

**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**TABAKALI POLİMER KOMPOZİT KİRİŞLERDE  
ELEKTROMANYETİK ALAN İLE TİTREŞİM  
SÖNÜMLENMESİ**

**Kader SEVER**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç.Dr. Mehmet SARIKANAT**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu : 625.03.00**

**Sunuş Tarihi : 24.08.2012**

**Bornova-İZMİR  
2012**



**Kader SEVER** tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak sunulan **“Tabakalı Polimer Kompozit Kirişlerde Elektromanyetik Alan İle Titreşim Sönümlenmesi”** başlıklı bu çalışma E. Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim yönetmeliği ile E. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 24/08/2012 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybilgi/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri****İmza**

**Jüri Başkanı:** Yrd. Doç. Dr. Mehmet SARIKANAT .....

**Raportör Üye:** Doç. Dr. Bülent Murat İÇTEN .....

**Üye:** Yrd. Doç. Dr. Aysun BALTACI .....



**ÖZET****TABAKALI POLİMER KOMPOZİT KİRİŞLERDE  
ELEKTROMANYETİK ALAN İLE TİTREŞİM SÖNÜMLENMESİ**

SEVER, Kader

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Bölümü

Tez Yöneticisi: Yrd. Doç. Dr. Mehmet SARIKANAT

Ağustos 2012, 65 sayfa

Son zamanlarda teknolojinin gelişimi ile araştırmacılar elektromanyetik alan altında elektromanyetik yapıların elektromanyetik sönümlemesi ile ilgilenmiş ve mühendislikte bu yapıların uygulamalarına yoğunlaşmışlardır. Manyetik olmayan iletken bir metal manyetik alan içine yerleştirildiğinde girdap akımları oluşur. Bu girdap akımları da, manyetik alanla etkiye girerek zamanla değişen bir elektromekanik kuvvetin doğmasına sebep olur. Manyetik alan titreşim altındaki bir yapıya sönümleme amacıyla kullanılabilir.

Bu çalışmada manyetik alan altında kompozit malzemelerin manyetik sönümleme ve titreşim davranışları incelendi. Bunun için cam, karbon ve kevlar fiber takviyeli kompozitler ürettik ve bu kompozit plakaların arasına folyolar yerleştirildi. Zamanla değişmeyen manyetik alan altında bu kirişlerin titreşim davranışı deneysel olarak incelendi. Malzeme özelliklerinin ve manyetik alan altında titreşim sönümleme etkileri üzerine çalışıldı. Ayrıca üretilen bu malzemelerden çıkarılan numunelerle malzemenin mekanik özellikleri belirlendi.

**Anahtar sözcükler:** Manyetik alan, girdap akımı, polimerik kompozit malzemeler, modal analiz, mekanik titreşimler



**ABSTRACT****VIBRATION DAMPING OF POLYMER LAYERED COMPOSITE  
BEAMS WITH ELECTROMAGNETIC FIELD**

SEVER, Kader

MSc in Mechanical Eng.

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mehmet SARIKANAT

Agust 2012, 65 pages

With the recent development of technology, the research interest for electromagnetic damping of electromagnetic structures in electromagnetic fields has been intensified with application of these structures in engineering. When a non-magnetic conductive metal is placed in a magnetic field, eddy currents are generated. This eddy currents which are affected by magnetic field, producing a time-varying electromechanical force. Magnetic fields can be used to apply damping to a vibrating structure.

In this study presents effect of magnetic damping and vibration behaviour of composite materials moving in magnetic fields. For this, Glass, carbon and Kevlar fiber-reinforced polyester composites were produced, and we had placed copper foil into layer of composite plate. The vibration behavior of these beams under time invariant magnetic fields is investigated experimentally. The effects of material properties and magnetic field on vibration damping is studied. Also mechanical properties of samples which are extracted from these manufactured beams are determined.

**Keywords:** Magnetic field, eddy currents, polimeric composite materials, modal analysis, mechanical vibration





## **TEŐEKKÖR**

Tez alıőmasında beni yönlendiren ve kıymetli görüşlerinden yararlandığım değerli hocam Yrd. Do. Dr. Mehmet SARIKANAT'a, bu süreçte her konuda görüşlerinden faydalandığım sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Aysun BALTACI'ya, yardımlarını deneysel çalıőmam boyunca esirgemeyen Arő. Gör. Barış Oğuz GÖRSES'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak da benim bu günlere gelmemde büyük emeği olan aileme ve beni sürekli destekleyen, yanımda olan, maddi manevi desteğini esirgemeyen eőim Kutlay SEVER'e teşekkürü bir borç bilirim.



**İÇİNDEKİLER****Sayfa No**

ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vii
TEŞEKKÜR .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. POLİMER KOMPOZİT MALZEMELER.....	9
2.1. Kompozit Tanımı ve Sınıflandırma.....	9
2.2. Kompozitte Fiber ve Matrisin Fonksiyonel Özellikleri.....	10
2.3. Kompozitlerin Avantajları ve Eksiklikleri .....	11
2.4. Takviye ve Matris Malzemeleri.....	13
2.4.1. Takviye malzemeleri .....	13
2.4.2. Polimer Matris Malzemeleri.....	15
2.5. Tabakalı Polimer Kompozit Üretim Yöntemleri.....	16
3. TİTREŞİM.....	18
3.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler .....	18
3.1.1. Kütle – Yay sistemi .....	18

**İÇİNDEKİLER (devam)**

3.1.2. Kütle – Yay – Damper Sistemi .....	20
3.2. Titreşim Sönümlenme .....	22
3.2.1. Sönümlenme tipleri .....	23
4. MODAL ANALİZ .....	29
4.1. Modal Analiz Yöntemleri- Frekans Cinsi .....	31
4.2. Ölçülen FRF Verilerinden Titreşim Modlarının Bulunması .....	34
4.3. SDoF Yönteminde FRF Verilerinden Modal Veri Türetme .....	36
4.3.1. Peak-Picking yöntemi .....	37
4.4. Vuruş Etki Testi .....	38
4.4.1. Logaritmik azalma yöntemiyle sönüm oranının bulunması .....	41
4.5. Girdap Akımları .....	42
4.5.1. Girdap akımının hesaplanması .....	42
4.5.2. Girdap akımları ile sönümlenme .....	43
5. DENEYSEL ÇALIŞMA .....	45
5.1. Deneyde Kullanılacak Kirişlerin Üretilmesi .....	45
5.2. Modal Analiz Deneyinin Yapılışı .....	47
5.3. Çekme Deneyi .....	48
5.4. Eğilme Deneyi .....	48

