel başlıklar altında çok fazla mühendislik çalışma alanı oluşturduğu görülmektedir. Bu nedenlerle kiriş titreşimlerinin incelenmesi de yapısal ve sağlıklı çalışmanın incelenmesi bakımından önemlidir. Pek çok makine parçasında olduğu gibi kirişlerde de çatlaklara sebep olan yorulma ve gerilme limitleri mevcuttur.

Çatlaklar genellikle üretim hattında veya üretim sonrası kullanım aşamasında meydana gelen etkilerden oluşmaktadır. Kiriş üzerinde mevcut bir çatlak, yapısal bütünlüğü bozacak etkiler ortaya çıkarabilmektedir. Bu etkiler çatlağın varlığına, yerine, derinliğine, çatlak sayısına ve çatlağın bulunduğu bölgeye göre oluşup kiriş üzerinde değişkenlik gösterdiği daha önce yapılan çalışmalarda görülmektedir.

Çatlaklar bölgesel esneklikler oluştururlar. İlk duruma kıyasla kiriş kararlılığını, sönümlemesini ve rijitliğini etkiler. Dolayısıyla çatlak içeren bir kirişte doğal frekans, mod yapısı, sönümleme gibi dinamik karakteristik özellikler değişmektedir. Değişen karakteristik yapı kiriş üzerinde meydana gelebilecek herhangi bir etkiden kolaylıkla etkilenebilmektedir [2].

Bir yapıda incelenmesi gereken önemli konular arasında titreşim konusu yer almaktadır. Kirişler kritik yapı elemanları olmaları ve pek çok alanda kullanılmaları sebebiyle titreşim bakımından incelenecek yapı elemanlarından biridir. Yapılar içinde oluşan titreşimler önemli etkilere sahiptir. Çatlak varlığı ile doğal frekans ve mod yapısı değişmektedir. Doğal frekansta oluşan değişimler rezonans değerini de değiştirmektedir. Bundan dolayı kirişlerde çatlak varlığına bakılmalıdır, mevcut çatlak ilerlemesi kontrol edilmedir ve çatlaklı yapıların dinamik özelliklerindeki değişimler incelenmelidir.

Bu çalışmada çatlaklı eğri kompozit kirişlerin titreşim davranışlarının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Yapılan incelemelerde çatlaklı kirişin ilk üç mod ve doğal frekanslarını bulmak için çalışacağız. 2. Bölümde çatlaklı kirişlerin

titreşimi üzerine çalışmalar sınıflandırılmış ve literatür taraması sunulmuştur. 3. Bölümde çalışma da kullanılan kompozit kirişin üretim şekli ve imalat bilgilerine yer verilmiştir. 4. Bölümde çatlaklı eğri kompozit kirişin ANSYS programı kullanılarak yapılan titreşim analizi sonuçları gösterilmiştir. 5. Bölümde deneysel çalışma için hazırlanan deney düzeneği ve test sonuçları sunulmuştur.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Geçmişten günümüze pek çok çalışmanın incelenmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve çalışmaya açık olan konuların belirlenmesi hususunda literatür taraması etkin bir rol oynamaktadır. Çalışmanın bu kısmında literatürde olan çalışmalar incelenerek kullanılan kiriş türü, kullanılan parametreler, sınır şartları ve elde edilen sonuçlar rapor edilmiştir.

### 2.1.Çatlaksız Düz Konsol Kiriş Üzerine Yapılan Çalışmalar

Kamble vd. [3]; bir ucu sabit diğer ucundan yük uygulanan düz kiriş için iki farklı materyal (çelik ve alüminyum) kullanarak deneysel ve analitik olarak çalışmışlardır. Çalışmada kiriş üzerine yaklaşık 2,5 N yük uygulanmıştır. İlk üç mod üzerinde çalışılmıştır. Deneysel ve analitik çalışmalardan elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Alüminyumun frekans değerlerinin çelikten daha iyi olduğu sonucunu elde etmişlerdir.

Chogule vd. [4]; bir ucu sabit dikdörtgen şekle sahip düz bir kiriş üzerinde deneysel olarak çalışmışlardır. Çalışmada doğal frekans, mod yapısı, sönümlenme ve mod şekillerini elde etmişlerdir. İlk altı mod üzerinde çalışılmıştır. Alüminyum ve çelik malzemeler ile çalışmışlar ve çalışma sonuçlarını kıyaslayarak alüminyumun doğal frekans değerlerini ve sönümlenme faktörünün çelikten daha iyi olduğu sonucunu elde etmişlerdir.

Imran vd. [5]; çelik malzemedan yapılan çatlaksız düz konsol kiriş ile çalışmışlardır. Euler Bernoulli kiriş teorisini kullanarak konsol kiriş için teorik mod analizleri ve sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Kirişler için ilk üç mod üzerinde çalışarak mod şekillerini ve doğal frekansları elde etmişlerdir.

Raj vd. [6]; çok serbestlik dereceli düz çatlaksız kirişler için dinamik analizler çalışmışlardır. ANSYS ve MATLAB programları ile modelleme, simülasyon ve analizler yapılmıştır. Kiriş için Lagrange eşitliğini kullanarak formülasyonlar elde edilmiştir. İki farklı malzeme (çelik ve karbon fiber takviteli plastik) farklı boyutlara sahip kişiler ile çalışılmıştır. İlk altı mod için çözüm yaparak sonuçları kıyaslamışlardır.

Kumar vd. [7]; yapı çeliği, paslanmaz çelik ve dökme demir gibi farklı malzemeler kullanarak I ve T konsol kirişler için doğal frekanslarını karşılaştırmışlar ve analizlerini Ansys ile yaptıklarını göstermişlerdir. Bir ucu sabit, diğer ucu serbest sınır koşuluna sahip kirişler için serbest uçtan farklı yükler (10 kN, 20kN, 30kN, 40kN, 50kN ve 60kN) uygulayarak titreşim elde edilmiştir. İlk altı mod üzerinde çalışılmıştır. Titreşim sonucunda doğal frekans ve yer değiştirmeleri bulunmuştur.

Vaziri vd. [8]; alüminyum, orta yumuşaklıkta çelik ve izotropik polimerden yapılan düz, çatlaksız konsol kirişler üzerinde çalışmışlardır. Alüminyum konsol kirişlerin mod şekilleri ve doğal frekansları, analitik ve nümerik olarak incelenmiştir. İlk dört mod değeri ile çalışılmıştır. Çalışmada OROS adlı yazılım programı kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.

## **2.2.Çatlaklı Düz Konsol Kirişler Üzerine Yapılan Çalışmalar**

Mia vd. [9]; çatlaksız ve çatlaklı düz konsol kirişler için mod yapısı ve doğal frekansları üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile çalışmışlardır. Çalışmada kiriş üzerine açılan “v” şeklinde çatlak için farklı mesh yapısı (altıgen ve üçgen prizma), farklı uzunlukta çatlak boyu (çatlaksız, 0.002m, 0.004m, 0.010m), farklı çatlak konumu (0.1 m çatlak derinliği için 0.500 m, 1.000 m, 1.500 m, 2.000 m, 2.5000 m) ve farklı çatlak derinliği (1 m çatlak konumu için; 0.050 m, 0.075 m, 0.100 m, 0.125 m, 0.150 m) kullanarak ilk üç mod üzerine etkisini incelemişlerdir.

Gori vd. [10]; kiriş yüzeyinde çatlak etkisini incelemişlerdir. Yapı çeliği ile çalışmışlardır. Çatlaklı (0.5 m ve 1.0 m derinlikli) ve çatlaksız kirişler için analizler



yaparak sonuçlarını incelemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi ve nümerik analizler üzerine çalışmışlardır. Kirişlerde ilk altı mod yapısı çeşitli çatlak boyutları açısından incelenmiştir. Çatlak derinliği arttıkça doğal frekans değerinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Analizler ile elde edilen titreşim modlarından kiriş yüzeyinde oluşan total deformasyon değeri bulunmuştur.

Douka vd. [11]; alüminyum malzemedan yapılan konsol kiriş üzerine açılan bir çatlak üzerinde hem deneysel hem de teorik olarak çalışmışlardır. Çalışmada Fourier analizlerine alternatif olarak zaman frekans metodunu kullanıp sistemin lineer olmayan davranışını elde etmişlerdir. Simülasyon verilerini ve deneysel verileri farklı yöntemler ile hesaplayarak analiz etmişlerdir.

Orhan [12]; serbest ve zorlanmış titreşim analizleri yapmıştır. Çelik malzemedan yapılan konsol kiriş üzerinde tek ve iki çatlak açarak sonlu elemanlar yöntemi ile titreşimlerini incelemiştir. “v” şeklinde çatlak modeli üzerinde çalışmıştır. Çatlak konum (375mm, 400 mm), çatlak derinliğini (4mm, 8mm, 12mm, 16mm, 20mm, 24mm), çatlağın yüzeydeki yerini (alt ve üst) ve çatlak sayısını (tek, çift) değiştirerek çalışmıştır. Tek çatlak için zorlanmış titreşim hareketine bakmıştır. Çatlak derinlik ve konumlarını değiştirerek doğal frekansları hesaplamıştır.

Satpute vd. [13]; konsol mil kiriş üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada tek tür çelik malzeme kullanılmıştır. Çatlaklı ve çatlaksız mil kiriş üzerinde doğal frekans incelenmiştir. Çatlak konumu (55mm, 110mm, 165mm, 220mm, 275mm, 330mm, 385mm, 440mm) ve çatlak derinliğini (2.5mm, 5.00mm, 7.5mm, 10mm, 12.5mm, 15.00mm, 17.5mm, 20mm) değiştirerek ilk üç moda analitik olarak bakılmıştır. Sonuçları karşılaştırarak çatlağın kiriş üzerine etkileri incelenmiştir.

Owolabi vd. [14]; düz kiriş yapılarıdaki çatlak yayılımı ve konumunu belirleyerek zararı anlamak ve etkilerini incelemek üzerinde çalışmışlardır. Alüminyum kiriş üzerinde çalışmışlardır. Çalışma iki ayrı set olarak yapılmıştır. Her set 7 ayrı kirişten oluşmaktadır. Her kiriş için sabit - serbest ve basit-basit sınır koşulları bakılmıştır. Çatlaklar her kiriş için bir uçtan diğer uca kadar eşit aralıklarla yedi ayrı lokasyonda

bulunmaktadır. İlk üç mod şekli, kirişlerdeki her çatlak için doğal frekans ve ölçülen ivme farkları deneysel olarak çalışılmıştır.

Kisa [15]; grafit elyaf takviyeli poliyamid malzemeden üretilen, çatlakların konsol kompozit bir kirişin dinamik karakteristik özelliklerine etkisini incelemiştir. Sonlu elemanlar yöntemi birleşik mod sentez metodunu kullanmıştır. Farklı konum ve bölgelere çatlak açarak etkisini incelemiştir. Çatlak konum ve derinliğinin, lif hacmine ve lif yönleneşine üzerine etkisini mod şekli ve doğal frekanslarını inceleyerek bakmıştır. Yapı içinde çatlakların varlığı ile mod değişimini ve doğal frekansta meydana gelen değişimi titreşim analizleri ile elde etmiştir.

Krawczuk vd. [16]; malzemesi grafit elyaf takviyeli poliyamid olan kiriş üzerinde çalışmışlardır. Enine yayılmış açık olmayan çatlaklı bir düz konsol kirişin doğal frekansı araştırılmıştır. Çalışmada iki farklı modelde kiriş incelenmiştir. İlk kirişte çatlak kütesiz ve yer değiştirme yayı ile, ikinci kirişte ise çatlak sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Yayların esnekliği kırılma mekaniği ve Castigliano teoremi ile hesaplanmıştır. Kirişlerin doğal frekanslarındaki değişimlerini çatlak konumu, çatlak derinliği, lif hacmi ve lif yönelimi gibi parametreler ile analitik olarak incelenmiştir.

Sutar [17]; düz konsol bir kiriş üzerine çatlak açarak, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak doğal frekans ve titreşim mod yapıları elde edilmiştir. Çatlak konumu ve çatlak derinliği ile doğal frekans arasındaki ilişkiye bakılmıştır. Alüminyum malzemeden yapılan kiriş kullanılmıştır. Analizlerde ALGOR yazılımı kullanılmıştır. Ankastre sınır şartlarında tek çatlaklı kiriş ile çalışmıştır.

Ramesh vd. [18]; sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gerilme, deformasyon ve frekans değişimlerini çatlaklı ve çatlak düz kirişler üzerinde incelemiştir. Çalışmada beş farklı malzeme (alüminyum, çelik, kevlar, yüksek dayanımlı karbon ve karbon fiber kullanılmıştır. Çatlaklı ve çatlaksız olarak analizler yapılmıştır ve ilk beş mod üzerinde çalışılmıştır. Doğal frekans ve yer değiştirmeleri incelemiştir. Alüminyumun doğal frekans değerleri ve kevların yer değiştirmesi diğer malzemelerden daha yüksek olduğu sonucunu elde etmişlerdir.

Jena vd. [19]; epoksi cam elyaf malzemedan yapılmış, düz bir kiriş üzerine çatlak açarak, çatlaklı titreşimlerin doğal frekans üzerinde etkisine bakmışlardır. Çalışma analitik, deneysel ve sayısal olarak yapılmıştır. Sabit konum ve değişen derinlik için ilk üç mod üzerinde çalışılmıştır. Çatlak ile beraber kirişin dayanımının azaldığını ve çatlak derinliği artarken doğal frekans değerlerinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Waghulde vd. [20]; çalışmalarda deneysel ve sonlu eleman yöntemi kullanarak çatlaklı ve çatlaksız kiriş modelleri üzerinde çalışmışlardır. Alüminyum malzemedan yapılan düz bir kiriş ile ankastre sınır şartı altında çalışılmıştır. Çatlak derinliklerini (2 mm, 6 mm ve 8 mm) ve çatlak konumunu (merkezde ve 0.25 L) değiştirerek doğal frekans üzerine etkisi incelenmiştir. İlk dört mod üzerinde deneysel olarak çalışılmıştır.

Karthikeyan vd. [21]; düz bir kirişte serbest ve zorlanmış titreşim cevaplarından kirişin çatlak konumu ve boyutu için yöntem geliştirmişlerdir. Bu method ile çatlak esneklik katsayısı bulunabilir. Timoshenko kiriş teorisi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile serbest ve zorlanmış titreşim analizleri yapmışlardır. Basit ve konsol kiriş modeli ile çalışmışlardır. Çatlak modelini kiriş yüzüne açılmış bir çatlak olarak ele almışlardır. Nümerik olarak çalışmalarına ekleme yapmışlardır. Çatlak konum ve boyutunun doğal frekans ve kuvvete cevabına bakmışlardır.

Chondros vd. [22]; alüminyum ve çelik düz kirişler olarak iki ayrı malzeme ile çalışmışlardır. Euler Bernoulli kirişi ile tek kenar ve çift kenar çatlaklar üzerinde çalışarak devamlı çatlaklı kiriş teorisini geliştirmişlerdir. Bir boyutlu kirişte farklı eşitlikler ve farklı sınır şartları geliştirmek için Hu-Washizu-Bar değişim eşitliklerini kullanmışlardır. Kirişte yer değiştirme ve gerilmeleri şekillendirmek için çatlak civarındaki yer değiştirmeleri kullanmışlardır. Toplu çatlaklı kiriş titreşim analizi ve devamlı çatlaklı kiriş titreşim teorisini geliştirmişlerdir.

Fernandez-Saez vd. [23]; basit desteklenmiş Euler Bernoulli kirişinin burulma titreşimleri için doğal frekansını değerlendirmişlerdir. Tek çatlaklı düz çelik kirişte çatlak konumunun (0.5L ve 0.75L) değişimi ile çalışmalar yapmışlardır. Çatlaklı

kirişin polinomial fonksiyonuna ekleme yapılarak çatlaklı kirişin enine sapsması geliştirilmiştir. Sınır ve kinematik koşulları sağlayan ve Rayleigh metodu ile kabul edilen bu fonksiyon ile temel frekans için kapalı form ifadeler elde etmişlerdir. Doğal frekans elde edebilmek için nümerik olarak çalışmışlardır. Çalışmalarında ABAQUS programını kullanmışlardır.

Bovsunovsky ve Matveen [24]; kapanan çatlaklı düz kirişlerin dinamik karakteristiklerini belirlemek için çalışmışlardır. Euler Bernoulli kiriş modelini kullanmışlardır. Bir kenarı kapalı çatlaklı Euler kirişin farklı dinamik karakteristikleri üzerine çatlak parametrelerinin etkisini belirleyecek analitik yaklaşımlarda bulunmuşlardır. Doğal frekans, mod şekilleri, yer değiştirme ve farklı bölgelerdeki geçişleri göz önüne alarak dinamik özellikler üzerine çalışmışlardır. Çatlak şiddetine ve çatlak modlarına etkisine bakmışlardır. Üç farklı malzeme (soğuk çekilmiş çelik, çelik alaşım ve titanyum alaşım) ile çalışmışlardır ve çatlak derinliğini, konumunu değiştirerek incelemeler yapmışlardır.

Khiem ve Lien [25]; çok çatlaklı düz kirişlerde doğal frekans analizleri için transfer matrisi metodu kullanmışlardır. Çok çatlaklı kirişlerin modellenmesini yaparken çatlakları dönebilen yaylar ile modellemişlerdir. Kullanılan bu metod rastgele sayıda çatlaklı bir kiriş için frekans eşitliğini vermiştir. Çalışmalar sonucunda çatlak pozisyonunun, konumunun, derinlik ve çatlak sayısının doğal frekansa etkisine bakmışlardır.

Saavedra ve Cuitino [26]; enine çatlaklı düz kirişin teorik ve deneysel olarak dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Buna ek olarak esneklik için lineer kırılma mekaniği teorisi tarafından gerilme enerjisi yoğunluğunu kullanarak çatlak çevresini incelemişlerdir. Doğrusal kırılma mekaniği teorisine yeni bir sertlik matrisi geliştirmişlerdir. Esnekliğe dayalı olarak elde edilen sertlik matrisini dinamik ve statik davranışları elde etmek için çatlak sistemi sonlu elemanlar yöntemi analizlerinde kullanmışlardır.

Zheng ve Kessiosoglou [27]; var olan kusurların üstesinden gelmek için çatlamanın varlığına bağlı olarak esnekliğin genel davranışını tanımlayan sağlam kirişin esneklik

matrisine karşılık gelen ek bir esneklik matrisi ekleyerek yeni sonlu elemanlar yöntemi formülleri türetmişlerdir. Bölgesel esneklik matrisi yerine genel esneklik matrisi kullanarak çatlaklı düz kirişin esneklik matrisi elde etmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak çatlaklı çelik kirişte doğal frekans ve mod şekilleri elde etmişlerdir. Gauss karesi yöntemini kullanarak nümerik hesaplamalar yapılmıştır. Sayısal ve analitik çalışmalar sonucunda doğal frekansı elde edilmiştir. Bunlara ek olarak daha doğru titreşim modları verebilen çatlak konumlarındaki yerel esneklik koşullarını mükemmel şekilde tatmin edebilen bir şekil fonksiyonu oluşturulmuştur.

Yang vd. [28]; çatlaklı kirişlerin titreşimleri boyunca dinamik yapı karakteristikleri üzerinde çatlakların etkisini belirlemek için enerji temelli nümerik metodlar geliştirmişlerdir. Devamlı bir sistem olarak iki veya tek çatlaklı düz dikdörtgenel bir kirişte enine titreşim eşitliği ve atalet momenti değişimini ele almışlardır. Tek ve iki çatlaklı alüminyum kirişler üzerinde basit ve ankastre sınır şartlarında çalışılmıştır. Çatlak konum ve derinliklerini değiştirerek ilk dört mod ele alınmıştır. Sonuç olarak çatlaklı yapılarda her modun bir alan oluşturduğunu ve her alanın modlarının farklı olduğunu bulmuşlardır. Bu alanların oluşumunu çatlak konum ve derinliklerinin oluşturduğunu bulmuşlardır. Çatlak konum ve boyutuna bağlı olarak doğal frekansın değişimini elde etmişlerdir.

Tarih ve Şakar [29]; çatlaklı düz tabakalı konsol kirişlerin titreşim analizlerini deneysel ve nümerik olarak çalışmışlardır. Sabit - sabit sınır şartları için doğal frekans ve mod yapıları incelemiştir. Kirişin çatlak derinliği (2 mm, 6 mm, 10 mm), çatlak konumu (10 mm, 80 mm, çatlaksız) çatlak sayısı (1 çatlak, 2 çatlak, 3 çatlak ve çatlaksız) ve kompozit yönlenme açılarını ( $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $90^\circ$  ve  $0-90^\circ$ ) değiştirerek titreşim doğal frekanslarına ve mod yapılarına bakmışlardır. İlk iki mod üzerinde çalışılmıştır. Çalışmaların sonucunda çatlak sayısı arttıkça kompozit kirişin doğal frekanslarının azaldığını ayrıca çatlak konumuna bağlı olarak frekansların değerlerinin değiştiği sonucu elde edilmiştir.

Sowjanya vd. [30]; düz konsol kirişin titreşim analizini ANSYS programı ile yapmışlardır. Çelik ve cam elyaf malzemeden üretilen kirişler ile çalışılmıştır. Farklı çatlak konumu (çatlaksız, 100 mm, 300 mm, 500 mm, 700 mm, 900 mm) ve farklı

çatlak derinliği (2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm, 10 mm ve 12 mm) ile analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Doğal frekans ve mod şekilleri belirlenmiştir. İlk on mod üzerinde çalışılmıştır. Sonuç olarak cam elyaf malzemedan yapılan kirişin doğal frekansının çelik malzemedan yapılan kirişten daha düşük, çatlaklı kirişin doğal frekansının çatlaksız kirişten daha düşük, çatlak konumunun doğal frekansı düşürdüğü ve çatlak derinliğinin doğal frekansı arttırdığı bulmuşlardır.

Biswal vd. [31]; çatlaklı ve çatlaksız kirişlerde doğal frekans ve mod şekillerini bulmak için sayısal ve analitik olarak çalışmışlardır. Çalışmalarda Timoshenko kiriş modeli kullanılmıştır. Kirişin doğal frekansları ve mod şekilleri MATLAB programı ve sonlu elemanlar yöntemi ile çalışarak bulmuşlardır. Piezoelektrik sensör ile çatlaklı ve çatlaksız kiriş için doğal frekans ve mod şekillerini incelemişlerdir. Çelik malzemedan yapılan basit destekli kiriş ile çalışmışlardır. “v” çatlak modeli kullanmışlardır. Doğal frekans değişimini farklı çatlak konumu ( $X_c/L = 0.20, 0.50, 0.60, 0.80$ ), farklı çatlak derinliğine ( $a/D = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ) göre ilk üç mod üzerinde çalışmışlardır. Sonuç olarak doğal frekansın çatlak konumu ve çatlak derinliğine bağlı olarak değiştiğini bulmuşlardır. Çatlaklı kirişte doğal frekans değerinin azaldığını görmüşlerdir.

Vamsi vd. [32]; teorik ve nümerik olarak çalışmışlardır. Çalışmalarında yatay serbest titreşim altında sabit - sabit sınır şartlarına sahip alüminyum düz kiriş ile ilk beş mod üzerinde çalışılmıştır. “u” çatlak modeli kullanılmıştır. Farklı çatlak derinliği (0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm, 0.4 mm) ve farklı çatlak konumuna (çatlaksız, 0.2 mm, 0.3 mm, 0.5 mm, 0.7 mm) sahip kirişler üzerinde doğal frekans ve mod değişimlerine bakmışlardır. Sonuç olarak çatlak varlığının kirişin dayanımına düşürücü yönde etki ettiği, çatlak derinliği artması ile doğal frekans değerinin düştüğü sonucu elde edilmiştir.

Ramachandran ve Ponnudurai [33]; ankastre sınır şartlarına sahip alüminyum malzemedan yapılmış düz kiriş ile analitik olarak çalışmışlardır. Çalışmalarda ANSYS paket programı kullanılmıştır. Sabit çatlak konumunda değişen çatlak derinliği (0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, 2.5 mm, 3 mm, 3.5 mm, 4 mm, 4.5 mm, 5 mm, 5.5 mm, 6 mm, 6.5 mm, 7 mm, 7.5 mm, 8 mm, 8.5 mm, 9 mm, 9.5 mm, 10 mm) ile doğal frekans ve mod şekillerini incelemişlerdir. İlk 5 mod üzerinde çalışılmıştır. Sonuç olarak çatlak

derinliđi artması ile dođal frekans deđerinin dűštűđű ve kiriř dayanımının azaldıđı sonucuna ulařılmıřtır.

Ghodke vd. [34]; yapı izerinde çatlak etkisini belirlemek için çalışmışlardır. Çalışmalarda ANSYS programı kullanılmıştır. atlaklı yapının fiziksel ve dinamik özelliklerine bakılmıştır. Titreřim analizlerinde aynı çatlak konumu için farklı çatlak derinliğinde (3 mm, 6 mm, 9 mm, 12 mm, 15 mm) sonuçlara bakılmıştır. elik ve alűminyum malzemededen yapılmış basit destekli I model kirişler ile çalışılmıştır. Sonuç olarak iki farklı materyal içinde doğal frekans değerleri ve mod şekilleri elde edilmiştir. Çeliđin doğal frekansının alűminyumdan daha yűksek olduğu ve çatlak derinliği arttıa doğal frekansın azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Quila vd. [35]; elik malzemededen yapılmıř ankastre- serbest sınır řartlarına sahip dűz çatlaklı ve çatlaksız kiriřler için titreřim analizi yapmıřlardır. alıřmalarını teorik ve analitik (ANSYS) olarak gerçekleřtirmiřlerdir. Çalıřmalarda Euler Bernoulli kiriři ve “v” çatlak modeli kullanılmıřtır. Farklı atlak konumu ( $X_c/L = 0.2, 0.3, 0.5$ ) ve farklı çatlak derinliđi ( $a/D = 0.1, 0.3, 0.5$ ) dikkate alarak titreřim izerinde etkisine, dođal frekans ve mod řekilleri deđiřimlerine bakılmıřtır. Çatlak varlıđının, çatlak konum ve çatlak derinliđini dođal frekans deđerini etkilediđi gűrűlműřtűr. Dođal frekans deđiřiminin mod yapısı izerine etkisi ve titreřimin en bűyűk etkisinin kiriř merkezine olduđu sonucuna ulařılmıřtır.

Sahu vd. [36]; ankastre sınır řartlarına sahip alűminyum malzemededen yapılmıř dűz kiriř için analitik özűm yapmıřlardır. Çatlak derinlik ve çatlak konumunu ana parametre olarak ele almıřlardır. atlaklı ve çatlaksız kiriřler için dođal frekans ve mod řekilleri incelemiřlerdir. Farklı atlak konumu (50 mm’den 600 mm’ye) ve farklı çatlak derinliđi (1 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm, 9 mm) ile çalıřmıřlardır. Çatlak varlıđının dođal frekans izerine etkisine bakmıřlardır. İlk ű mod ile çalıřmıřlardır. Simetrik çatlaklar için frekans deđerinin yaklařık olarak aynı olduđu sonucuna varmıřlardır. Çatlakların kiriř dayanımına dűřűrűcű etki ettiđini bulmuřlardır.

Jadhav vd. [37]; cam fiber malzemededen űretilen dűz bir kiriř için çatlaklı ve çatlaksız olarak çalıřmıřlardır. Çatlak konumu ve çatlak boyutunu deđiřtirerek dođal frekans ve

mod şekli üzerinde etkisine bakmışlardır. Deneysel ve analitik olarak çalışmalarını ilk üç mod ile gerçekleştirmişlerdir. Farklı çatlak konumu (çatlaksız, 60 mm, 80 mm, 120 mm, 180 mm, 240 mm) ve farklı çatlak derinliği (0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm, 0.4 mm, 0.5 mm) için titreşim sonuçlarına bakmışlardır, doğal frekans ve mod şekillerini incelemişlerdir. Sonuç olarak çatlak varlığının doğal frekansı azalttığını bulmuşlardır. Çatlak sabit noktaya yaklaştıkça doğal frekans değerinin azaldığı görülmüştür.

Chaudhari ve Potil [38]; çatlaklı ve çatlaksız alüminyum malzemeden yapılmış konsol bir kirişin sonlu elemanlar yöntemi ile titreşim analizlerini yapmışlardır. İlk olarak Euler denklemlerini kullanarak teorik olarak ilk 3 mod için doğal frekans değerlerini elde etmişlerdir. İkinci olarak statik ve modal analizi yaptılar yer değiştirme ve doğal frekansı buldular. Analizlerde ANSYS paket programı kullanılmıştır. 100 mm, 200 mm konumunda 1 mm ve 2 mm derinliklerde çatlaklar ile çalışılmıştır. Sonuç olarak çatlak varlığı ve sabit derinlikte çatlak mesafesi artarsa doğal frekans değerinin arttığı bulunmuştur.

### **2.3. Çatlaklı Eğri Kirişler Üzerine Yapılan Çalışmalar**

Öz ve Daş [39]; dairesel eğri kirişlerin düzlem içi titreşimlerini çalışmışlardır. Euler Bernoulli kiriş modeli kullanılmıştır. Kiriş üzerinde yatay bir çatlak açarak sabit eğim (20 °) açısında çatlak konum (0.095 m, 0.195 m, 0.295 m) ve derinlikleri ( 0.22mm, 0.44mm, 0.66mm) değiştirerek doğal frekansa etkisine bakmışlardır. Çalışmalar deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi analizleri ile yapılmıştır.

Nobile [40]; eğri kirişler için S teorisini kullanmıştır. S teorisi ile eğri kirişlerde karışık mod çatlak büyümesi üzerinde çalışmıştır. Eğri kirişler için mod I, mod II ve karışık mod ile çalışmıştır. Radyus üzerinde yer alan çatlak için eğri kirişte yaptığı çalışmalarını mod I, mod II ve karışık mod için değerlendirmiş ve çatlak ilerlemesini incelemiştir. Çatlaklı kompozit kirişlerin yaklaşık olarak gerilme yoğunluğu faktörünü hesaplamıştır.



Toygar vd. [41]; kompozit eğri sandviç kirişler için serbest titreşim ve gerilme analizleri yapmışlardır. Cam elyaf ve vinil ester reçine ile istenilen özelliklerde malzemeler üretilmiştir. Deneysel ve nümerik titreşim analizleri yapmışlardır. Eğri kompozit kirişlerde kök ve yatayda yer alan farklı konumlarda çatlakların gerilme dağılımı ve kirişte eğilme yüklemesi üzerine sayısal çalışmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme ve burulma yüklemesini, FFT analizleri ile de doğal frekansı incelemişlerdir.

Daş ve Yılmaz [42]; çatlaklı eğri dairesel kompozit kirişlerin titreşim analizlerini analitik olarak incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada ek olarak çelik malzeme ile kıyaslama da eklemişlerdir. Farklı konum (95 mm, 195 mm, 295mm) ve farklı derinliklerde (0.33 mm, 0.66 mm, 0.99 mm) çatlaklar için ilk üç mod yapılarına ve doğal frekans değerleri üzerinde çalışmışlardır.

#### **2.4. Çatlaksız Eğri Kirişler Üzerine Yapılan Çalışmalar**

Yoon vd. [43]; yatay eğri I kirişli köprülerin titreşim analizlerini bir sonlu eleman formülasyonu ile sunmuşlardır. Nümerik ve analitik olarak çalışılmıştır. Çalışmalarda FORTRAN ve ABAQUS programları kullanılmıştır. Eğri kiriş elemanını Kang ve Yoo ince duvarlı eğri kiriş teorisinden türetmişlerdir. Farklı eğrilik açıları ( $10^\circ$  ve  $90^\circ$ ) incelenmiştir. Eğri ve düz kirişler için sertlik ve kütle matrisleri formülize edilmiştir. Serbest titreşim analizi yapmak için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Düzlem içi ve düzlem dışı olarak doğal frekans değişimlerine bakılmıştır. Pek çok sayıda örnek yaparak çalışma kapsamlı hale getirilip geçerlilik kazandırılmıştır.

Savita vd. [44]; deneysel ve analitik olarak eğri kirişlerin titreşim cevapların farklı koşullarda incelemişlerdir. Çalışmalarında orta sertlikte çelik kiriş ve çelik kaplama kiriş kullanmışlardır. Yatay titreşim için eğri kirişlerde sabit sınır şartlarında farklı sönümlenme (sönümsüz, az sönümlü, orta sönümlü ve sönümlü) koşullarında doğal frekans değerlerine bakmışlardır. Elektronik devre ve şerit kaydedici ile alınan sonuçlar MATLAB programına aktarılmıştır. Sonuç olarak farklı sönümlenme

koşullarında frekans değerlerine bakılmıştır ve sönümsüz titreşim için en yüksek değerlere ulaşılmıştır

Awall vd. [45]; yatay eğri metal I destekli kirişlerde sonlu elemanlar metodunu kullanarak üç boyutlu titreşim analizi yapmışlardır. Serbest titreşim karakteristikleri üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalar deneysel ve analitik olarak yapılmıştır. Analitik çalışmalarda ANSYS paket programı kullanılmıştır. Dikey titreşimler, burulma titreşimler ve hem dikey hem burulma titreşimleri ilk üç mod alınarak çalışılmıştır. Sönümleme olmaksızın mod şekilleri ve doğal frekansları incelenmiştir. Sonuç olarak eğri kirişlerin dış yükler ile kolaylıkla titreşebileceği ve düşük burulma dayanımına sahip olduğu bulunmuştur.

Baba [46]; farklı açılara sahip sandviç yapılı kompozit kirişlerin titreşim analizlerini çalışmıştır. Değişken açılarda kirişler için sabit - sabit sınır şartlarını kullanmıştır. İncelemeler sonucunda kirişlerin doğal frekans ve mod yapılarını elde etmiştir. Çalışmasında, ABAQUS programını kullanmıştır. Sayısal ve deneysel incelemelerden faydalanmıştır.

**Çizelge 2. 1.Literatürde yapılan çalışmaların sınıflandırılması**

Malzeme				Analitik &FEM& Sayısal	Deneysel
Metal	Düz	Çatlaklı	Mia vd.	X	
			Gori vd.	X	
			Douka vd.	X	
			Orhan	X	
			Satpute vd.	X	
			Owolabi vd.	X	X
			Sutar	X	
			Ramesh vd.	X	
			Waghulde vd.	X	X
			Karthikeyan vd.	X	X
Chondros	X				
Fernandez vd.	X				
Bovsunovsky ve Matveen	X				
Khiem ve Lien	X				
Zheng ve Kessisoğlu	X				
Yang vd.	X				
Sowjanya vd.	X				
Biswal vd.	X				
Wamsi vd.	X				
Ramachandran vd.	X				
Ghodke vd.	X				
Quila vd.	X				
Sahu vd.	X				
Chaudhai vd.	X				
Metal	Düz	Çatlaksız	Kamble vd.	X	X
			Chogule vd.		X
			Imran vd.	X	
			Raj vd.	X	
			Kumar vd.	X	
			Vaziri vd.	X	
			Mia vd.	X	
			Gori vd.	X	
			Satpute vd.	X	
			Sutar	X	
Ramesh vd.	X				
Waghulde vd.	X				
Sowjanya vd.	X	X			
Biswal vd.	X				
Wamsi vd.	X				
Quila ve ark.	X				
Sahu vd.	X				
Cahudhai vd.	X				
Metal	Eğri	Çatlaklı	Öz ve Daş	X	
			Toygar vd.	X	
		Daş ve Yılmaz	X		
	Çatlaksız	Yoon vd.	X		
	Soute vd.	X			
	Awall vd.	X	X		
Kompozit	Düz	Çatlaklı	Vaziri vd.	X	
			Krawczuk vd.	X	
			Jena vd.	X	X
			Ramesh vd.	X	X
	Tarih ve Şakar	X			
	Sowjanya vd.	X			
	Jadhav vd.	X	X		
	Düz	Çatlaksız	Ramesh vd.	X	X
Tarih ve Şakar			X	X	
Sowjanya vd.			X		
Jadhav vd.			X	X	
Eğri	Çatlaklı	Nobile	X		
		Daş ve Yılmaz	X		
Eğri	Çatlaksız	<i>Mevcut Çalışma</i>	X	X	
		Baba	X	X	

Kiriş yapılarla ilgili çalışmalara bakıldığında genel olarak düz çatlaklı konsol kirişler ve düz çatlaksız konsol kirişler üzerinde çalışıldığı görülmektedir. Malzeme olarak metal malzemeler ağırlıklı olarak çalışılmıştır. Yapılacak olan çalışmanın kompozit olması, sabit - sabit ve ankastre gibi farklı sınır şartlarında çalışılacak olması, farklı çatlak konumu (0.095 mm, 0.195 mm ve 0.295 mm), farklı çatlak derinlikleri ( çatlaksız, 0.3 mm, 0.6 mm, 0.9 mm) üzerinde çalışılmış olması ve eğri kiriş modeli olması sebebiyle özgünlük taşımaktadır. Literatürde çalışmalar incelendiğinde çatlaklı eğri kompozit kirişler üzerine yapılan çalışmalar çok az olduğu görülmektedir. Bu sebeple çalışmanın; deneysel olarak kompozit ve eğri kirişler üzerine olmuş olması çalışmaya farklı ve önemli bir çalışma niteliği kazandırmaktadır. Bu durum dikkat alındığında çalışmanın inceleme ve araştırmaya yatkın olduğu düşünülmüştür.