**İÇİNDEKİLER (devam)**

5.5. Kısa Kiriş Kayma Testi .....	48
5.6. Sonlu Elemanlar Analizi.....	48
6. SONUÇLAR.....	50
6.1. Deney Sonuçları .....	50
6.2. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları .....	60
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	62
ÖZGEÇMİŞ.....	65

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa No</u>
1.1. Önerilen girdap akımı sönümleyicisinin konfigürasyonu .....	2
1.2. Dışarı yönelimdeki bir $B$ mıknatıssal alanının etkisi altındaki farklı $q$ yüklerine sahip parçacıkların izlediği yörüngeler .....	3
1.3. Manyetik alan altında uç kısmında bobinle konsol kirişin şematik gösterimi..	4
1.4. Eşkutuplu bir frenin şematik gösterimi .....	6
1.5. Bir manyetik alan içinden geçen iletken bir malzemenin ve gerçekleşen girdap akımının şematik gösterimi.....	6
1.6. Girdap akımı ile sönümlenme .....	7
2.1. Lifli kompozitlerin şematik gösterimi.....	9
2.2. Partiküllü kompozitlerin şematik gösterimi.....	10
2.3. Bazı kompozit malzemelerin ve monolitik malzemelerin spesifik kuvvet ve modülü.....	12
2.4. Fiber takviyeli kompozitlerin yapı taşları .....	17
3.1a. Şematik Kütle – Yay .....	19
3.1b. Serbest cisim diyagramı .....	19
3.1c. Statik kütle – yay sisteminin serbest cisim diyagramı .....	19
3.2a. Kütle-Yay-Damper şematik gösterimi, .....	20
3.2b. a'daki sistemin serbest cisim diyagramı .....	20

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Şekil</u></b>	<b><u>Sayfa No</u></b>
3.3. Sönümsüz bir sistemin cevabı .....	21
3.4.Kritik üstü sönümlü sistemin cevabı. ....	22
3.5.Kritik sönümlü sistemin cevabı. ....	22
3.6.Mekanik Sönümlemedeki Histeresis eğrisi. ....	25
4.1. FRF' in alternatif şekilleri. ....	33
4.2. Bir kiriş yapıdan ölçülen bir FRF noktasının modülü .....	35
4.3. FRF noktasının fazı .....	36
4.4. Bir MDoF'un FRF üzerinde SDoF varsayımı .....	36
4.5. Peak-picking yöntemi. ....	38
4.6. Vuruş testi.....	39
4.7. Girdi Kuvveti ve Yanıt Sinyal.....	40
4.8. Vuruş APS'si ve FRF .....	40
4.9.Girdap akımı nüfuziyet derinliği. ....	43
4.10. Manyetik alanın, plaka ile bağlı hızına göre değişen etkisi.....	44
5.1.Kompozit üretimi için kumaşların kesilmesi.....	45
5.2. Kullanılan kumaşlar soldan-sağa.....	46
5.3. Kompozit üretim aşaması. ....	46
5.4. Deney düzeneği .....	47

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa No</u></b>
5.5. Sonlu elemanlar modeli .....	49
6.1. İmpuls girdinin grafiği .....	51
6.2. 0 Amper Konum – Zaman Grafiği (karbon) .....	52
6.3. 0 Amper konum zaman grafiği (cam) .....	52
6.4. 0 Amper koşulunda frekans sinyali (karbon) .....	53
6.5. 0 Amper koşulunda frekans sinyali (cam) .....	53
6.6. 1 Amper Konum – Zaman Grafiği (karbon) .....	54
6.7. 1 Amper Konum – Zaman Grafiği (cam) .....	54
6.8. 1 Amper koşulunda frekans sinyali (karbon) .....	55
6.9. 1 Amper koşulunda frekans sinyali (cam) .....	55
6.10. 3 Amper Konum – Zaman Grafiği (karbon) .....	56
6.11. 3 Amper Konum – Zaman Grafiği (cam) .....	56
6.12. 3 Amper koşulunda frekans sinyali (karbon) .....	57
6.13. 3 Amper koşulunda frekans sinyali (cam) .....	57
6.14. 5 Amper Konum – Zaman Grafiği (karbon) .....	58
6.15. 5 Amper Konum – Zaman Grafiği (cam) .....	58
6.16. 5 Amper koşulunda frekans sinyali (karbon) .....	59
6.17. 5 Amper koşulunda frekans sinyali (cam) .....	59



**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Şekil</u></b>	<b><u>Sayfa No</u></b>
6.18. Cam elyaf takviyeli kiriş için deney ve analiz sonuç karşılaştırması. ....	60
6.19. Karbon elyaf takviyeli kiriş için deney ve analiz sonuç karşılaştırması.....	61

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<b><u>Çizelge</u></b>	<b><u>Sayfa No</u></b>
2.1. Fiber ve geleneksel malzemelerin özellikleri.....	14
2.2. Bazı termoset reçinelerin temel özellikleri .....	15
2.3. Tamamlanmamış Termoplastik Reçinelerin Özellikleri.....	16
6.1. Aramid elyaf için yapılan deney sonuçları .....	50
6.2. Cam elyaf için yapılan deney sonuçları .....	50
6.3. Karbon elyaf için yapılan deney sonuçları.....	51

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$F$	Kuvvet (newton).
$E$	Elektriksel alan (volt/metre).
$B$	Manyetik alan (tesla).
$q$	Parçacığın elektriksel yükü (coulomb).
$v$	Parçacığın anlık hızı (metre/saniye).
$x$	Vektörel çapraz çarpım.
$E$	İndüklenen emk (volt).
$\Phi$	manyetik akı (weber).
$t$	zaman (s).
$N$	Sarımlı bir bobinde oluşan emk.
$m$	Kütle (kg).
$k$	Yay katsayısı (N/m).
$\delta$	Nüfuziyet derinliği.
$f$	Frekans (Hz).
$\mu$	Manyetik geçirgenlik (H/m).
$\Sigma$	Elektriksel iletkenlik (S/m).
$\omega_n$	Doğal frekans.
$c_c$	Kritik sönümlenme katsayısı.
<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
$F$	Kuvvet (newton).
FFT	Fast Fourier Transform.
FRF	Frekans cevap fonksiyonu.



## 1. GİRİŞ

Her geçen gün teknolojinin ilerlemesine bağlı olarak pek çok alanda üretimin kalitesini arttırmak ve maliyetini düşürmek için bir çok çalışma yapılmaktadır. Kaliteyi ve verimliliği arttırmak, maliyeti azaltmak amacıyla son yıllarda elektromanyetik özelliğe sahip yapıların çalışmaları sırasında, maruz kaldıkları ani darbeler nedeniyle üzerlerinde oluşan titreşimlerin, elektromanyetizma yardımıyla sönümlenmesi üzerine yapılan çalışmalarda ilerleme kaydedilmiştir. Bu sebeple, araştırmalar temassız konumlama sistemleri üzerine odaklanmıştır.

Manyetik özelliği olmayan iletken bir metal, manyetik alan içerisine girdiğinde, üzerinde girdap akımları oluşur. Bu akımlar da manyetik alanla etkiye girerek zamanla değişen elektromanyetik bir kuvvetin oluşmasını sağlar. Bu kuvvet de istenen yapının titreşimlerinin sönümlenmesi amacıyla kullanılabilir.

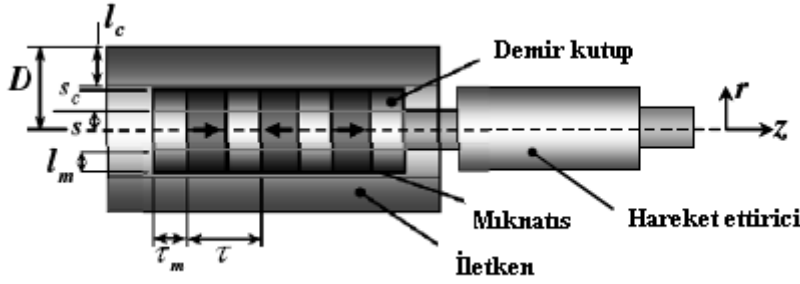
Kısaca, temassız kontrol sistemleri endüstrinin gitgide artmakta olan ihtiyaçlarına çözüm getirmektedir. Temassız sönümlenmeyi sağlayan girdap akımları, diğer sönümlenme yöntemlerine göre birçok yönden daha avantajlıdır. Bunlardan en önemlisi tamamıyla temassız olarak sönümlenme kuvveti oluşturmasıdır. Bu sebeple diğer sönümlenme tekniklerinin sisteme temas etmesi nedeniyle ortaya çıkan sistemin direngenliğindeki ve kütleindeki değişmeler bu yöntemde söz konusu değildir. Ayrıca temas olmadığı içinde sistemde herhangi bir yıpranma oluşmaz.

Pek çok alanda olduğu gibi havacılık alanında da kompozit malzeme kullanımı büyük önem taşımaktadır. Burada önemli olan ve dikkat edilmesi gereken şey mukavemet, hafiflik ve yüksek sönümlenme özelliğine sahip malzemeler geliştirmektir(Benchekchou et al., 1998).

Bu tezde tabakalı polimer kompozit kirişler üretilerek kontrol edilebilen manyetik alan altındaki titreşim davranışı incelenecektir. Üretilen tabakalı polimer kompozitlerin modal analiz yöntemi kullanılarak sönümlenme özellikleri belirlenmeye çalışılacaktır.

Bu konuyla ilgili yapılan literatürdeki çalışmalar incelenmiş ve aşağıda kısa kısa da olsa örnekler verilmiştir.

Ebrahimi ve arkadaşları prototip bir girdap akımı sönümleyicisi ürettiler ve önerilen girdap akımı sönümleyicisinin sönümleme özelliklerini araştırdılar (Ebrahimi et al., 2009).



Şekil 1.1. Önerilen girdap akımı sönümleyicisinin konfigürasyonu (Ebrahimi et al., 2009).

Fizikte, Lorentz kuvveti, elektromıknatıssal alanlar tarafından hareketli bir noktasal yüke etkiyen kuvvettir. Bu kuvvet matematiksel olarak, elektrik ve mıknatıssal alanlar cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1.1)$$

**F:** Kuvvet (newton)

**E:** Elektrik alan (volt/metre)

**B:** Manyetik alan (tesla)

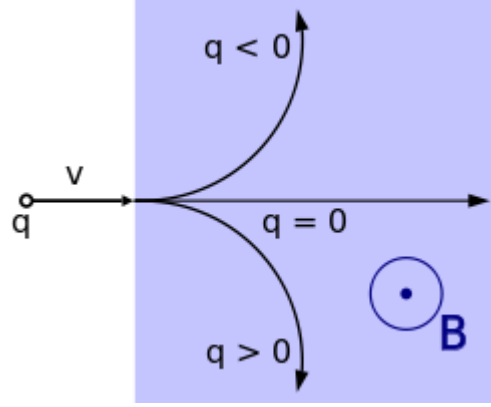
**q:** Parçacığın elektriksel yükü (coulomb)

**v:** Parçacığın anlık hızı (metre/saniye)

**×:** Vektörel çapraz çarpım

Lorentz kuvvet yasası, Faraday'ın indüklemeye yasası ile çok yakın bir ilişki içerisinde.

Pozitif yüklü bir parçacık  $\mathbf{E}$  elektrik alanı içinde bulunduğunda alan ile aynı yönde ivmelenirken, bir  $\mathbf{v}$  anlık hızı ile  $\mathbf{B}$  mıknatıssal alanı içinde bulunduğunda hem anlık hızına hem de mıknatıssal alana dik yönde bir kuvvete maruz kalacaktır([http://tr.wikipedia.org/wiki/Lorentz\\_kuvveti](http://tr.wikipedia.org/wiki/Lorentz_kuvveti)).