### 3. KOMPOZİT MALZEMELER VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ

#### 3.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler; iki veya daha fazla sayıda, aynı veya farklı grupta yer alan malzemelerin makroskobik olarak bir araya gelmesiyle birbirlerinin zayıf yönlerini tamamlayarak birbirlerinin en iyi yönlerini yansıtacak şekilde oluşturulan malzemelerdir. Genel olarak bileşimlerinde yer alan malzemelerden daha iyi mekanik ve kimyasal özelliklere sahiptirler. Bir matris ve bir de takviye malzemedan meydana gelmektedirler. Üretilen kompozit malzeme tasarlanırken kullanım alanlarına ve ihtiyaca göre matris takviye bileşimi ayarlanarak istenilen özelliklerde malzeme üretilir. Bu nedenle günümüzde yaygın olarak kullanıma sahiptirler [47, 48].

Teknolojinin gelişmesi ile sanayide ilerlemeler sürekli değişim göstermektedir. Mevcut ilerlemeleri yakalayabilmek, oluşacak sorunlara cevap bulabilmek ve ihtiyaçları karşılayabilmek için yeni malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Kompozit malzemeler ilerleyen teknoloji ve gelişen endüstri ile havacılık, denizcilik, kara taşımacılığı, sportif ürünler, enerji sektörü, altyapı uygulamaları ve uzay teknolojilerinde istenilen özelliklere uygun malzeme üretimine imkan vermektedir. Geniş kullanım yelpazesine sahip olan bu malzemelerin avantaj ve dezavantajları mevcut olup buna yönelik kullanım imkanı sunmaktadır.

Kompozit malzemeler sahip olduğu yüksek dayanım, rijitlik, hafif olması, yüksek yorulma dayanımı, yüksek aşınma direnci, yüksek korozyon direnci, istenen yönde ısı ve termal özellikler, estetik görünüm gibi avantajlarının yanında malzemenin sahip olduğu daha yüksek maliyet, işleme güçlükleri, geri dönüşümün genellikle olmayışı kırılma uzamasının az olması ve üretim zorluğu gibi dezavantajları da bulunmaktadır.

### 3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin kesin bir sınıflandırması mevcut olmasa da genel bir ayırım mevcuttur. Bu tür sınıflandırmayı da yapılarında bulundurdıkları içerik belirlemektedir [47].

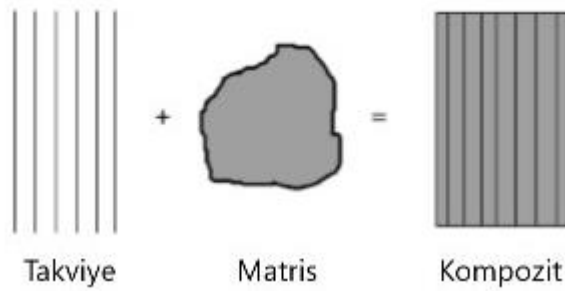
Kompozit malzemelerin sınıflandırılması;

- a) Elyaf takviyeli kompozit malzemeler,
- b) Parçacık takviyeli kompozit malzemeler,
- c) Tabakalı kompozit malzemeler,
- d) Karma (hibrit) kompozit malzemeler şeklinde olduğu bilinmektedir.

### 3.3. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan malzemeleri matris ve takviye malzeme olarak ayırabiliriz.

Matrisler yapı içerisinde yer alan ana fazdır. Matrisler takviye elemanını bir arada tutmak, takviye elemanlarına yükü dağıtmak ve darbe gibi dış etkilerden takviye elemanını korumak üç temel görevi üstlenirler. Takviye eleman ise yapının ikincil fazını oluşturur. Matris yapı içerisinde yer alarak dayanım ile rijitliği sağlar.

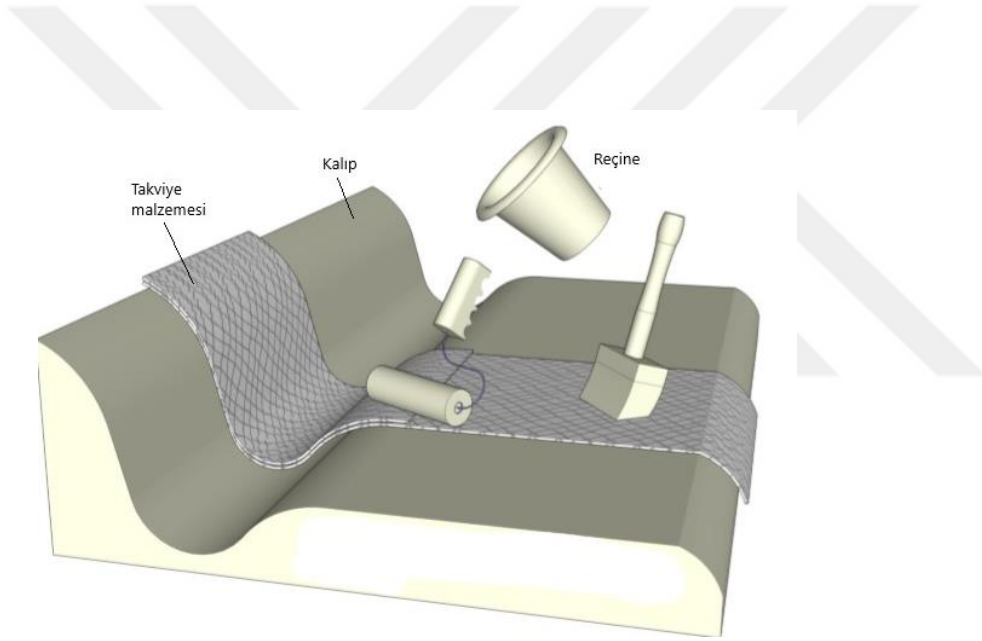


Şekil 3. 1. Kompozit malzeme oluşumu [49]

### 3.4. Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

#### 3.4.1. El İle Yatırma Yöntemi

En kolay ve en ucuz üretim yöntemidir. Üretilecek malzemeye uygun bir kalıp belirlenir. Kalıp yüzeyi temizlenerek kalıp ayracı (jelkot) sürülür. Elyaf lar uygun ölçülerde kesilerek kalıba serilir ve elyaf üzerine reçine ilave edilerek rulo veya merdane ile homojen dağılım elde edilir. Uygun malzeme kalınlığı elde edilene kadar bu işlem her katta tekrarlanır. Daha sonra 12-24 saat kadar malzemenin sertleşmesi beklenir.

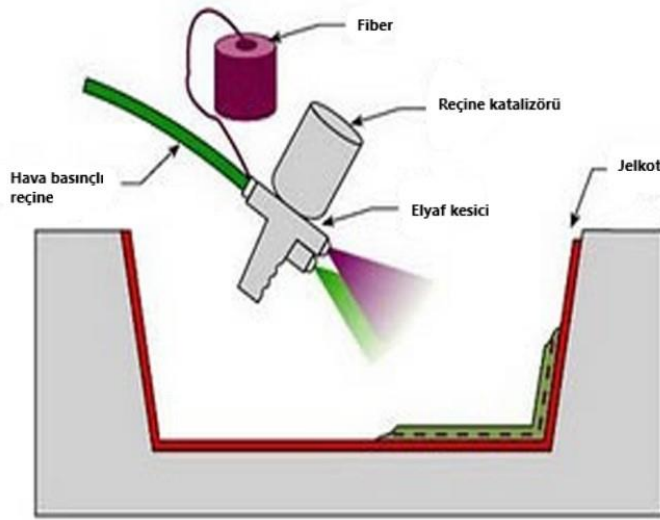


Şekil 3. 2. El ile yatırma yöntemi [50]

#### 3.4.2. Püskürtme Yöntemi

Elle yatırma yönteminin aletli şekli olarak kabul edilir. Kalıba kalıp ayracı sürülür. Kırpılmış elyaf lar kalıp yüzeyine içinde reçine olan özel bir tabanca ile püskürtülür. Elyaf kırılma işlemi tabanca üzerinde yer alan kırpıcı ile gerçekleşir. İstenilen kalınlık

elde edilene kadar püskürtme işlemi devam eder. Püskürtme tamamlandıktan sonra yüzey bir rulo ile düzeltilerek ortam şartlarında katılaşmaya bırakılır.

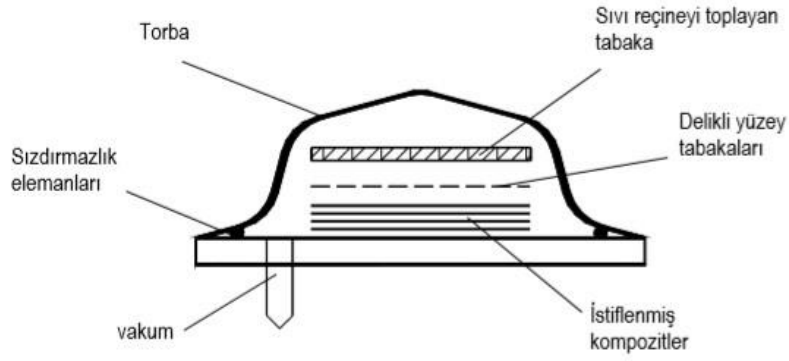


Şekil 3. 3. Püskürtme yöntemi [47]

### 3.4.3. Vakum Torba Kalıplaması Yöntemi

Vakumlu torba kalıplama da elle kalıplamanın gelişmiş bir şeklidir. Büyük ve karmaşık şekilli parça üretiminde kullanılır. Kompozit malzemeler vakum tablasına konularak üzerine reçine sürülür. Reçine tüm yüzey üzerine yayılarak 15 dakika kadar emmesi beklenir. Vakum torbası kenarları kapatılarak vakum sistemine bağlanır ve basınç ile torba içindeki havanın emilmesi sağlanır.

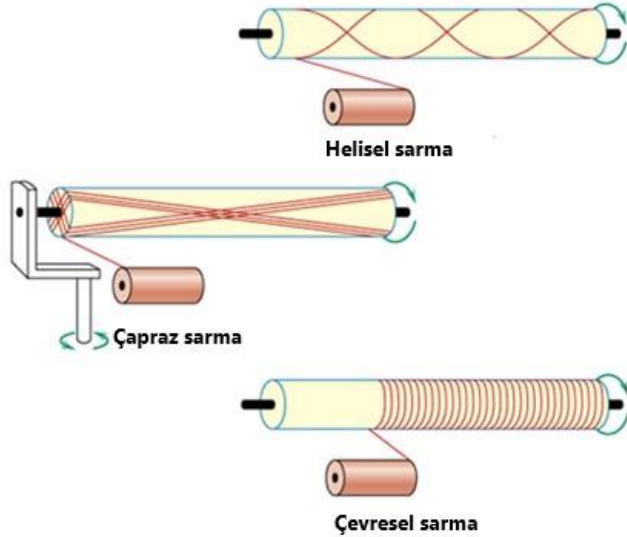




**Şekil 3. 4.** Vakum torba kalıplaması yöntemi [47]

### 3.4.4. Elyaf Sarma Yöntemi

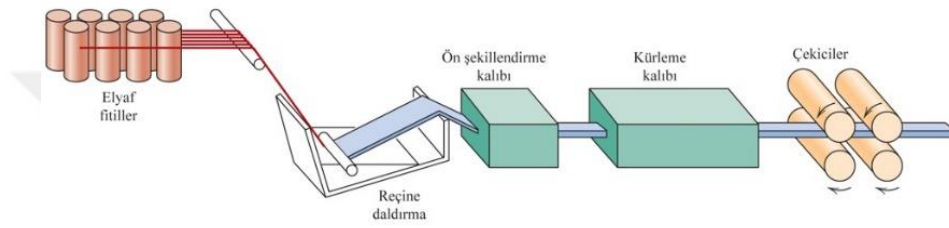
Özel biçime sahip üretim yöntemidir. Sürekli elyaf liflerinin bir reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek, dönen bir kalıp üzerine sarılmasıdır. Genellikle silindirik malzeme imalatında kullanılır. Sarım işlemi belirli açılarla gerçekleşir.



**Şekil 3. 5.** Elyaf sarma yöntemi [51]

### 3.4.5. Profil Çekme Yöntemi

Metallerin ekstrüzyonuna benzer bir yöntemdir. Daha çok boru ve çubuk profillerin üretiminde kullanılır. Sistemde yer alan sürekli takviye malzemesi (elyaflar) içi reçine dolu bir reçine tankından geçirilerek ön şekillendirme kalıbında fazla reçinesi alınır. Şekillerinin kalıcı olması için ısıtılmış şekillendirme kalıbında bekletilerek sertleşmesi sağlanır.



Şekil 3. 6. Profil çekme yöntemi [51]

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Kalıpların Hazırlanması

Kalıp malzemelerin üretimi işleri Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İmalat Atölyesinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de gösterilen kalıplar çelik malzemeden yapılmıştır. Kalıp için kesilen metaller 850 x 40 mm ölçülerinde kesilmiştir. Her kalıptan iki adet kiriş elde edecek ve üretilecek kompozitlerin kenarlarındaki atık malzemeler çıkarılacak şekilde genişlik ayarlaması yapılmıştır. Hazırlanmış metaller silindir tezgahında bükülerek eğri form kazandırılmış ve ölçüleri yapılmıştır. Eğri halini alan kalıplarda kullanım sonrası deformasyon, bozulma ve ölçüden sapmaları önlemek için destekler konularak kaynaklar ile desteklenerek kalıplar son şeklini almıştır.



**Şekil 4. 1.** Silindirde bükülmüş ve destekleri kaynatılan kalıpların genel görünümü

## 4.2. Deney Numunelerinin Üretimi

### 4.2.1. Elyafların Hazırlanması

İlk olarak Şekil 4.2’de görülen cam elyaf dokuma kumaşı 850 x 40 mm ölçülerinde kesilmiştir. Elyaflar elyaf kesme makası aracılığıyla kesilmiştir.



**Şekil 4. 2.** Cam elyaf

Cam elyaf dokuma kumaşı kalınlığı yaklaşık olarak 0.13mm aralığında değişmektedir. Kullanılan cam elyaf ince örgülü dokuma kumaşı olarak seçilmiş olup, elyaf yönlenme açısı 0° ve 90° dir. Kirişler 3.00 mm kalınlıkta olacak şekilde her bir kiriş için 20 adet cam elyaf dokuma kumaşı elyaf kullanılmıştır.



**Şekil 4. 3.** Cam elyafların kesilmesi

#### 4.2.2. Reçinenin Hazırlanması

Matris malzemesi olarak bilinen reçine epoksi ve sertleştirici olarak iki ayrı malzemenin karışımından meydana gelir. Şekil 4.4’ de reçinenin hazırlanışı gösterilmektedir.



**Şekil 4. 4.** Reçinenin hazırlanması

Karıştırılacak olan sertleştirici ve epoksi üzerinde karışım oranları yazmaktadır. Mevcut sertleştiricinin uygun olduğu epoksi alınarak 40 /100 oranlarında 100 gr karışım için 40 gr sertleştirici katılarak üretilecek kompozit miktarına göre karıştırılır.

Reçine karışımı hassas terazi yardımıyla epoksi ve sertleştirici tartıldıktan sonra el ile karıştırılarak hazırlanır.

#### 4.2.3. Elyafların Serilmesi

Elyaf tabakalı kompozit malzeme üretimi Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kompozit Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Üretim için el ile serme yöntemi kullanılmıştır. Kalıplar hazırlandıktan sonra alt ve üst kalıp yüzeyleri kalıp yüzey temizleyicisi ile temizlenmiş ve yüzey temiz hale getirilmiştir. Daha sonra kalıp yüzeylerine kalıp ayırıcı sürülmüştür. Kalıp ayırıcı malzemeyi kalıptan ayırırken parçalanmaları önlemek ve kalıptan çıkarmayı kolaylaştırma amacıyla kullanılmaktadır. Kirişler için kesilen elyaflar ve reçine hazırlanmıştır. Şekil 4.5'te gösterildiği gibi elyaflar kalıba serilmektedir.



**Şekil 4. 5.** Elyafların kalıba serilmesi

Kalıba serilen cam elyaf üzerine reçine dökülerek her tarafa eşit yaymak için rulo kullanılır. Bu işlem her elyaf tabakasında yinelenerek devam etmektedir. Her kiriş 20 tabakadan oluşmaktadır. Serme işlemi tamamlandıktan sonra üst kalıpta kapatılarak

araya uygun kalınlığı sağlayabilmek için destekler yerleştirilip mengene ile sabitlenerek sertleşmeye bırakılmıştır. Sertleşme 12-24 saat kadar sürmektedir.