Şekil 1.2. Dışarı yönelimdeki bir  $\mathbf{B}$  mıknatıssal alanının etkisi altındaki farklı  $q$  yüklerine sahip parçacıkların izlediği yörüngeler ([http://tr.wikipedia.org/wiki/Lorentz\\_kuvveti](http://tr.wikipedia.org/wiki/Lorentz_kuvveti)).

Mıknatıs ve iletkenin bağıl hareketi iletken içinde girdap akımı indüklenmesine neden olur, üretilen manyetik akı dış manyetik akı yoğunluğuna karşı her bir kutup başına bir sönmleme kuvveti ile sonuçlanır. Sonuç olarak Ebrahimi ve arkadaşları, önerilen girdap akımı sönmleyicisinin performansı yüksek iletkenlikli iletkenlerin yanı sıra yüksek kaliteli, düşük ağırlıklı kalıcı mıknatıslar kullanılarak daha da geliştirilebileceğini belirtmişlerdir (Ebrahimi et al., 2009).

Zheng ve arkadaşları manyetik alan içinde hareket eden iletken yapıların manyetik sönmlemesinin lineer olmayan etkisini araştırmışlardır. Bunun için pleksiglas gibi yalıtkan ve non-magnetizable malzemelerden yapılmış bir konsol giriş plaka kullanmışlardır (Zheng et al., 2001).





$$s = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.3)$$

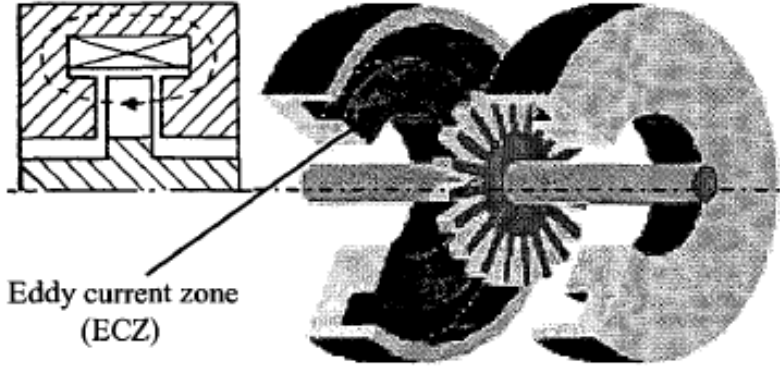
ise denklemlerle hesaplanır.

Nümerik sonuçlar efektif sönümleme faktörünün kırış-plaka ya da zamanın genliğiyle değişebilir olduğunu göstermiştir (Zheng et al., 2001).

Bir başka çalışmada Botelho ve arkadaşları elastik E' ve viskoz E'' sonuçlar gibi viskoelastik sonuçlar 2024 alüminyum alaşımları için elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar kompozit mikromekanik yaklaşımı kullanılarak E modül değerine göre hesaplanmış ve incelenen tüm örneklerde deneysel değerlerin teorik değerlerle iyi bir uyum içinde olduğunu göstermiştir (Botelho et al., 2006).

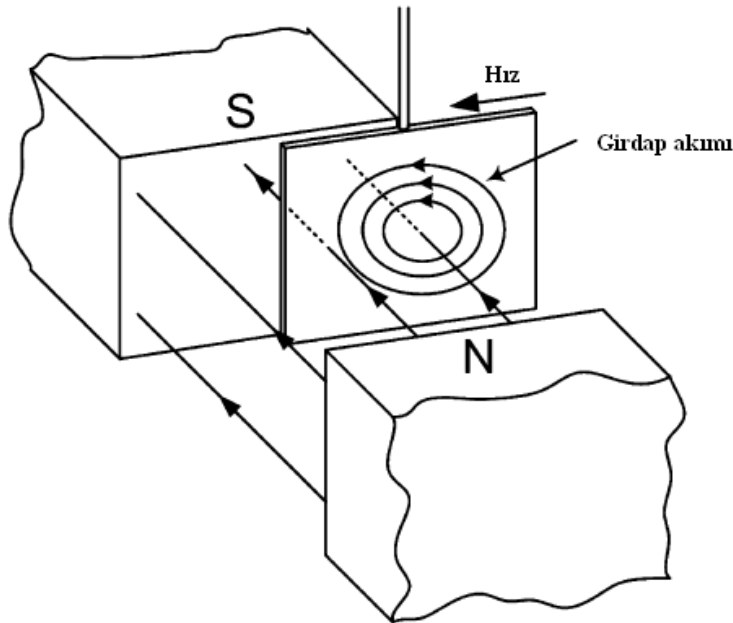
Girdap akımı sönümleyiciler pasif, yarı aktif ve düzeltici titreşim kontrolü için umut verici cihazlardır. Tüm otomatik işlemlerde üretimin akışı ve makine hareketlerinin, geri besleme bilgisi olarak denetleyici birimlere aktarılması için sensörlere kesinlikle gerek vardır. Sensörler konum, sınır, seviye bilgileri verirler veya darbe iletici olarak görev yaparlar. Elektronik sensörler içinde iki tanesi endüstri uygulamaları için en çok güvenilir olduklarını kanıtlamışlardır (Serkan GÜLLE). Tonoli'nin çalışmasındaki hedefi, kalıcı mıknatıslı senkron motorların geliştirilmesi ve girdap akımı sönümleyicisinin dinamik davranışını modellemiştir. Model yaklaşımında, girdap akımı hesabı için Faraday kanununu kullanmış; daha sonra torku iletken üzerindeki Lorentz kuvvetiyle hesaplamıştır (Tonoli, 2007).

Lesobre ve arkadaşları girdap akımına dayanan fren sistemini incelemiştir. Bunun için statik model üzerine odaklanarak girdap akımı yüzeyinde dağılan akış yoğunluğunu sonlu elemanlar yöntemi kullanarak hesaplamışlardır (Lesobre et al., 2001).



Şekil 1.4. Eşkutuplu bir frenin şematik gösterimi(Lesobre et al., 2001).