**Şekil 4. 6.** Elyaf serme sonrası sertleşmeye bırakılan kalıplar

Sertleşme süresi kadar beklendikten sonra kalıplardaki mingeneler çıkarılır ve kirişler kalıptan ayrılır. Şekil 4.7’de kalıp yüzeyinden ayrılmış kirişler verilmiştir.



**Şekil 4. 7.** Kalıptan ayrılan kirişler

Kalıptan çıkarılmış olan kirişlerin kenarları çapaklıdır. Çapaklar zımpara ile temizlenir. Düzenli ve temiz kenarlar elde etmek için ve temizleme işlemi tamamlandıktan sonra kiriş ölçülerinde kesilerek üretim tamamlanır. Her kalıptan iki

adet kiriş elde edilecek şekilde üretim yapılmıştır. Şekil 4.8' de üretimi tamamlanmış kirişler gösterilmiştir.



**Şekil 4. 8.** Üretimi tamamlanmış kirişler

#### **4.2.4. Kiriş Yüzeyinde Çatlakların Açılması**

40 x 850 mm boyutlarında kesilerek üretimi tamamlanan kirişler üzerine deneyler için çatlak açılması gerekmektedir. Kirişler çok ince yapılardır ve üzerine açılacak çatlakların konumları deney sonuçları için önemlidir. Bu sebeplerle kirişlerin öncelikle düz bir yüzey üzerine sabitlenerek çatlak konumları işaretlenerek belirlenmiştir. Çatlak konumları belirlendikten sonra kirişler çatlak açmak için hazır hale gelmiştir. Kiriş üzerine çatlaklar, imalat atölyesinde yer alan konvansiyonel freze tezgahında açılmıştır. 0.5 mm'lik freze ucu ile çatlaklar 0.095 mm, 0.195 mm ve 0.295 mm konumlarında, 0.3 mm, 0.6 mm ve 0.9 mm derinliklerde en düşük devir ve ilerleme ile açılmıştır. Şekil 4.9'da çatlaklı eğri kompozit kiriş ve çatlak bölgesi gösterilmiştir.





**Şekil 4. 9.** Çatlaklı eğri kompozit kiriş

## 5. ÇATLAKLI EĞRİ KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM ANALİZLERİ

### 5.1. Sayısal Analiz (Sonlu Elemanlar Yöntemi)

Sonlu elemanlar yöntemi karmaşık problemlerin basitleştirilmesi, alt problemlere bölünerek parça parça çözülmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Yapılan basitleştirme ve parçalara ayırma ile elde edilen sonuçlar bileştirilerek ana problem çözümüne ulaşılır. Piyasada sıklıkla kullanılan sonlu elemanlar yöntemi gerçek çözüme yakın sonuçlar vermesi sebebiyle mühendislik problemlerinde kolaylık sağladığı için tercih edilmektedir [47].

Titreşim problemleri, yapısal analiz türü olarak ele alınmaktadır. Yapıların titreşim anında kütle ve direngenliği o yapının doğal frekansını oluşturmaktadır. Titreşim anında yapıda meydana gelen salınımlar ile yer değiştirmeler oluşmaktadır. Oluşan yer değiştirme miktarlarının kaydedilerek grafik haline getirilmesi ile mod yapısı oluşturulur. Bu sebeple titreşimin nasıl oluştuğu ve sonucunda oluşan etki, mod yapısı ve frekans değerleri için önemlidir.

Bu çalışmasının bir çözüm basamağı olarak sonlu elemanlar yöntemine başvurulmuştur. Farklı sınır şartlarında, çatlakın konumu ve derinliği değiştirilerek sonuçlar irdelenmiştir. Çatlaklı eğri kirişin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlemesine katı model oluşturularak başlanmıştır. Üç boyutlu katı modelde “u” çatlak şekli kullanılmıştır [32]. Kirişin katı modeli Solid Works programı ile eğrilik yarıçapı  $R = 2.864$  m, uzunluğu  $L = 0.795$  m, kalınlığı  $d = 3.00$  mm ve çatlak genişliği  $0.5$  mm olacak şekilde oluşturulmuştur. Farklı çatlak konumu ve derinlikleri için katı model üzerinde değişiklik yapılmıştır. Kiriş katı modeli ve çatlak bölgesi Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



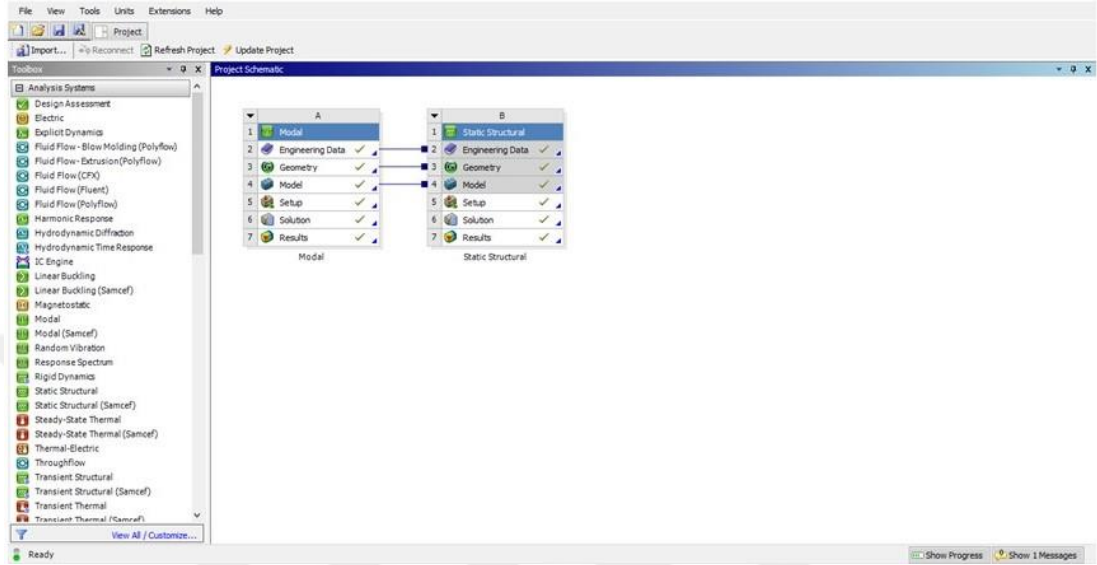
**Şekil 5. 1.** Çatlaklı eğri kiriş ve çatlak bölgesinin katı modeli

Kiriş üzerine sonlu elemanlar metodu ile titreşim uygulanarak sonuçlar farklı konumda ve derinlikte çatlak modeli için kullanılmıştır. Çalışmalarda yaygın olarak kullanılması sebebiyle, çatlaklı eğri kompozit kirişin doğal frekansının hesaplanmasında sabit - sabit ve ankastre sınır şartları için titreşim analizleri yapılmıştır. Kirişin genel özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

**Çizelge 5. 1.** Kiriş özellikleri

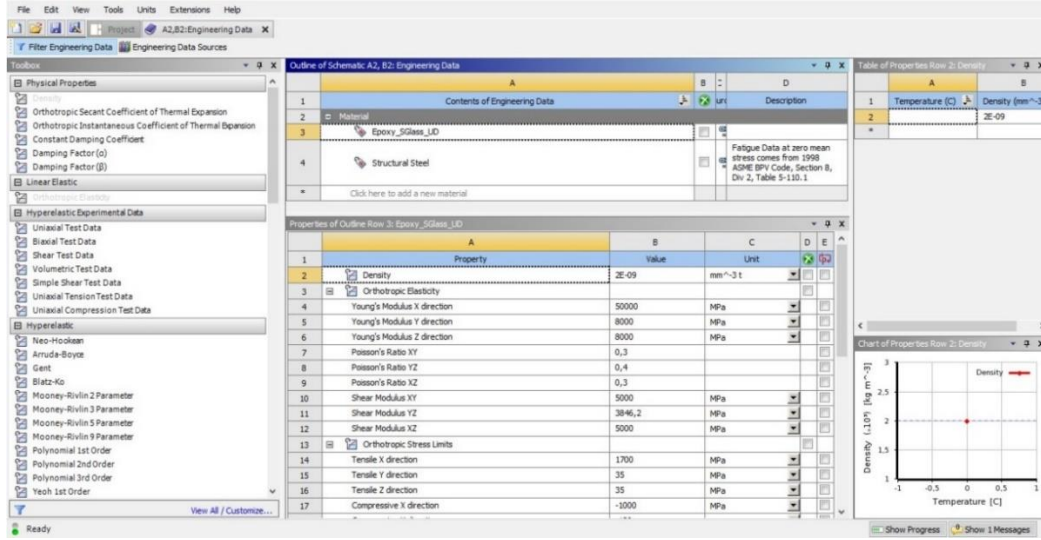
Parametre	Değişkenler
Çatlak Derinliği, d (mm)	$h/10, 2h/10, 3h/10$
Çatlak Konumu, Lc (m)	$0.095*L, 0.195*L, 0.295*L$
Kiriş Genişliği, b (mm)	16
Kiriş Kalınlığı, h (mm)	3
Alan, b*h (mm <sup>2</sup> )	48
Eğrilik Açısı, $\gamma$	15°
Sınır Koşulları	Sabit - Sabit Ankastre
Malzeme	Cam Elyaf
Yoğunluk, $\rho$	2000 kg/m <sup>3</sup>
Elastik Modülü, E	$E_{xx} = 1700 \text{ MPa}$ $E_{yy} = 35 \text{ MPa}$ $E_{zz} = 35 \text{ MPa}$

Analizlerde, ANSYS paket programı kullanılmıştır. Program içerisinde yer alan analiz sistemlerinden titreşim çalışmalarında kullanılan modal analiz ve yapısal analiz kullanılmıştır. Şekil 5.2’de gösterilen analiz sistemleri seçilerek analize başlanılmıştır.



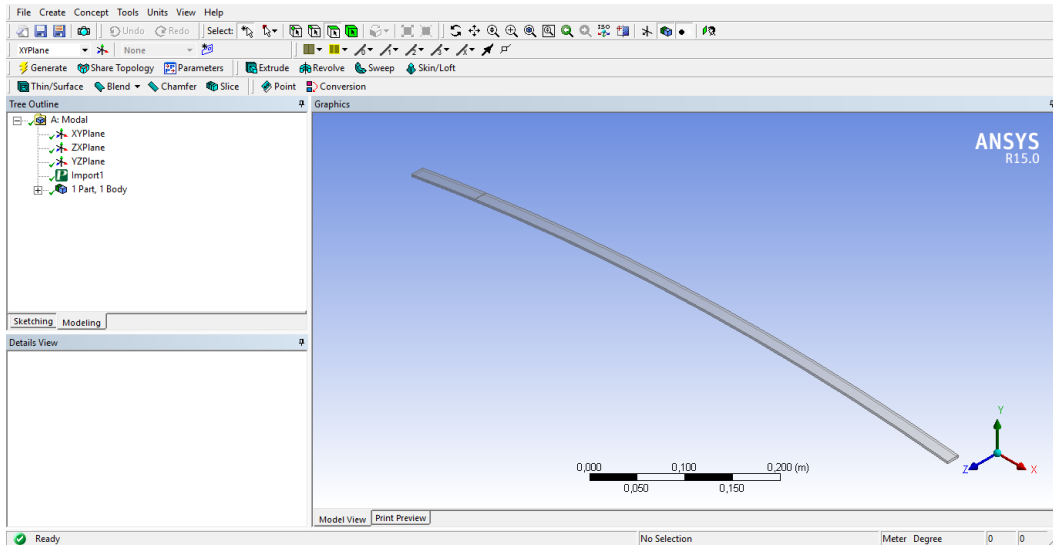
Şekil 5. 2. Analiz sistemlerinin seçilmesi

Modal analiz başlığı altında yer alan “Engineering Data” malzeme kütüphanesi olup buradan analizde kullanacağımız malzeme seçimi yapılmaktadır. Şekil 5.3’de malzeme tanımlaması gösterilmiştir.



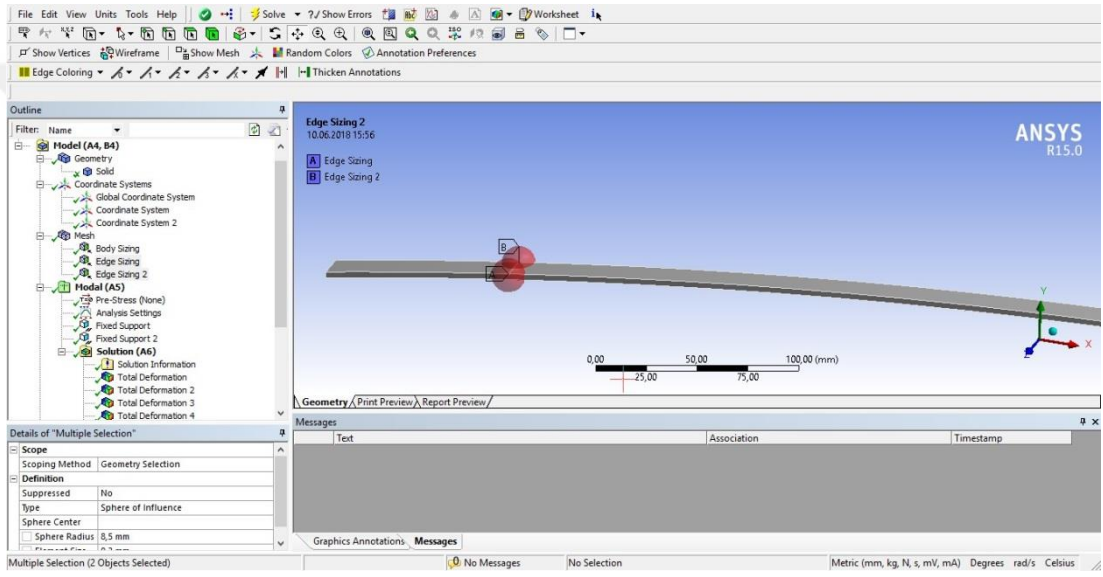
Şekil 5. 3. Malzemenin seçilmesi

Malzeme seçimi tamamlandıktan sonra geometri kısmından analizde kullanılacak olan geometri için “Geometry” bölümünden analiz edilecek numune alınarak “Modal” kısmından analizlere geçiş yapılır. Model kısmında analiz için ağ yapısı oluşturulur, uygun sınır şartları verilir ve sonuçlar alınır. Şekil 5.4’de seçilen geometri gösterilmiştir.

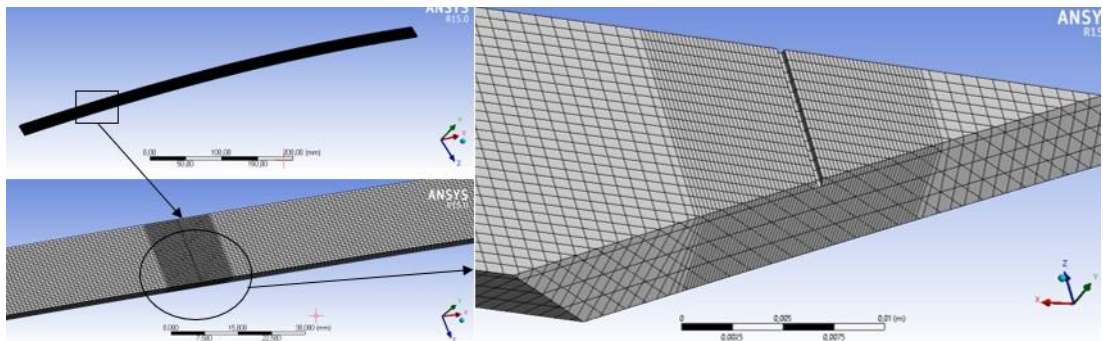


Şekil 5.4. Geometrinin seçilmesi

Öncelikli olarak kiriş ağ yapısı oluşturulur. Modelin çatlak içermesi nedeniyle tüm kiriş boyu ve çatlaklı bölge farklı ağ yoğunluğunda modellenmiştir. Katı model için kare ağ yapısı kullanılmıştır. Katı model için kare ağ yapısı kullanılmıştır. Mevcut ağ yapısı oluşturulurken ANSYS paket programı içerisinde ağ başlığı altında yer alan ‘body sizing’ tüm kirişe uygulanmıştır. Çatlak bölgesi için çatlak genişliğine uygun olarak ağ başlığı altında yer alan “Edge Sizing - Sphere of Influence” uygulanmıştır. Şekil 5.5’te çatlak bölgesi için ağ yapısının oluşturulması ve Şekil 5.6’da ağ yapısı gösterilmiştir.