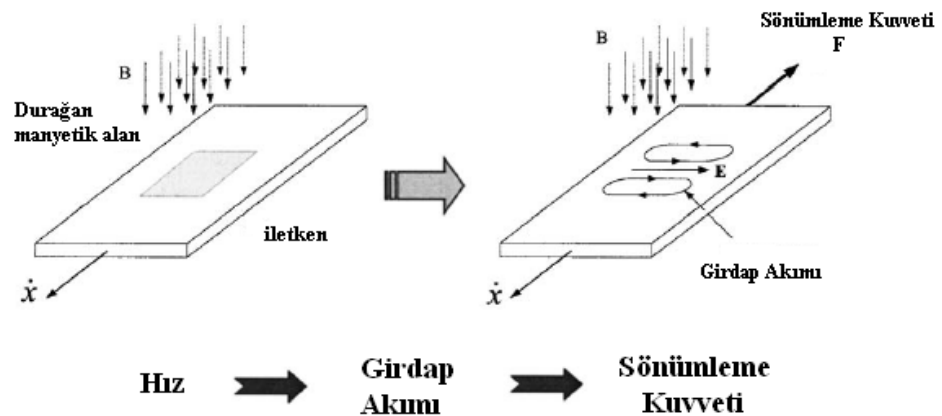
Elektromanyetik kuvvet elektrik yüklü bir parçacığın manyetik alandan geçerken üzerine etki eden kuvvettir ([http://tr.wikipedia.org/wiki/Elektromanyetik\\_kuvvet](http://tr.wikipedia.org/wiki/Elektromanyetik_kuvvet)). Bir manyetik alan, bir sarmalın sarımlarında dolaşan elektron örneğinde olduğu gibi, elektrik yüklü parçacıklar hareket ettiğinde ortaya çıkarlar bunun sonucunda da elektro manyetik kuvvet sabit bir manyetik alana doğru bir iletkenin hareketi ya da sabit bir iletken üzerinde zamana göre değişen manyetik alan tarafından gerçekleşir ve esnek bir yapının titreşimini sönmölemek için kullanılabilir (Sodano et al., 2005).



Şekil 1.5. Bir manyetik alan içinden geçen iletken bir malzemenin ve gerçekleşen girdap akımının şematik gösterimi(Sodano et al., 2005).

Başka bir çalışmada çalışmada, Sodano ve arkadaşları yeni bir elektromanyetik sönümlenme mekanizması tanıtmışlardır. Bu mekanizma daha önce tanıtılan elektromanyetik frenleme sistemi ve girdap akımı sönümleyicisinden akış yönü bakımından farklılık gösteriyor çünkü elektromanyetik sönümlenme kuvveti dikey akış yerine merkezden akış şeklinde gerçekleşmiştir. Önerilen mekanizmanın önemli bir avantajı basit ve uygulanmasının kolay olmasıdır. Ek olarak tek bir mıknatıs mevcut pek çok yapıda olan titreşimleri sönümlemek için kullanılabilir. Ayrıca, herhangi bir elektronik cihaza ya da harici güç kaynağına gereksinim duymaz, dolayısıyla temassız pasif sönümleyici gibi işler. Sistemin teorik modeli bize yapı üzerinde indüklenen elektromanyetik sönümlenme kuvvetini tahmin etmek için elektromanyetik teorisi kullanılarak elde edilmiştir. Sodano ve arkadaşları önerilen girdap akımı sönümleyicisini oluşturdu ve deneyleri teorik modelin kesinliğini doğrulamak için yaptılar. Sonuç olarak önerilen girdap akımı sönümleyici mekanizmasının sönüm oranını 150 kat arttırabileceğini ve kirişin titreşimini hızlı bir şekilde sönümlemek için yeterli sönümlenme kuvveti oluşturduğunu bulmuşlardır(Sodano et al., 2005).

Bae ve arkadaşları çalışmalarında efektif girdap akımı sönümleyicisi ve girdap akımı kullanarak bir kirişin titreşim sönümlenmesi için yeni bir model tekniği ile ilgilenmişlerdir. Girdap akımı sönümleyicisi kalıcı mıknatıs ve iletken levhadan oluşur(Bae et al., 2005).



Şekil 1.6. Girdap akımı ile sönümlenme (Bae et al., 2005).

Mıknatıs ve iletken levha arasındaki bağıl hareket sonucu elektromanyetik kuvvet bunun sonucunda da girdap akımı üretilir. Önerilen girdap akımı sönümleyicisinin en önemli avantajı herhangi bir elektronik cihaza ya da harici bir güç kaynağına ihtiyaç duymamasıdır. Bu çalışmada girdap akımı sönümleyicisinin teorik modeli görüntü yöntemi ile birlikte elektromanyetik teorisi kullanılarak elde edilmiştir. Teorik model bize girdap akımı sönümleyicisi için bir tasarım aracı geliştirmek gibi ana yapıya arttırılmış sönümleme tahminine olanak sağlar. Deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında teorik modelin sönümleme özellikleri ve yapının titreşim davranışının önceden tahmin edilebileceği bulunmuştur. Ayrıca teorik ve deneysel sonuçlar kirişin titreşimi girdap akımı sönümleyicisinin başarılı bir şekilde sönümleme yapabileceğini göstermiştir (Bae et al., 2005).

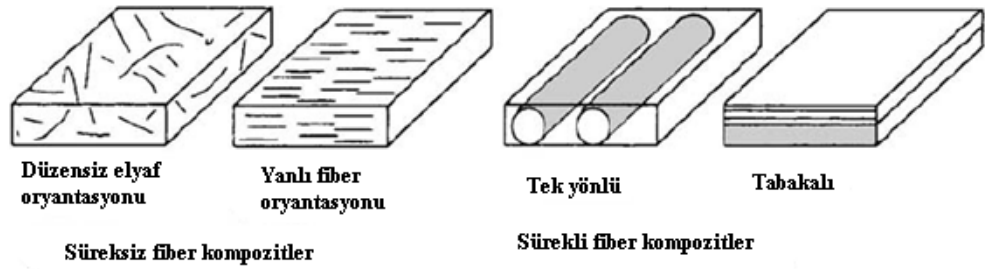
## 2. POLİMER KOMPOZİT MALZEMELER

### 2.1. Kompozit Tanımı ve Sınıflandırma

Genel olarak, kompozit malzeme, kompozisyonları veya karakterleri farklı iki veya daha fazla bileşenin makro ölçekte birleşmesi olarak tanımlanabilir (Ramulu et al., 1991). Bu bileşenler arasında fark edilir ara yüzeylere sahip iki veya daha fazla belirgin biçimde fazlar bulunur (Hocheng et al., 1992; Ramulu et al., 1991).