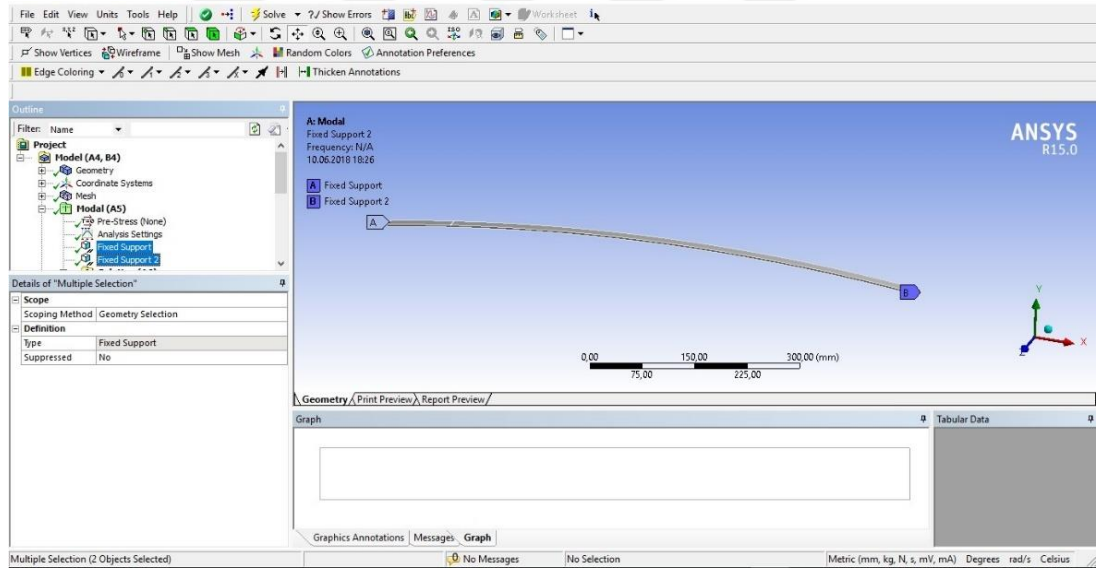


Şekil 5.5. Çatlak bölgesinin ağ yapısının oluşturulması

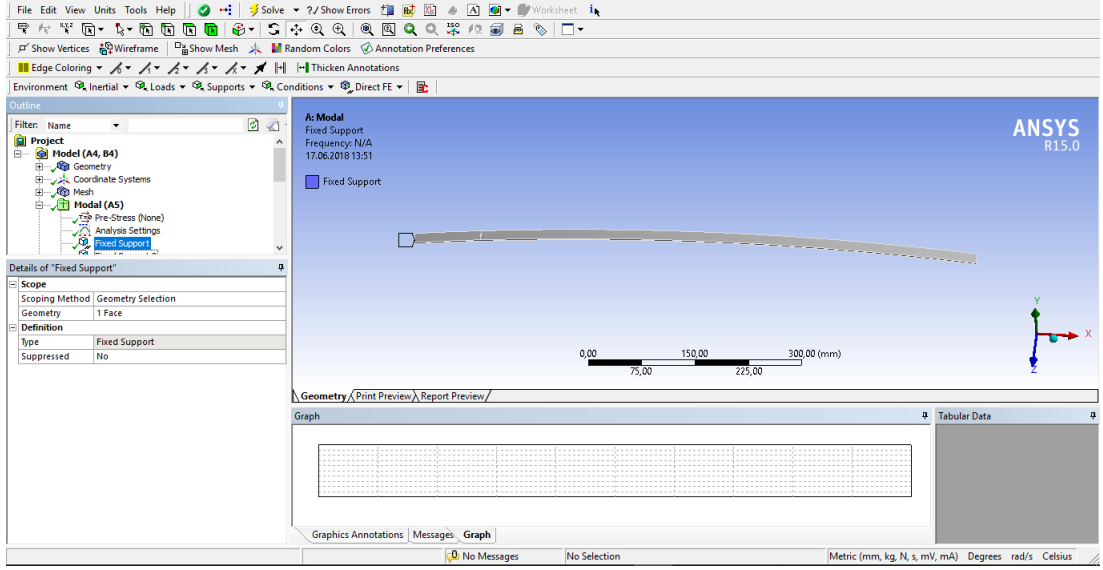


Şekil 5.6. Çatlaklı eğri kirişin ve çatlak bölgesinin ağ yapısı

Çatlaklı eğri kiriş için ağ yapısı oluşturulurken düğüm sayısı ve eleman sayısı deneme yöntemi ile belirlenmiştir. Denemelerde yaklaşık olarak 1000 – 500000 düğüm sayısı ve 100 - 100000 eleman sayısı elde edilmiştir. Frekans değişimleri düğüm noktası ve eleman sayısı arttıkça doğal frekanstaki değişim değerinin virgülden sonra bin, on bin ve yüz bin mertebesinde değiştiği analiz sonuçlarında görülmektedir. Sonuç olarak frekans değerlerinde bir değişim görülmeyen ve değerlerin istikrarlı olarak devam ettiği noktada analiz için gerekli düğüm sayısı ve eleman sayısı kabulleri yapılmıştır. Düğüm sayısı ortalama 450000, eleman sayısı 95000 belirlenerek analizlerde kullanılmıştır. Çatlaklı eğri kiriş için ağ yapısı oluşturulduktan sonra “Modal” başlığında yer alan sınır şartları ve analizde alınacak sonuçlar belirlenilir. Sınır şartları için literatürde sıklıkla tercih edilmesi sebebiyle sabit - sabit (fixed - fixed support) ve ankastre (fixed support) olarak çalışma yapıldı. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de sınır şartları tanımlaması gösterilmiştir.

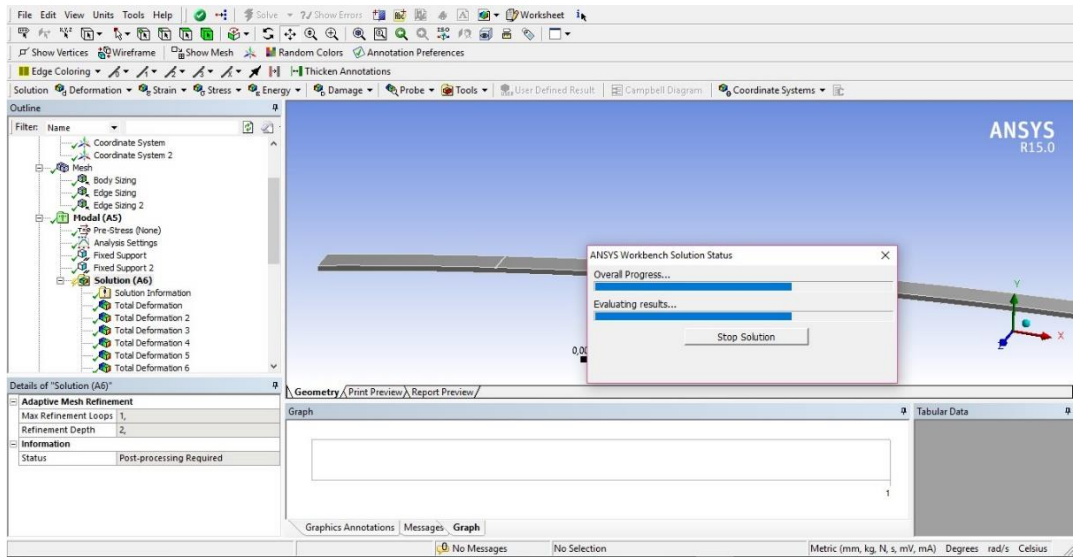


Şekil 5. 7.Sabit - sabit sınır şartlarının tanımlanması



Şekil 5. 8. Ankastre sınır şartlarının tanımlanması

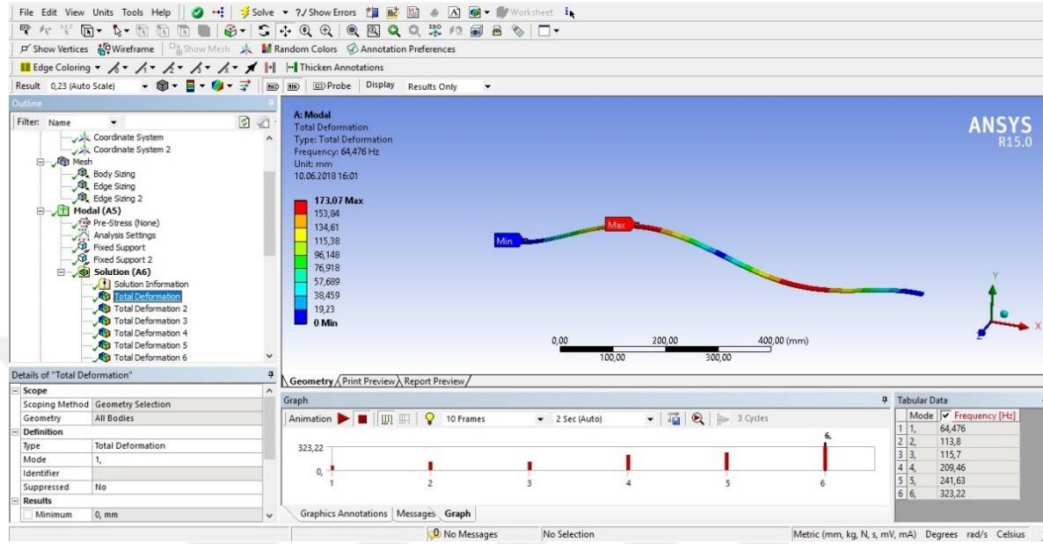
Sınır şartları tanımlandıktan sonra çözümlene için “Modal” başlığından “Analysis Settings” kısmından çözümlenmede kullanılacak mod sayısı girilerek “Solution” başlığından çözümlenmeye geçilir. Şekil 5.9’da çözümlenme gösterilmiştir.



Şekil 5. 9. Analizin yapılması



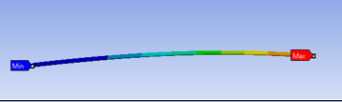
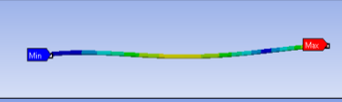
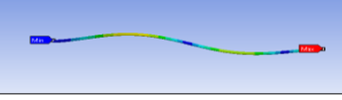
Analizler yapıldıktan sonra her sonuç için “Solution” başlığı altında yer alan total deformasyonlara bakılarak her mod için frekans değerleri ve mod şekli alınarak sonuçlar kaydedilir. Şekil 5.10’da analizlerden elde edilen mod şekli verilmiştir.



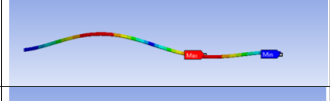
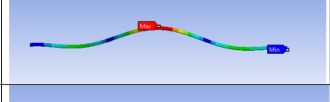
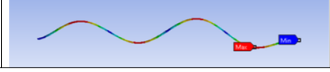
Şekil 5. 10.Mod şekilleri ve frekans değerlerinin oluşturulması

## 5.2. Sayısal Analiz Sonuçları

Çatlaklı eğri kompozit kiriş için farklı sınır şartlarında ( sabit - sabit ve ankastre), farklı konumlarda (0.095 m, 0.195 m, 0.295 m) ve farklı derinliklerde ( $h/10$ ,  $2h/10$ ,  $3h/10$  ) için yapılan sayısal çalışmada elde edilen sonuçlara bu bölümde yer verilmektedir. Ayrıca yapılan çalışmaya ek olarak çatlaksız eğri kompozit kiriş için sabit - sabit ve ankastre sınır şartlarında çalışmalar yapılarak sonuçlar çatlaklı eğri kompozit kiriş ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de ilgili kirişlerin her iki sınır şartı için analizi sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri ve mod şekilleri sırasıyla gösterilmiştir.

Lc (m)	Mod	h=3mm	
		Freq(Hz)	
0.795	Mod1	3.8505	
	Mod2	23.881	
	Mod3	67.217	

**Şekil 5. 11.**Çatlaksız eğri kompozit kirişin ankastre sınır şartlarında mod şekli ve doğal frekans değerleri

Lc (m)	Mod	h=3mm	
		Freq(Hz)	
0.795	Mod1	67.287	
	Mod2	118.31	
	Mod3	127.47	

**Şekil 5. 12.**Çatlaksız eğri kompozit kirişin sabit - sabit sınır şartlarında mod şekli ve doğal frekans değerleri

Yapılan çalışmada toplamda 20 adet analiz yapılarak, ilk üç mod incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar çatlaklı ve çatlaksız eğri kompozit kirişlerde çatlak konumunun, çatlak derinliğinin ve farklı sınır şartlarının kiriş mod şekline ve doğal frekansına etkisini göstermektedir. Ankastre sınır şartlarına sahip çatlaklı eğri kompozit kiriş için alınan sonuçlar Şekil 5.13 ve sabit - sabit sınır şartlarına sahip çatlaklı eğri kompozit kiriş için alınan sonuçlar Şekil 5.14'de verilmiştir.

$L_c$ (m)	d	h/10		2h/10		3h/10	
		Mod	Freq (Hz)		Freq (Hz)		Freq (Hz)
0.095	Mod1	3.8480		3.5848		3.5643	
	Mod2	23.87		22.942		22.9120	
	Mod3	67.221		64.751		64.751	
0.195	Mod1	3.5980		3.5907		3.5800	
	Mod2	22.9640		22.9620		22.9580	
	Mod3	64.714		64.613		64.463	
0.295	Mod1	3.5992		3.5957		3.5890	
	Mod2	22.9530		22.9240		22.8720	
	Mod3	64.717		64.638		64.490	

Şekil 5. 13.Çatlaklı eğri kompozit kirişin ankastre sınır şartlarında mod şekli ve doğal frekans değerleri

$L_c$ (m)	d	h/10		2h/10		3h/10	
		Mod	Freq(Hz)		Freq(Hz)		Freq(Hz)
0.095	Mod1	67.287		64.476		64.475	
	Mod2	118.300		113.800		113.750	
	Mod3	127.460		115.700		115.600	
0.195	Mod1	64.439		64.337		64.187	
	Mod2	113.790		113.680		113.520	
	Mod3	115.770		115.770		115.760	
0.295	Mod1	64.441		64.357		64.201	
	Mod2	113.830		113.790		113.710	
	Mod3	115.770		115.750		115.700	

Şekil 5. 14.Çatlaklı eğri kompozit kirişin sabit - sabit sınır şartlarında mod şekli ve doğal frekans değerleri

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’de sunulan değerler kirişlerde frekans değerlerinin düğüm noktalarındaki değişimlerin genel görünümü ve düğüm noktalarındaki doğal frekans değerlerinin değişimini göstermektedir. Analiz sonuçları genel olarak incelendiğinde, literatürde yapılan düz çatlaklı ve eğri çatlaklı kiriş çalışmalarında gözlemlendiği gibi doğal frekansların derinlik arttıkça azaldığı, ancak derinlik konumu sabit noktadan uzaklaştıkça doğal frekans değerinin çoğunlukla arttığı görülmektedir. Fakat bu sonucun genelleştirilemediği elde edilen sonuçlar arasındadır [17, 52]. Sabit - sabit sınır koşulundaki kirişlerde doğal frekans değerlerinin Ankastre sınır koşuluna göre arttığı görülmektedir. Doğrulamak için elde edilen sonuçlar literatürdeki değerler ile karşılaştırıldığında, çatlaksız eğri kiriş ve çatlaklı düz kirişlerin titreşim değerleri elde edilen doğal frekans değerleriyle, çatlak derinliğine bağlı değişen doğal frekans değer değişimlerinin birbirlerine benzer bir davranış gösterdiği görülmektedir [17, 28, 46, 52]. Ayrıca çatlaklı eğri kompozit kirişin doğal frekans değerleri çatlak derinliği ve çatlak konumu bakımından incelendiğinde azaldığı görülmektedir. Bu durum çatlaksız eğri kiriş için incelendiğinde doğal frekans değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

### **5.3. Deneysel Analiz**

Titreşim deneyleri bir yapı, sistem veya parçanın doğal frekans değerleri, sönüm, mod şekli, yapı üzerinde meydana gelen etki, dayanıklılık gibi özellikleri elde edilir ve farklı yollardan yapılan çözümlerde elde edilen sonuçların karşılaştırılıp doğrulanmasında kullanılır.

Deneysel çalışmada incelenen parça üzerine ivmeölçerler yerleştirilir, parça üzerine bir çekiç veya kuvvet uygulayıcı bir araç ile yük uygulanarak veriler toparlanarak kayıt altına alınarak elde edilen değerler işlenir. Elde edilen sonuçlardan transfer fonksiyonu (FRF) elde edilmektedir. Bu şekilde yapının dinamik karakteristik özelliklerinin belirlenir [2].

Çalışmalarda elde edilen veriler gerçek çözümü oluşturduğu için çok önemlidir. Her zaman sayısal sonuçlar ile tamamen uyuşmamaktadır. Bu da çalışma ortamı, imalat

sorunları, deney yapan kişi, deneysel ekipmanlar, numunenin bağlama şekli, ivmeölçer ağırlıkları, uygulanan yük ve gürültü kaynaklı olabilmektedir [53].

FRF yapı üzerinde meydana gelen hız, ivme ve yer değiştirme etkilerini bize vermektedir. Bu da yapının dinamik karakter özelliklerini, mod şeklini ve doğal frekans özelliklerini bize vermektedir. FRF fonksiyonu yapının üzerine uygulanan kuvvete karşı verdiği tepkisi gösterir [53].

Bu bölümde deneysel analizde kullanılan ekipmanlar, deneylerin yapılışı ve deney sonucunda elde edilen sonuçlar verilmiştir. 0.795 m aktif uzunluğa sahip 3 mm kalınlıkta ve 16 mm genişlikte eğrilik yarıçapı 2.864 m olan eğri kompozit kiriş için sabit - sabit ve ankastre sınır şartında 0.095 m, 0.195 m ve 0.295 m konumlarında, 0.3 mm, 0.6 mm ve 0.9 mm derinliklerinde yer alan çatlaklar ile bir önceki başlıkta ANSYS ile yapılan sayısal çalışma bu bölümde de deneysel olarak tekrarlanmıştır. Şekil 5.15’de deneyde kullanılan numuneler verilmiştir.