Kompozitleri matris malzeme tipine göre metal matrisli, seramik matrisli, polimer matrisli kompozitler olarak üç grupta sınıflandırmak mümkündür (Sheikh-Ahmad, 2009). Ancak, kompozit malzemeler çoğunlukla kullanılan takviye tipine bağlı olarak sınıflandırılır ve elyafli (lifli) ve tanecikli olarak genel iki sınıftadır (Şekil 2.1). Her biri özgün özelliklere ve uygulama potansiyellere sahiptir. Bu iki grubu da kendi içerisinde alt gruplara ayırabiliriz (Staab, 1999).

Lifli bir kompozit sürekli (uzun) veya kıyılmış, kırılmış (whiskers) fiberler içerebilir.

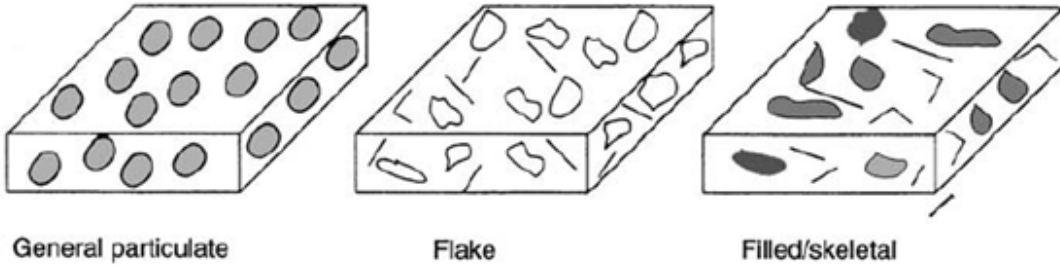


Şekil 2.1. Lifli kompozitlerin şematik gösterimi(Staab, 1999).

Sürekli fiberler geometrik olarak çok yüksek boy/çap oranına sahiptir. Bu fiberler genellikle matris malzemedenden daha güçlü ve daha katı olup, fibere bağlı olarak fiber çapları genel olarak 3 ile 200  $\mu\text{m}$  arasındadır. Sürekli fiberler ile takviyelendirilmiş kompozitler tek tabaka veya çok tabakalı olabilir. Bu kompozitler genel olarak ortotropik özelliklerdedir.

Kırılmış fiberler (whiskers) genellikle kısa ve kalın fiberler olarak düşünülebilir. Uzunluk/çap ( $l/d$ ) oranı;  $5 < l/d < 1000$  arasındadır. Çapları ise genellikle 0.02-100  $\mu\text{m}$  arasında olan fiberlerdir. Bu tür fiberler süreksiz fiberlerdir ve kompozitte düzensiz, veya yanlış oryantasyona sahiptir. Süreksiz fiberler ile oluşturulan malzeme sistemleri tek tabaka kompozitlerdir. Süreksizlikler malzemede anizotropik özelliklere neden olabilir, ancak random takviyeler hemen hemen izotropik kompozitler üretilmesini sağlar.

Tanecikli. Parçacık (tanecik) gerçekte herhangi şekle, boyuta veya yapıya sahip olup, iki alt gruba ayrılır; ince tabaka (tane, balık pulu) ve filled/skeletal (örneğin bal peteği formu). Bu tür kompozitler anizotropik veya ortotropik özelliklerdedir. Bu tür kompozitler, dizaynda mukavemetin önemli olmadığı birçok uygulamada kullanılmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Partiküllü kompozitlerin şematik gösterimi (Staab, 1999).

## 2.2. Kompozitte Fiber ve Matrisin Fonksiyonel Özellikleri

Kompozit davranışını anlayabilmek için, kompoziti oluşturan fiberler ve matris malzemelerin kompozit özelliklerine nasıl katkı sağladığını bilmek gereklidir. Kompozit malzemede fiberlerin ve matris malzemelerin esas fonksiyonları aşağıdaki şekilde verilebilir.

Fiberler;

- Yapısal kompozitlerde yükün %70-90'nını fiberler ile taşınır.
- Kompozitlerde rijitlik, mukavemet, ısıl stabilite ve diğer yapısal özellikleri fiberler sağlanır.

- Kullanılan fiber tipine bağı olarak elektriksel iletkenlik veya yalıtkanlık elde edilmesi sağlanır.

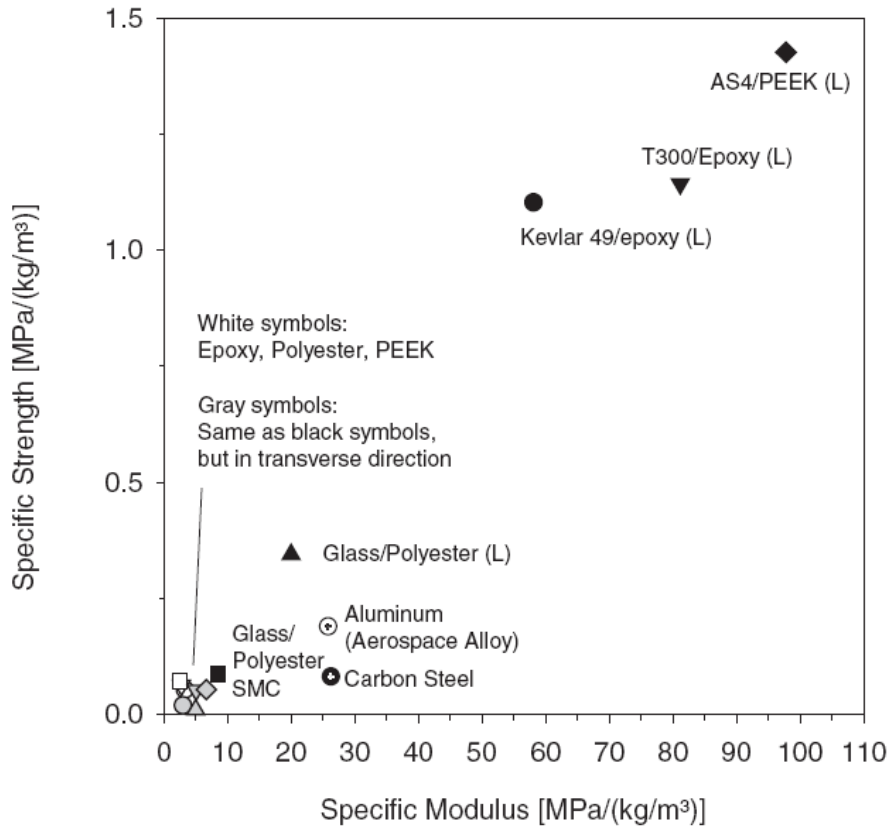
Matris malzeme;

- Matris malzeme fiberlere yük transferini sağlar ve yapının katılığını (esnemezliğini, rijitliğini) ve şeklini sağlar.
- Matris fiberleri izole eder ve bireysel fiberlerin ayrı ayrı olarak davranmasını sağlayabilir. Bu çatlak oluşumunu yavaşlatır veya durdurur.
- Matris iyi bir ürün yüzey kalitesi sağlar ve net şekilli veya net şekle yakın parçaların üretimine yardım eder.
- Matris fiberleri kimyasal veya mekaniksel hasara (aşınma gibi) karşı koruma sağlar.
- Seçilen matris malzemeye bağı olarak, performans karakteristiklerini örneğin süneklik, darbe mukavemeti gibi kompozitin özelliklerini etkiler. Sünek bir matris yapının tokluğunu arttıracaktır. Örneğin yüksek tokluk gereksinimlerinde, termoplastik esaslı kompozitler seçilir.
- Kırılma modu (biçimi) fiberler ile uyumluluğun yanı sıra, kompozitte kullanılan matris malzeme tipi ile de kuvvetlice etkilenmektedir (Mazumdar, 2002).

### **2.3. Kompozitlerin Avantajları ve Eksiklikleri**

- Kompozitlerin özelliklerini monolitik (tek parça) malzemeler ile karşılaştırdığımızda, kompozitlerin rijitlik ve mukavemetleri genelde metalden daha düşüktür. Ancak, spesifik (özgül) mukavemeti (mukavemetin ağırlığına oranı) ve özgül rijitliği (rijitliğin ağırlığına oranı) düşünüldüğünde, kompozitler genel olarak metallere daha üstündürler. Şekil 3'te çeşitli polimer kompozitlerin ve metallere spesifik (özgül) özellikleri gösterilmiştir.
- Fiberler ile takviyellendirilmiş matris malzemelerin mukavemet ve rijitliği fiber doğrultusunda çok yüksektir. Buna karşın, fiber doğrultusunda ve fiber yönü enlemesine mekanik özellikleri farklıdır.

- -Kompozitlerin korozyon direnci, yorulma direnci, ısı yalıtım, iletkenlik ve akustik yalıtım özellikleri metallere göre birçok durumda daha iyidir.
- İmalat açısından bakıldığında, kompozitlerin dizayn edilmesi; parça sayısında, takım ile işleme ve montaj bakımından önemli bir azalma ile sonuçlanır.
- Takım ile işleme basit olmasına rağmen, kompozitlerin imalat maliyeti metallere göre ile karşılaştırıldığında daha yüksektir. Maliyeti, özellikle yüksek performanslı fiberlerin fiyatı, imalat metodlarının yüksek üretilebilirlikten eksiklikleri, kalifiye iş gücüne bağlı oluşu artırmaktadır.
- Özellikle termoset polimer kompozitler hidrotermal çevrelere karşı hassastır ve bu nedenle matris malzemenin böyle çevrelere karşı korunması için ekstra dikkat gerektirir (Sheikh-Ahmad, 2009).



Şekil 2.3. Bazı kompozit malzemelerin ve monolitik malzemelerin spesifik kuvvet ve modülü. Tabakalandırılmış fiberlerin hacim fonksiyonları şu şekildedir. Epoxy ve PEEK kompozitler %60; polyester kompozitler %50; SMC. %20; L uzunlamasına; T enlemesine. (Sheikh-Ahmad, 2009; Staab, 1999).



## 2.4. Takviye ve Matris Malzemeleri

### 2.4.1. Takviye malzemeleri

Kompozit malzemelerin önemli bir bileşenidir ve kompozit malzemeye gerekli mukavemet ve rijitliği verir. Bunlar ince çubuk gibi yapılardır. En yaygın takviye malzemeleri cam, karbon, aramid, bor ve doğal fiberlerdir. Tipik fiber çapları 5  $\mu\text{m}$ 'den 20  $\mu\text{m}$ 'ye kadardır. Glass fiberlerin çapı 5-25  $\mu\text{m}$  arasında, karbon fiberlerin çapı 5-8  $\mu\text{m}$  arasında, aramid fiberlerin çapı 12,5  $\mu\text{m}$ 'dir. İnce çaplardan dolayı, fiberler esnektir ve kolaylıkla değişik şekillere uygundur. Kompozitler için fiberler sürekli fiberlerden süreksiz fiberlere, uzun fiberlerden kısa fiberlere, organik fiberlerden inorganik fiberlere birçok formda olabilir. Cam bol miktarda bulunur ve fiberler arasında en ucuzudur. Cam fiberlerin üç önemli tipi vardır: E glass, S glass, S2 glass. Bu fiberlerin özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir. Maliyet açısından bu cam fiberler karşılaştırıldığında, en ucuz E glass ve en pahalısı S glass'tır. Karbon fiberler düşük modülden yüksek modüle ve düşük mukavemetten yüksek mukavemete çeşitlilik gösterirler. Karbon fiberlerin maliyeti cam fiberlerin çok üstündedir, yani pahalıdır. Aramid fiberlerin fiyatı için cam ve karbon fiberlerin fiyatı arasında olduğunu söyleyebiliriz. Sürekli fiberler filament sarma, pultrüson ve prepreg gibi uygulamalarda kullanılır. Sürekli fiberler en çok termoset ve termoplastik reçine sistemlerinde kullanılmaktadır.