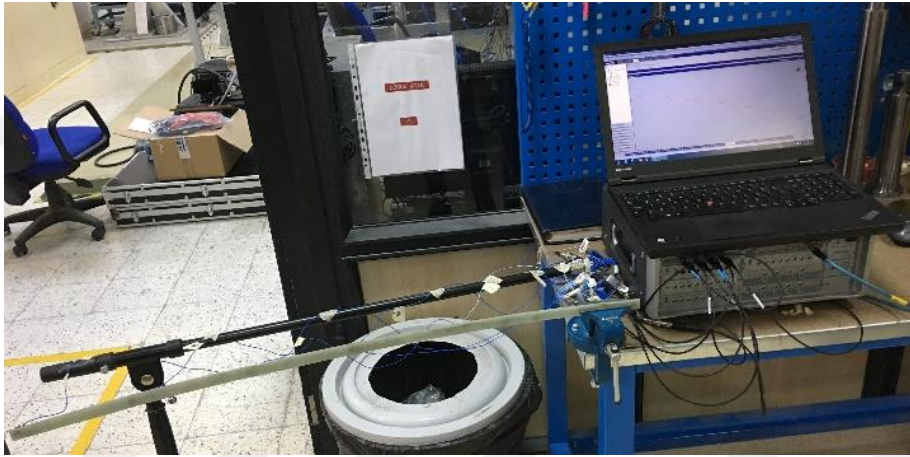


**Şekil 5. 15.**Deneyler için üretilen kirişler

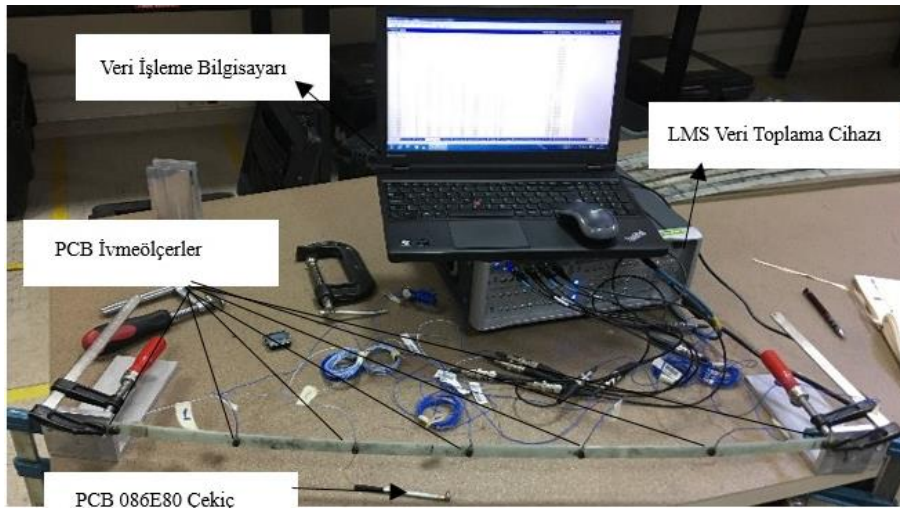
### **5.3.1. Deney Düzenegi**

Deneysel çalışmada çatlaklı eğri kompozit kiriş için sabit - sabit ve ankastre sınır şartlarında mod şekilleri ve ilk üç doğal frekans değeri elde edilmiştir. Şekil 5.16 ve 5.17’de gösterilen deney düzenekleri; ivmeölçerler, veri toplama sistemi, bir minyatür çekiç ve bir veri işleme bilgisayarından oluşur. İvmeölçer; incelenen numunenin titreşim analizinde kullanılan, titreşim şeklindeki verileri, elektrik akımı veya voltaja dönüştüren ve ölçümünde kullanılan aygıtlardır. Veri toplama sistemleri;

ivmeölçerden topladıkları analog elektrik sinyallerini dijitalle çeviren ve titreşim yazılımı bulunan bilgisayara aktaran cihazlardır. Darbe çekici; titreşim deneylerinde incelenen numunenin uyarılması için kullanılan parçadır. Veri işleme bilgisayarı; özel yazılımlar aracılığıyla, gelen verilerin analiz işleminin yapılabilmesi ve görsel incelemenin gerçekleşmesi için toplanan verilerin aktarıldığı bilgisayardır [2]. Bunlara ek olarak yapıştırıcı; ivmeölçerlerin deney numunesine sabitlenmesinde kullanılır. Mengene; incelenen parçayı sabitlemek için kullanılır.



Şekil 5. 16. Ankastre sınır şartı için deney düzeneği



Şekil 5. 17. Sabit-sabit sınır şartı için deney düzeneği


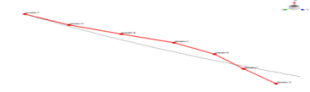
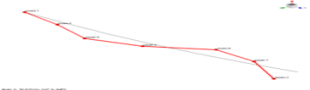
LMS Scada kaydedici veri toplama sistemi için kullanılır. LMS laboratuvar testi 14A darbe testi ölçüm yazılımı verileri işlemek için kullanılır. PCB 352A24 tek eksenli ivmeölçer kiriş üzerine sabitlenir ve kiriş üzerinden titreşim anında sinyalleri alır. PCB 086E80 minyatür çekiç, darbe kuvvetini çatlağa yakın bir noktaya uygulamak için kullanılır. Mengene yani sabit noktadan sonra kirişin aktif uzunluğu 795 mm'dir. Veri işleme için sunulan 3 boyutlu model, eğrilik açısı ve yazılımdaki kirişin yarıçapı cinsinden tanımlanır. İvmeölçerler sınır koşullarını karşılamak için eşit aralıklarla yerleştirilir ve mavi vax ile yapıştırılır. Deneysel olarak yapılan çalışma sırasında, aynı özellikteki üç kiriş üzerinden ölçümler alınmış olup, verilerin incelenmesi sonrasında ortalama değerleri kullanılmıştır.

### 5.3.2. Deneysel Analizde Dikkat Edilmesi Gerekenler

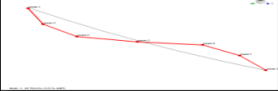

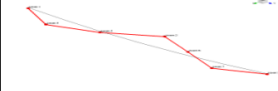
- Kiriş modeli program üzerinde aktif uzunluk, yarıçap, ivmeölçer konumları ve sınır koşulları olarak tanımlanmıştır.
- Kirişler aktif uzunluk mesafesini aşmadan mengene ile sabitlenmiştir.
- İvmeölçer ağırlıkları programda ihmal edilerek sonuçlar kaydedilmiştir.
- İvmeölçerler eşit aralıklar ile yerleştirilmeli ve verilerin doğruluğu açısından sabitlenmesine dikkat edilmiştir.
- İvmeölçerlerin kabloları kiriş üzerinde titreşime engel olmayacak ve bir sönüm oluşturmayacak şekilde sabitlenmiştir.
- Çekicinin aynı şiddetle ve aynı konuma vurulmasına özen gösterilmiştir.
- Her deneyde en az üç kez vurularak veriler kaydedilmiştir.
- Ortamda koşulları dikkate alınmıştır.

### 5.4. Deneysel Analiz Sonuçları

Çatlaklı eğri kompozit kiriş testlerine başlamadan önce, her iki destek koşulunda ( ankastre, sabit - sabit ) doğal frekanslar ve mod şekilleri deneysel olarak çatlaksız eğri kompozit kiriş için yapılmıştır. Çatlaksız eğri kompozit kiriş için deneysel analizden elde edilen ortalama sonuçlar sırasıyla Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da gösterilmiştir.

Lc (m)	Mod	h=3mm	
		Freq (Hz)	
0.795	Mod1	3.2542	
	Mod2	19.7277	
	Mod3	56.9470	

**Şekil 5. 18.**Çatlaksız eğri kompozit kirişin ankastre sınır şartlarında mod şekli ve doğal frekans değerleri

Lc (m)	Mod	h=3mm	
		Freq(Hz)	
0.795	Mod1	49.7624	
	Mod2	70.4306	
	Mod3	80.5649	

**Şekil 5. 19.**Çatlaksız eğri kompozit kirişin sabit - sabit sınır şartlarında mod şekli ve doğal frekans değerleri

Yapılan deneysel analiz sonucunda çatlaklı eğri kompozit kiriş için farklı çatlak konumu ve farklı çatlak derinliklerinde ilk üç mod için doğal frekans değerleri ve mod şekli elde edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 5.20' de ankastre ve Şekil 5.21'de sabit - sabit sınır şartları için verilmiştir.



Lc (m)	d		h/10		2h/10		3h/10	
	Mod	Freq.(Hz)		Freq.(Hz)		Freq.(Hz)		
0.095	Mod1	3.2891		3.3406		3.0607		
	Mod2	20.3716		20.3860		19.1792		
	Mod3	60.9690		58.3188		54.2741		
0.195	Mod1	3.2591		3.3831		3.3518		
	Mod2	19.6562		19.5717		19.0677		
	Mod3	55.8143		62.0191		55.3181		
0.295m	Mod1	3.7033		3.2616		3.7443		
	Mod2	22.8088		18.4492		21.1370		
	Mod3	64.5228		53.0982		58.5704		

Şekil 5. 20. Ankastre sınır şartı için çatlaklı eğri kompozit kirişin deneysel mod şekilleri ve doğal frekans değerleri

Lc (m)	d		h/10		2h/10		3h/10	
	Mod	Freq (Hz)		Freq (Hz)		Freq (Hz)		
0.095	Mod1	50.1348		51.4851		48.4747		
	Mod2	67.2615		70.0559		72.3785		
	Mod3	73.4207		80.3938		77.4445		
0.195	Mod1	49.0714		49.5393		49.7055		
	Mod2	58.8968		69.2271		81.1741		
	Mod3	80.3986		77.4363		91.3774		
0.295	Mod1	53.6659		48.6119		49.8565		
	Mod2	70.3156		66.7322		80.5646		
	Mod3	82.7132		80.1942		90.5538		

Şekil 5. 21. Sabit - sabit sınır şartı için çatlaklı eğri kompozit kirişin deneysel mod şekilleri ve doğal frekans değerleri

Sonuçlar incelendiğinde mod şekillerinin benzer olduğu ancak frekans değerlerinin değiştiği görülmektedir. Çatlak derinliğine bağlı olarak düzlem içi titreşimlerde eğimde değişim gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, doğal frekans değerlerindeki değişiklik, konum ve çatlak derinliği için her modda benzer şekilde olmadığı değerlendirilmiştir. Mod 1 ve Mod 2 için,  $L_c = 0.095$  m'de, çatlağın derinliği arttıkça, frekans değerleri ilk olarak arttığı sonra azaldığı görülürken, mod 3 için sadece azalış gözlenmiştir. Bu duruma bakılarak doğal frekansın değişimi önceki çalışmalarla kıyaslandığında benzer sonuçların var olduğu görülmüştür [16, 18, 19, 39, 40, 52]. Sonuçlara bakıldığında doğal frekans değerlerinin, çatlak derinliği ve çatlak konumunda meydana gelen değişikliklerden etkilendiği görülmektedir. Bununla beraber, sayısal analiz ile deneysel sonuçlar arasında ki en büyük farklılığın, kırıların üretimsel hataları ve çatlaklar oluşturulurken kesilen katmanların değişiminin de mod şeklini ve doğal frekans değerlerini etkileyebileceğidir. Şekil 5.20 ve Şekil 5.21 incelendiğinde mod şekilleri genel olarak görülmektedir. Doğal frekans değerlerinin değişimi düğüm noktalarından çıkarılabilir. Deney sonuçlarına göre, mod şekilleri beklendiği gibi elde edilmiştir. Buna ek olarak, çatlağa yakın noktalara daha fazla ivmeölçer kullanılabilsen mod şekillerinin daha net elde edilebileceği deneysel sonuçlarda görünmektedir.

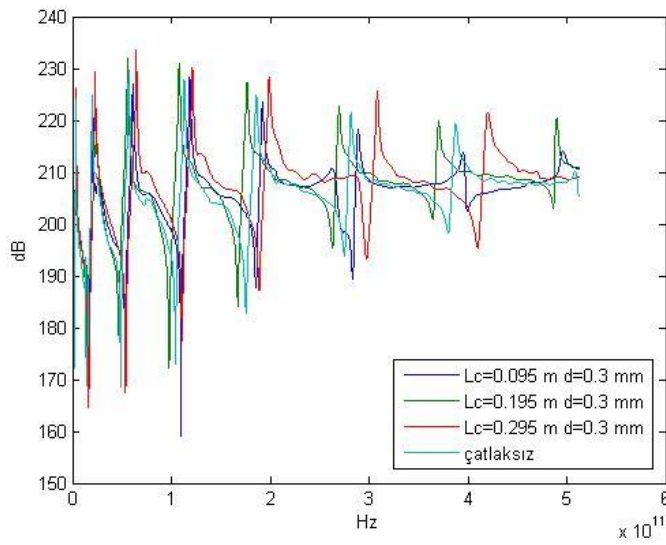
Ankastre sınır şartı için, doğal frekans değerleri çoğunlukla çatlak derinliği arttıkça azalmıştır ancak Sabit - sabit sınır şartı için, doğal frekans değerleri Mod 1 hariç, Mod 2 ve Mod 3 için çatlak derinliği arttıkça artmıştır. Çalışma sonucunda toplanan veriler incelendiğinde, çatlaklı eğri kompozit kırı için ankastre ve sabit - sabit sınır şartları için farklı çatlak derinliği ve farklı çatlak konumlarına bağlı olarak frekans tepki fonksiyonu (FRF) grafikleri elde edilmiştir.

Dikey eksen, “dB” cinsinden genliği, yatay eksen ise “Hz” cinsinden frekansı temsil etmektedir. FRF grafiklerinde tepe noktalarına bakıldığında deney numunesinin doğal frekans değerleri ile mod şekilleri elde edilmiştir. Bu da numunelerin titreşim altında dinamik karakteristik özelliklerini göstermektedir.

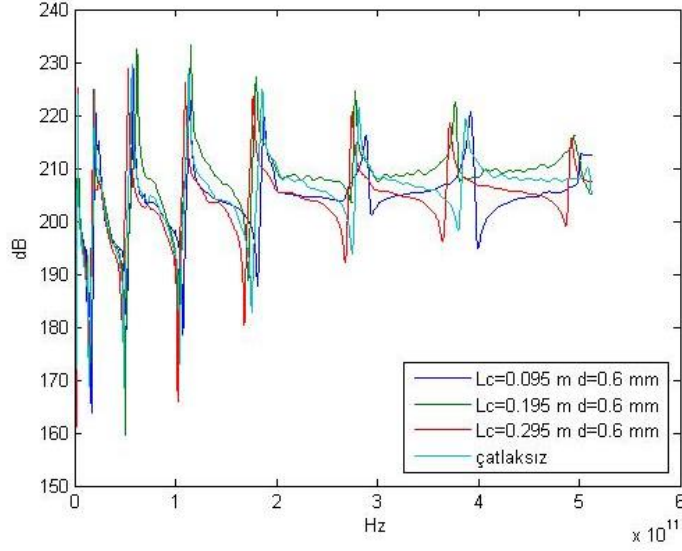
Doğal frekans değerindeki artış çoğunlukla sertlik değeriyle de ilişkilidir. Bu durum, çatlak bir destek noktası (kırışın sabit ucu) gibi davrandığında ortaya çıkar. Kırışın

uzunluğu kısaltılmış gibi hareket ettiğinde, sertlik değeri artar, bu da doğal frekansın artmasına neden olur. Bazı durumlarda, frekans değerinin çatlak derinlik değişimlerine göre arttığı gözlemlenmiştir. Daha sonra farklı çatlak yeri ve derinliği için doğal frekans dşuşu görülür.

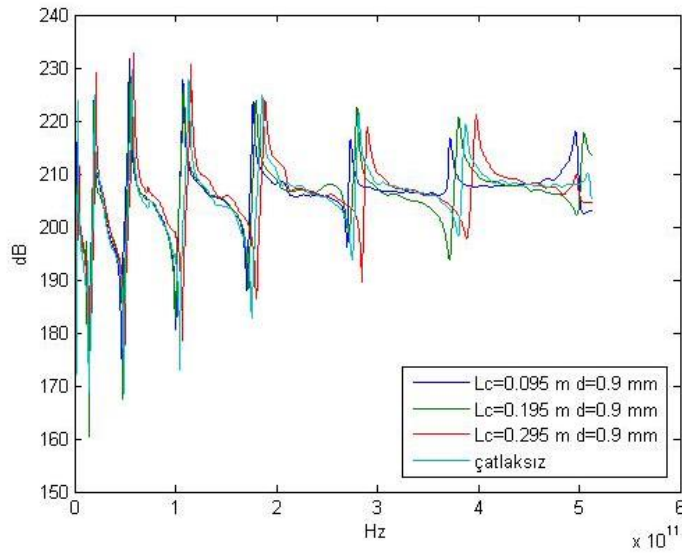
şekil 5.22, şekil 5.23 ve şekil 5.24'de ankastre sınır şartlarına sahip farklı çatlak konumları için aynı çatlak derinliğinde ki doğal frekans değişim grafikleri verilmiştir.



**şekil 5. 22.** Ankastre sınır şartlarında  $d= 0.3\text{mm}$  çatlak derinliklerinde eğri kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

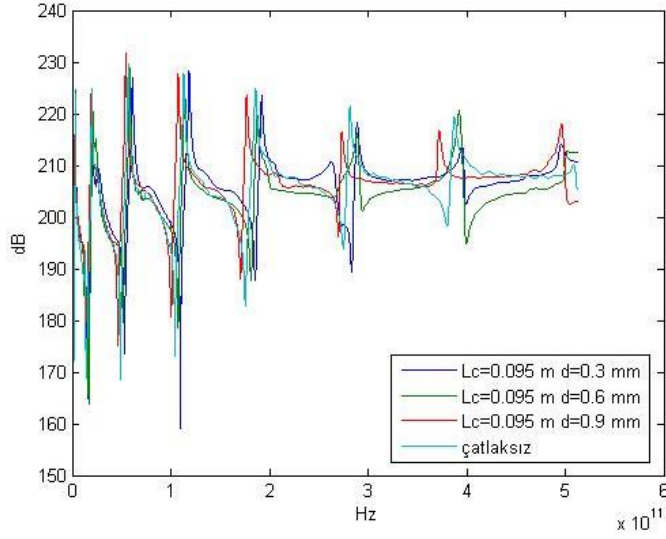


**Şekil 5. 23.** Ankastre sınır şartlarında  $d= 0.6\text{mm}$  çatlak derinliklerinde eğri kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

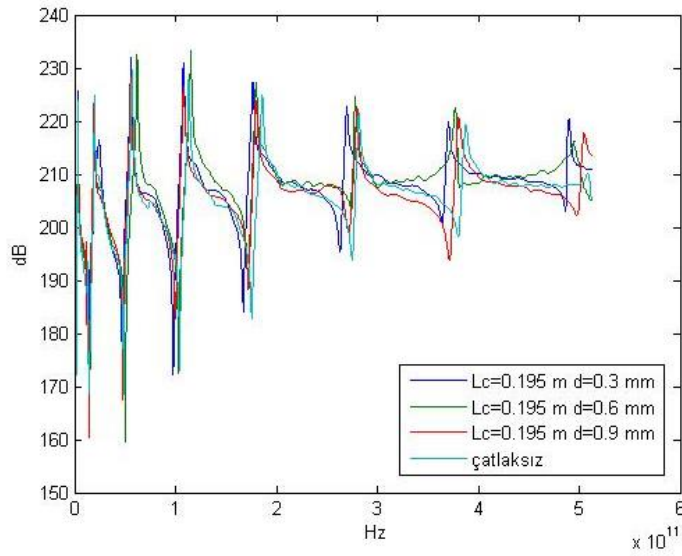


**Şekil 5. 24.** Ankastre sınır şartlarında  $d= 0.9\text{mm}$  çatlak derinliklerinde eğri kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

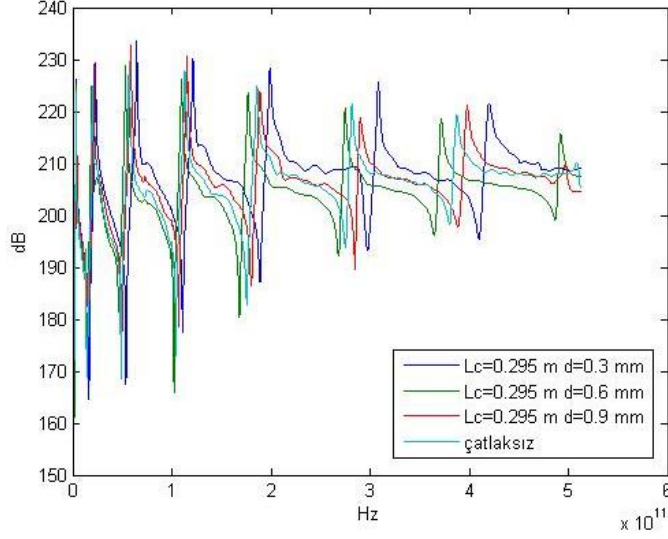
Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27’de ankastre sınır şartlarına sahip sabit çatlak konumları için farklı çatlak derinliklerindeki, doğal frekansta değişim grafikleri verilmiştir.



**Şekil 5. 25.**Ankastre sınır şartlarında  $L_c=0.095m$  çatlak derinliklerine göre eğri kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

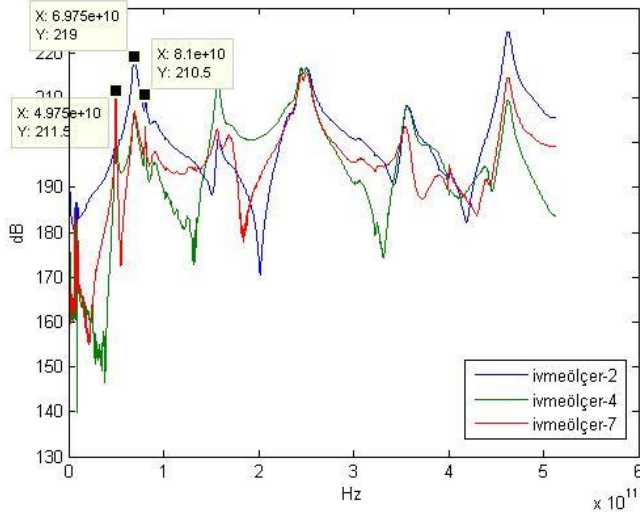


**Şekil 5. 26.**Ankastre sınır şartlarında  $L_c=0.195m$  çatlak derinliklerine göre eğri kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması



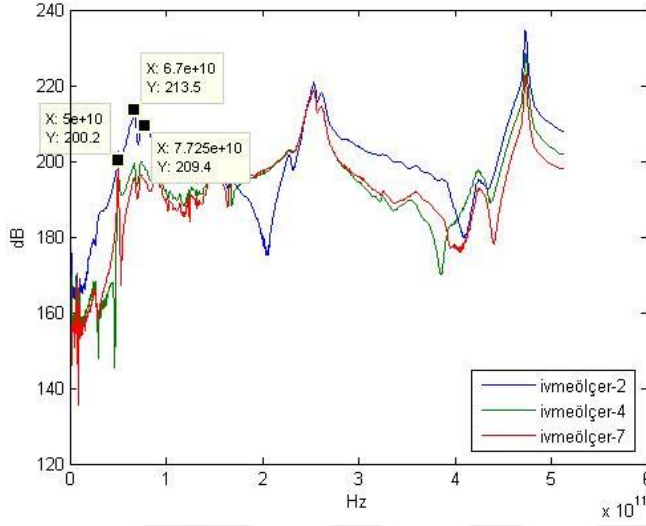
**Şekil 5. 27.**Ankastre sınır şartlarında  $L_c=0.295m$  çatlak derinliklerine göre eğri kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

Sabit – sabit sınır şartları için yapılan deneylerde 2., 4. ve 7. ivmeölçerlerden alınan verilerden elde edilen doğal frekans değişim grafikleri Şekil 5.28’de çatlaksız eğri kompozit kiriş için verilmiştir.

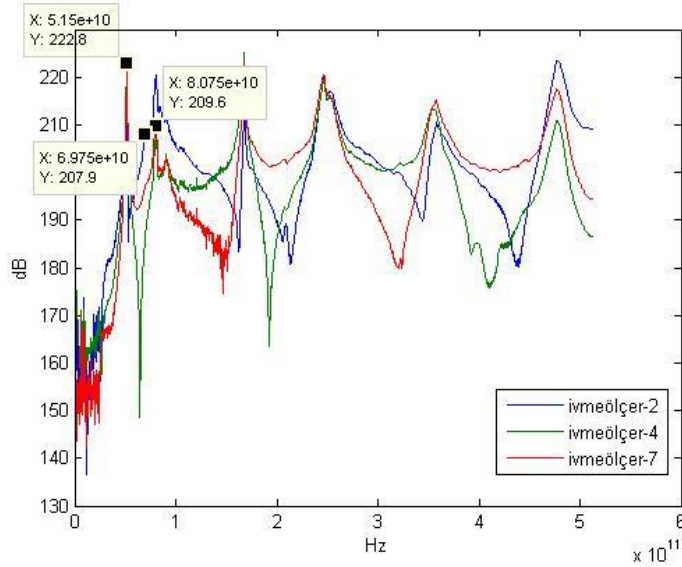


**Şekil 5. 28.**Sabit - sabit sınır şartlarında çatlaksız kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri

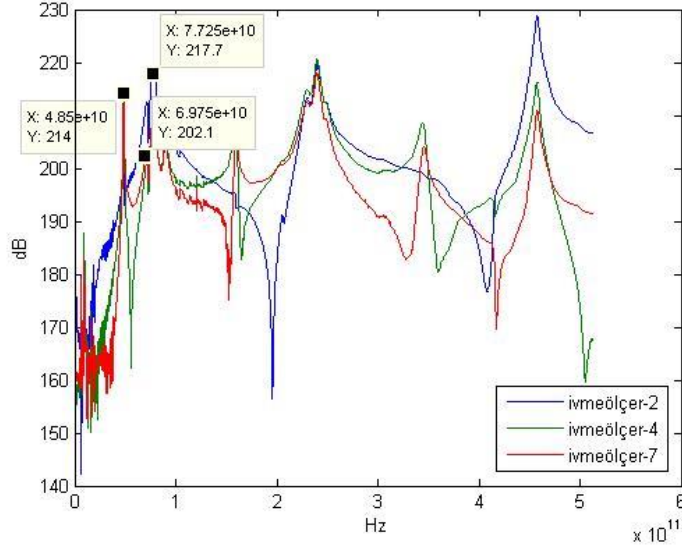
Şekil 5.29, Şekil 5.30 ve Şekil 5.31’de  $L_c=0.095$  m için farklı derinliklerden 2., 4. ve 7. ivmeölçerlerden alınan değerler çatlaklı eğri kompozit kirişin doğal frekans değişim değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5. 29.Sabit - sabit sınır şartlarında  $d=0.3$  mm çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri



Şekil 5. 30.Sabit - sabit sınır şartlarında  $d=0.6$  mm çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri

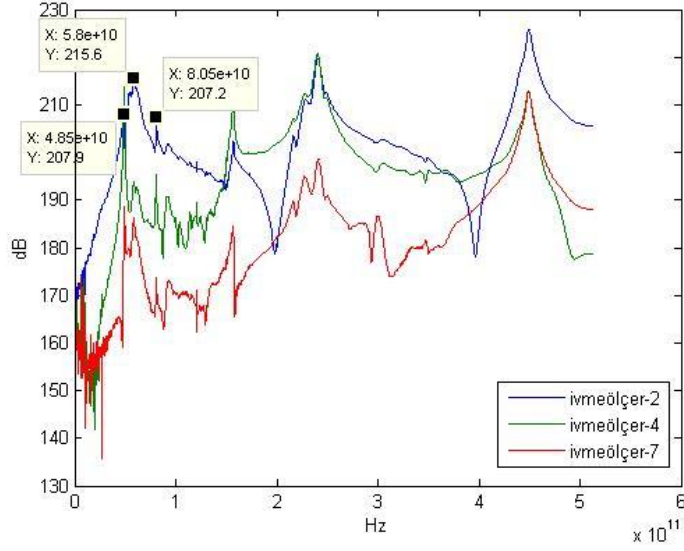


**Şekil 5. 31.**Sabit - sabit sınır şartlarında  $d=0.9\text{mm}$  çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri

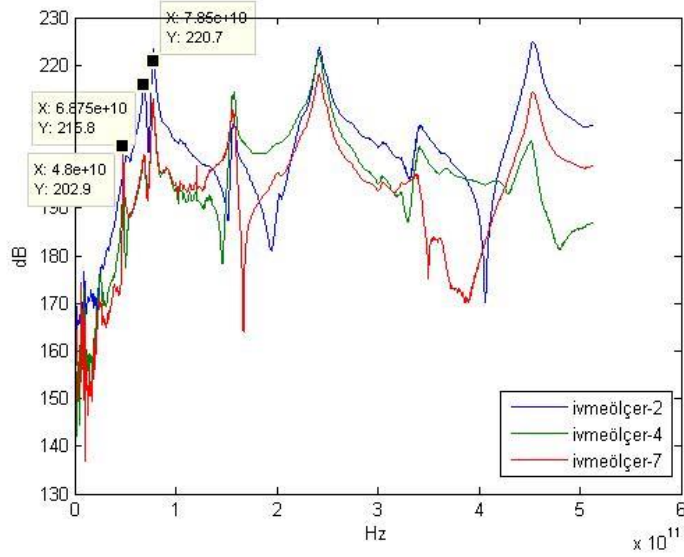
Düşük modlarda yer alan zig-zag değişimler rijit cisim titreşimi olarak görülmektedir. Bu durum deney düzeneğinde oluşan hareket veya masanın hareketinden kaynaklanabileceği düşünülebilir.

Şekil 5.32, Şekil 5.33 ve Şekil 5.34 31’de  $L_c=0.195\text{ m}$  için farklı derinliklerden 2., 4. ve 7. ivmeölçerlerden alınan değerler çatlaklı eğri kompozit kirişin doğal frekans değişim değerleri gösterilmiştir.

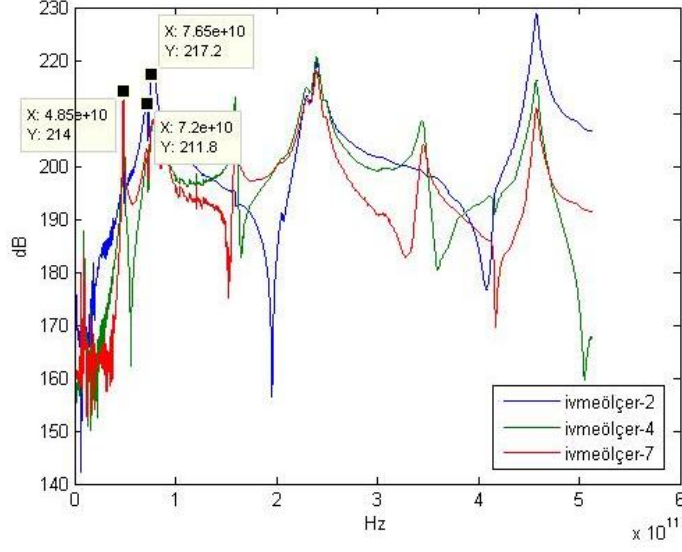




**Şekil 5. 32.**Sabit - sabit sınır şartlarında  $d=0.3\text{mm}$  çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri

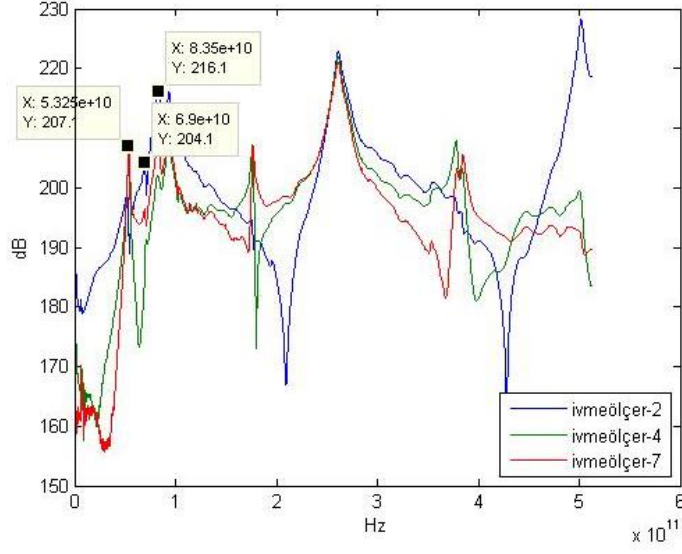


**Şekil 5. 33.**Sabit - sabit sınır şartlarında  $d=0.6\text{mm}$  çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri

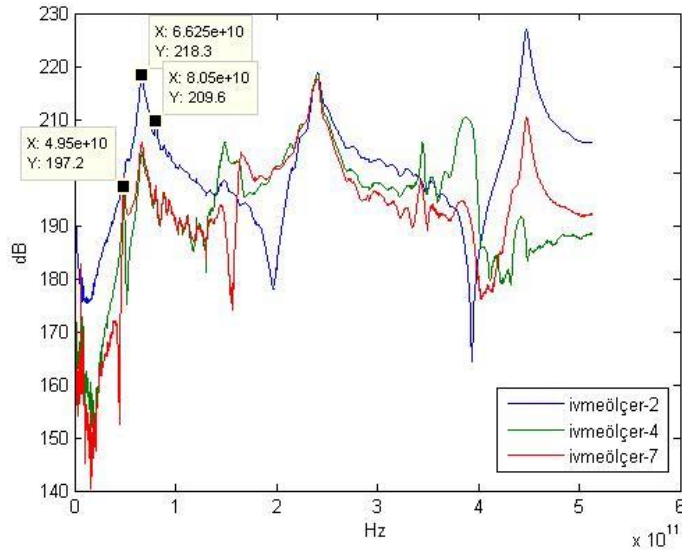


**Şekil 5. 34.**Sabit - sabit sınır şartlarında  $d=0.9\text{mm}$  çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri

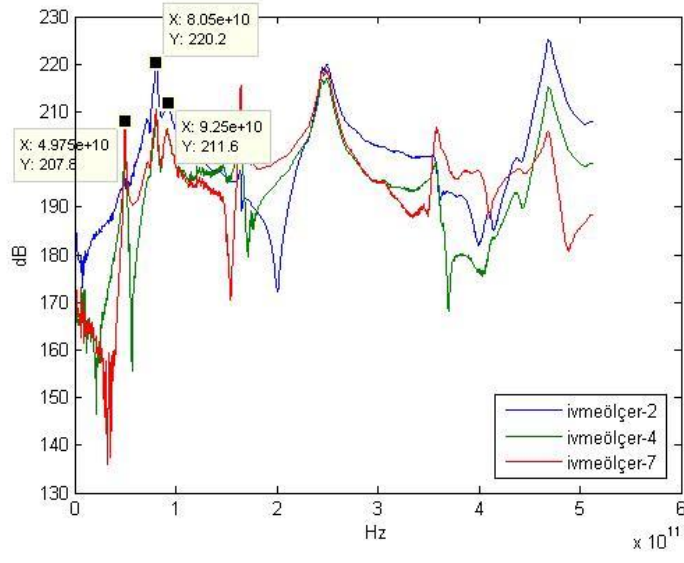
Şekil 5.35, Şekil 5.36 ve Şekil 5.37’de  $L_c=0.295$  m için farklı derinliklerden 2., 4. ve 7. ivmeölçerlerden alınan değerler çatlaklı eğri kompozit kirişin doğal frekans değişim değerleri gösterilmiştir.



**Şekil 5. 35.**Sabit - sabit sınır şartlarında  $d=0.3\text{mm}$  çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri



**Şekil 5. 36.**Sabit - sabit sınır şartlarında  $d=0.6\text{mm}$  çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri



**Şekil 5. 37.**Sabit - sabit sınır şartlarında d=0.9mm çatlaklı kompozit eğri kirişin doğal frekans değerleri

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1.Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında hem çatlaklı hem de çatlaksız eğri kompozit kirişlerin titreşim altındaki davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Kirişlerin farklı çatlak derinliği ve konumuna göre doğal frekans değerleri ile mod yapılarında oluşacak değişimler karşılaştırılmıştır. Ayrıca deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçların kıyaslamaları yapılmıştır.

Çalışmada literatür çalışması, sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal analiz, kompozit kirisin üretimi, deneysel titreşim analizine yer verilmiştir. Analizler sayısal ve deneysel olarak yapılmış elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Çatlaklı eğri kompozit kirişin deneysel ve sayısal olarak yapılan titreşim analizlerinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi aşağıda özetlenmiştir:

- Doğal frekans değerlerinin değişiminin çatlak derinliği ve çatlak konumuna bağlı olduğu ve her konum için çatlak derinliği arttıkça modların doğal frekans değerlerinin genelde azaldığı görülmüştür. Literatür ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında, doğal frekans davranışının çoğunlukla çatlak derinlik oranına göre azaldığı tespit edilmiştir.
- Çatlaklı eğri kompozit kiriş için,  $L_c$  sabit noktadan çatlakların uzaklığı arttıkça, her iki sınır koşulu içinde çatlak derinliği değerine de bağlı olarak doğal frekans değerlerinin değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak değişim ne sürekli azalma ne de sürekli artış eğilimi göstermemektedir. Bu durum ivmeölçerlerin çatlığa göre olan konumlarıyla da ilişkilendirilmelidir. ivmeölçerlerin yüksek derinlik ve çatlığa yakın konumlarında kirişin mesnet noktası çatlak olarak davranış gösterebildiği doğal frekans değişiminden gözlemlenmiştir.
- Farklı sınır koşullarında, sabit - sabit ve ankastre kirişler için modlarda doğal frekans değerlerinin değiştiği görülmektedir

- Ankastre sınır koşullu kirişlerin doğal frekansları, beklendiği gibi sabit - sabit sınır koşullarına sahip kirişlerde daha düşük olduğu bulunmuştur.
- Çatlak derinliğindeki ve çatlak yerindeki değişimin her zaman bir azalmaya neden olmadığı gözlemlenmiştir. Bu davranış, çatlak konumunun sabit mesnete veya düğüm noktasına olan yakınlığı nedeniyle düğüm noktası ile ölçüm noktası arasında bir kirişmiş gibi davranış göstermiş olabileceği sonucuna varılmıştır.
- FRF grafiğinde sunulan genlik verilerinin çatlak desteklerinden önce ve sonra incelendiğinde kirişte hasara neden olmaya eğilimli bazı kritik bölgelerin olduğu gözlenmektedir. Bu bölgelerde doğal frekans değerlerinde bir artış olduğu görülmektedir.

## 6.2.Öneriler

Bu tez çalışmasında tek bir malzeme ile tek çatlaklı, çatlak genişliği sabit ve ilerlemeyen çatlak modeli üzerinde titreşim analizi çalışmaları yapılmıştır. İlerleyen dönemlerde yapılabilecek çalışmalarda;

- Bu çalışmada kullanılan numunelerin malzemesi cam elyafıdır ve el ile serme yöntemiyle üretim yapılmıştır. Tüm analizler bu numuneler ile yapılmış ve sonuçlandırılmıştır. Diğer çalışmalarda, doğal frekans değişimini karşılaştırmak için farklı kompozit yapılar kullanılabilir. Böylece, kirişin titreşim davranışı ile kompozit tipi arasındaki ilişki detaylı olarak değerlendirilebilir.
- Birden çok çatlak ve konumları üzerinde çalışmalar yapılarak sonuçlar değerlendirilebilir.
- Aynı çalışma çatlak derinliği sabit tutularak çatlak genişliği değişimi yönünden incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Madenci E., Kompozit Kirişlerin Karışık Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Statik Ve Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 2011.
- [2] Örnek M., Reddy - Bieford Çatlaklı Kiriş Titreşiminin Teorik, Nümerik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2014.
- [3] Kamble D., Kumar C., Sontakke SR., Gaikwad RT., Analytical and Experimental Analysis of Cantilever Beam under Forced Vibration. International Journal of Engineering Science, 6:2168-71, 2016.
- [4] Prashant SW., Chougule V., Mitra AC., Investigation On Modal Parameters Of Rectangular Cantilever Beam Using Experimental Modal Analysis. Materials Today: Proceedings, 2:2121-30, 2015.
- [5] Imran M., Abbasi AA., Hyder MJ., Determination Of Modal Characteristics Of Cantilever Beam. Emerging Technologies (ICET), 2016 International Conference on: IEEE., Islamabad, Pakistan, October 16-17, 1-3, 2016.
- [6] Raj R., Sinha PK., Prakash EV, Modelling, Simulation And Analysis Of Cantilever Beam Of Different Material By Finite Element Method, Ansys & Matlab. International Journal of Engineering Research and General Science Governing, 3:89-100, 2015.
- [7] Kumar V., Singh KK., Gaurav S., Analysis of Natural Frequencies for Cantilever Beam with I-and T-Section Using Ansys. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) e-ISSN., 2:10013-20, 2015.
- [8] Vaziri M., Vaziri A., Kadam S., Vibration analysis of a cantilever beam using FFT analyzer. International Journal of Advanced Engineering Technology, 4:112 -15, 2013.
- [9] Mia MS., Islam MS., Ghosh U., Modal Analysis of Cracked Cantilever Beam by Finite Element Simulation. Procedia Engineering, 194:509-16, 2017.

- [10] Gori Y., Kumar P., Patil PP., FEA Simulation of Vibrating Cantilever Plate with Transverse Surface Crack. *Materials Today: Proceedings*. 4:9466-70, 2017.
- [11] Douka E., Hadjileontiadis L., Time–Frequency Analysis Of The Free Vibration Response Of A Beam With A Breathing Crack. *Ndt & E International*, 38:3-10, 2005.
- [12] Orhan S., Analysis Of Free And Forced Vibration Of A Cracked Cantilever Beam. *Ndt & E International*, 40:443-50, 2007.
- [13] Satpute D., Baviskar P., Gandhi P., Chavanke M., Aher T., Crack Detection in Cantilever Shaft Beam Using Natural Frequency. *Materials Today: Proceedings*, 4:1366-74, 2017.
- [14] Owolabi G., Swamidas A., Seshadri R., Crack Detection In Beams Using Changes In Frequencies And Amplitudes Of Frequency Response Functions. *Journal Of Sound And Vibration*, 265:1-22, 2003.
- [15] Kisa M., Free Vibration Analysis Of A Cantilever Composite Beam With Multiple Cracks. *Composites Science and Technology*, 64:1391-402, 2004.
- [16] Krawczuk M., Ostachowicz W., Modelling And Vibration Analysis Of A Cantilever Composite Beam With A Transverse Open Crack. *Journal of Sound and Vibration*, 183:69-89, 1995.
- [17] Sutar MK., Finite Element Analysis Of A Cracked Cantilever Beam. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 1:285-9, 2012.
- [18] Ramesh G., Ahmed S., Gangadhar V., Final Report Of Finite Element Analysis Of Cracked Composite Beams. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2:136-42, 2015.
- [19] Jena PC., Parhi DR., Pohit G, Theoretical, Numerical (FEM) and Experimental Analysis of Composite Cracked Beams Of Different Boundary Conditions Using Vibration Mode Shape Curvatures. *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, 6:509-18, 2014.
- [20] Waghulde K., Kumar B., Vibration Analysis Of Cracked Cantilever Beam With Suitable Boundary Conditions. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*, 1:20-4, 2014.



- [21] Karthikeyan M., Tiwari R., Talukdar S., Development Of A Novel Algorithm For A Crack Detection, Localization, And Sizing In A Beam Based On Forced Response Measurements. *Journal of Vibration and Acoustics*, 130:021002, 2008.
- [22] Chondros T., Dimarogonas A., Yao J., A Continuous Cracked Beam Vibration Theory. *Journal Of Sound And Vibration*, 215:17-34, 1998.
- [23] Fernandez-Saez J., Rubio L., Navarro C., Approximate Calculation Of The Fundamental Frequency For Bending Vibrations Of Cracked Beams. *Journal of Sound and Vibration*, 225:345-52, 1999.
- [24] Bovsunovsky A., Matveev V., Analytical Approach To The Determination Of Dynamic Characteristics Of A Beam With A Closing Crack. *Journal Of Sound And Vibration*, 235:415-34, 2000.
- [25] Khiem N., Lien T., A Simplified Method For Natural Frequency Analysis Of A Multiple Cracked Beam. *Journal Of Sound And Vibration*, 245:737-51, 2011.
- [26] Saavedra P., Cuitino L., Crack Detection And Vibration Behavior Of Cracked Beams. *Computers & Structures*, 79:1451-9, 2001.
- [27] Zheng D., Kessissoglou N., Free Vibration Analysis Of A Cracked Beam By Finite Element Method. *Journal of Sound and Vibration*, 273:457-75, 2004.
- [28] Yang X., Swamidias A., Seshadri R., Crack Identification In Vibrating Beams Using The Energy Method. *Journal Of Sound And Vibration*, 244:339-57, 2001.
- [29] Tarih YS., Şakar G., Üzerinde Çatlak Bulunan Tabakalı Kompozit Kirişlerin Dinamik Analizi. 16 Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, Erzurum, Eylül 2013, 580 - 585, 2013.
- [30] Sowjanya C., Sairam NV., Crack Analysis in Beams Using Natural Frequencies through Finite Element Analysis. *International Journal of Applied Sciences, Engineering and Management*, 3:33-40, 2017.
- [31] Biswal A., Behera R., Roy T., Vibration Analysis Of A Cracked Beam. *Proceedings of the 15th Annual Paper Meet, Dhaka, Bangladesh, December 06-07, 2014.*

- [32] Vamsi K., Pradepp D., Rmesh L., Rao P., Vibration Analysis of an Un-cracked & Cracked Fixed Beam by Using Analytical and FEM. SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME), 92-100, 2017.
- [33] Ramachandran C., Ponnudurai R.. Modal Analysis of Beam with Varying Crack Depth. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 4:452-7, 2017.
- [34] Ghodke P., Tupe D., Gandhe G., Modal Analysis of Cracked Continuous Beam Using ANSYS 1. International Journal of Engineering Research and Technology, 4:86-93, 2017.
- [35] Quila M., Mondal S., Sarkar S., Free Vibration Analysis of an Un-cracked & Cracked Fixed Beam. Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 11:76-83, 2014.
- [36] Sahu PK., Garnayak MK., Sethi R., Igit S., Vibrational Analysis Of A Cracked & Un-Cracked Aluminium Beam, 2014.
- [37] Jadhav V., Bhoomkar M., Experimental and Numerical FEM Analysis of Cracked Composite Cantilever Beam by Vibration Techniques. International Journal of Engineering Science, 6:3347-51, 2016.
- [38] Chaudhari J., Patil C., Study Of Static And Modal Analysis Of Crack And Crack Cantilever Beam Using Fea. International Journal of Advanced Engineering Research and Technology (IJERT), 5:534-42, 2016.
- [39] Öz H., Daş TM., In-Plane Vibrations Of Circular Curved Beams With A Transverse Open Crack. Mathematical and Computational Applications, 11:1-10, 2006.
- [40] Nobile L. Mixed Mode Crack Growth In Curved Beams With Radial Edge Crack. Theoretical And Applied Fracture Mechanics, 36:61-72, 2001.
- [41] Toygar ME., Sayman O., Kemiklioğlu U., Öztürk H., Kıral Z., Maleki FK., Vibration And Buckling Analysis Of A Curved Sandwich Composite Beam With FEM, 2:49-59, 2015.

- [42] Daş TM., Yılmaz A., Çatlaklı Dairesel Eğri Kompozit Kirişlerin Titreşim Analizleri. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33:783-792, 2018.
- [43] Yoon K-Y., Kang Y-J., Choi Y-J., Park N-H., Free Vibration Analysis Of Horizontally Curved Steel I-Girder Bridges. Thin-Walled Structures, 43:679-99, 2005.
- [44] Savita K. , Priyanka M., Jeyoti P., Frequency Response Curve For Forced Vibration under Different Damping for Steel Beam. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 3:37-42, 2014.
- [45] Awall M., Hayashikawa T., Humyra T., Zisan M., Free Vibration Characteristics Of Horizontally Curved Continuous Multi I-Girder Bridge. 3rd International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development, KUET, Khulna, Bangladesh, February 12-16, 730-736, 2016.
- [46] Baba BO. An Experimental Investigation Of Free Vibration Response Of Curved Sandwich Beam With Face/Core Debond. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 29:3208-18, 2010.
- [47] Atlıhan G., Süreksizlik Bölgesine Bahip Tabakalı Kompozit Kirişlerin Titreşim Analizi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Pamukkale, 2010.
- [48] Kartal Y., Alüminyum (Al 1070) Matrisli Silisyum Karbür (SiC) Ve Bor Karbür (B4c) Takviyelİ Hibrit Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin İşlenebilirliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale, 2017.
- [49] Mazumdar S., Composites Manufacturing: Materials, Product, And Process Engineering, CrC Press, 2001.
- [50] Nijssen RPL., Composite Materials an İntroduction. Inholland University of Applied Sciences, 2015.
- [51] Callister WD., Rethwisch DG., Materials Science and Engineering. Seventh edition, 1987.

[52] Meshram NA., Pawar VS., Analysis Of Crack Detection Of A Cantilever Beam Using Finite Element Analysis. International Journal of Engineering Research & Technology, 4:713-718, 2015.

[53] Çakar O., Titreşim Testlerinden Elde Edilen Verilerin Kalitesinin İyileştirilmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2003.

[54] Balachandran B., Magrab EB., Vibrations: Cengage Learning; 2008.

[55] Stanford AL., Tanner JM., Physics for students of science and engineering: Academic Press; 2014.

[56] İnternet :<http://resource.isvr.soton.ac.uk>

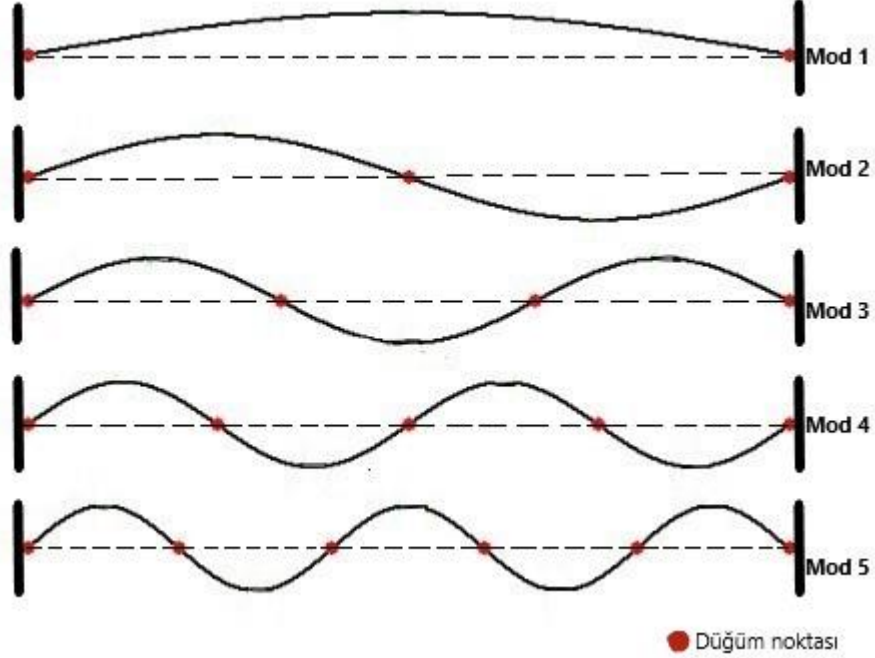
[57] Saberkari, H., Ghavifekr, H. B., & Shamsi, M. (2015). Comprehensive Performance Study Of Magneto Cantilevers As A Candidate Model For Biological Sensors Used In Lab-On-A-Chip Applications. Journal Of Medical Signals And Sensors, 5 :77, 2015.

## EKLER

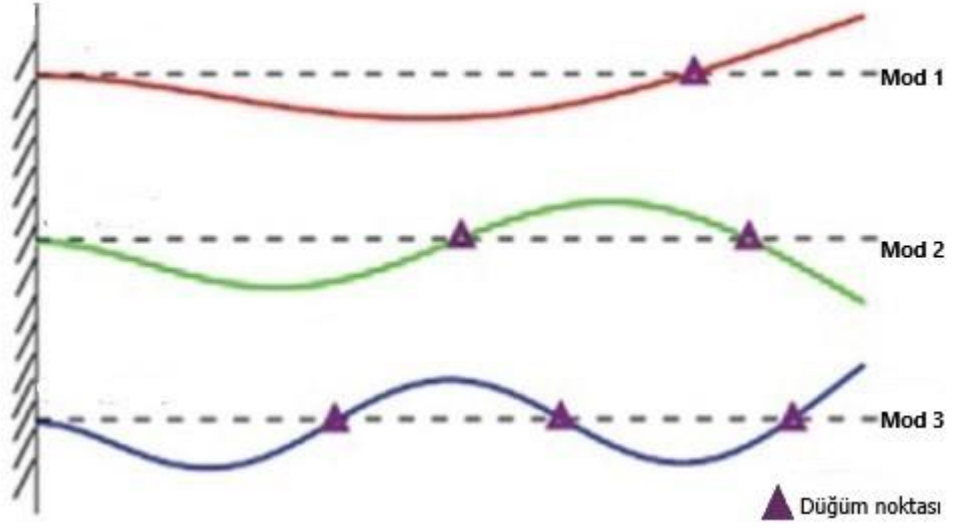
### EK I

- Dügüm noktası; çubuğun referans (denge) pozisyonunu kestiği, her mod da bir nokta olduğu bilinmektedir. Bu nokta herhangi bir harekete maruz kalmaz. Böyle bir noktaya düğüm noktası denir [54]. Dügüm, dalganın minimum genliğe sahip olduğu bir durma dalgası boyunca bir noktadır [55].
- Mod şekli; yapının belirli bir frekanstaki deformasyon miktarıdır. Her mod şekli bir doğal frekans ile ilgilidir.

Şekil Ek I' de sabit sabit ve Şekil Ek II' de ankastre kiriş için mod şekilleri ve düğüm noktaları (yatay ekseni kesen noktalar, genlik sıfır noktası) gösterilmiştir.



Şekil Ek I. Sabit – sabit kiriş mod şekli ve düğüm noktası [56]



**Şekil Ek II.** Ankastre kiriş mod şekli ve düğüm noktası [57]