Kıyılmış, doğranmış fiberler enjeksiyon kalıplama, basınçlı kalıplamada kullanılır. Bu tür fiberler sürekli fiberlerin kesilmesi ile yapılır. Dokuma kumaşlar tabakalı kompozitlerde olduğu gibi prepregler yapmaktada kullanılır(Mazumdar, 2002).

Çizelge 2.1. Fiber ve geleneksel malzemelerin özellikleri(Mazumdar, 2002).

Malzeme	Çap ( $\mu\text{m}$ )	Yoğunluk ( $\rho$ ) ( $\text{g/cm}^3$ )	Çekme Modulu (E) (GPa)	Çekme Kuvveti ( $\sigma$ ) (GPa)	Özgül Modülü (E/ $\rho$ )	Özgül Gerilme	Erime Noktası ( $^{\circ}\text{C}$ )	% Uzama	Maliyet
E-Glass	7	2,54	70	3,45	27	1,35	1540+	4,8	Düşük
S-Glass	15	2,50	86	4,50	34,5	1,8	1540+	5,7	Orta
Grafit, yüksek modülü	7,5	1,9	400	1,8	200	0,9	>3500	1,5	Yüksek
Grafit, yüksek mukavemetli	7,5	1,7	240	2,6	140	1,5	>3500	0,8	Yüksek
Bor	130	2,6	400	3,5	155	1,3	2300	-	Yüksek
Kevlar 29	12	1,45	80	2,8	55,5	1,9	500 (D)	3,5	Orta
Kevlar 49	12	1,45	130	2,8	89,5	1,9	500 (D)	2,5	Orta
<b>Dökme maddeler</b>									
Çelik		7,8	208	0,34 – 2,1	27	0,04 – 0,27	1480	5 – 25	<Düşük
Alüminyum Alaşımlar		2,7	69	0,14 – 0,62	26	0,05 – 0,23	600	8 - 16	Düşük

## 2.4.2. Polimer Matris Malzemeleri

### *Termoset Reçineler*

Birdefa kür olmuş termoset reçineler tekrar eritilemez ve yeniden biçimlendirilemezler. Kür olma esnasında, termoset reçineler üç boyutlu molekül zincirler oluştururlar ve çapraz bağlanırlar. Bu çapraz bağlanma nedeni ile, moleküller esnek değildir ve tekrar eritilip şekillendirilemezler. Çapraz bağlanmalar arttıkça, daha rijit ve termal olarak stabil bir malzeme olacaktırlar. Termosetler kırılğan bir doğaya sahiptirler ve genellikle dolgu ve takviye malzemesinin bazı formlarında kullanılırlar. Bu reçineler daha iyi fiber emdirmesi ve kolay işlenebilirlik sağlar. Termoset reçineler daha yüksek termal ve boyutsal stabilite, daha iyi rijitlik, daha yüksek elektriksel ve kimyasal direnç sunarlar. En yaygın reçineler epoksi, polyester, vinlester, fenolik, siyanat ester, poliimid'tir. Bazı termoset reçinelerin temel özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Bazı termoset reçinelerin temel özellikleri(Mazumdar, 2002).

Reçine Malzemesi	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Modülü GPa (10 <sup>6</sup> psi)	Çekme Kuvveti MPa (10 <sup>3</sup> psi)
Epoksi	1,2 – 1,4	2,5 – 5,0 (0,36 – 0,72)	50 – 110 (7,2 – 16)
Fenolik	1,2 – 1,4	2,7 – 4,1 (0,4 – 0,6)	35 – 60 (5 – 9)
Polyester	1,1 – 1,4	1,6 – 4,1(0,23 – 0,6)	35 – 95 (5,0 – 13,8)

### *Termoplastik Reçineler*

Termoplastik malzemeler, genellikle termoset malzemelerden daha sünek ve daha toktur ve dolgu ve takviye malzemesi olmadan yapısal olmayan uygulamalarda kullanılırlar. Termoplastikler ısıtılarak tekrar eritilebilirler ve soğutularak tekrar katılaştırılabilirler. Tekrar yeniden şekillendirme yeteneğine sahiptirler. Termoplastik molekülleri çapraz bağ yapmazlar ve böylece esnektirler. Termoplastikler amorf ve yarı-kristal olabilirler. Amorf termoplastiklerde, moleküller rasgele, gelişigüzel düzenlenmiştir (sıralanmıştır). Yarıkristal plastiklerde kristal bölgesinde, moleküller düzenli bir şekilde düzenlenmiştir (sıralanmıştır). Moleküllerin kompleks doğası nedeni ile, plastiklerde %100

kristallilik mümkün değildir. Termoplastiklerin bazı özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir. Termoplastiklerin düşük rijitlik ve mukavemet değerlerinden dolayı, yapısal uygulamalarda termoplastiklerin dolgu ve takviye malzemesi ile takviyelendirilmesi gereklidir. Termosetler ile karşılaştırıldığında, termoplastikler genellikle zayıf sürünme direncine (özellikle yüksek sıcaklıklarda) sahiptirler. Termoplastikler termosetlere göre kimyasal solventlere (çözücülere) daha duyarlıdır. Termoplastik reçineler birbirlerine kaynak edilebilme özelliğine sahiptir, bu özellik termoset reçinelere göre termoplastikleri bakım ve parça birleştirme işlemlerinde daha elverişli hale getirir. Termoset kompozitlerin bakım işlemleri karışık bir işlemdir ve yapıştırıcı maddeler, itinalı yüzey hazırlama işlemleri gerektirir. Termoplastik kompozitler, termosetlere göre daha yüksek sıcaklık ve basınç gerektirir. Termoplastik kompozitlerde birleşme, termoset reçine sistemlerinde elde edilen birleşme seviyesi kadar yüksek değildir.

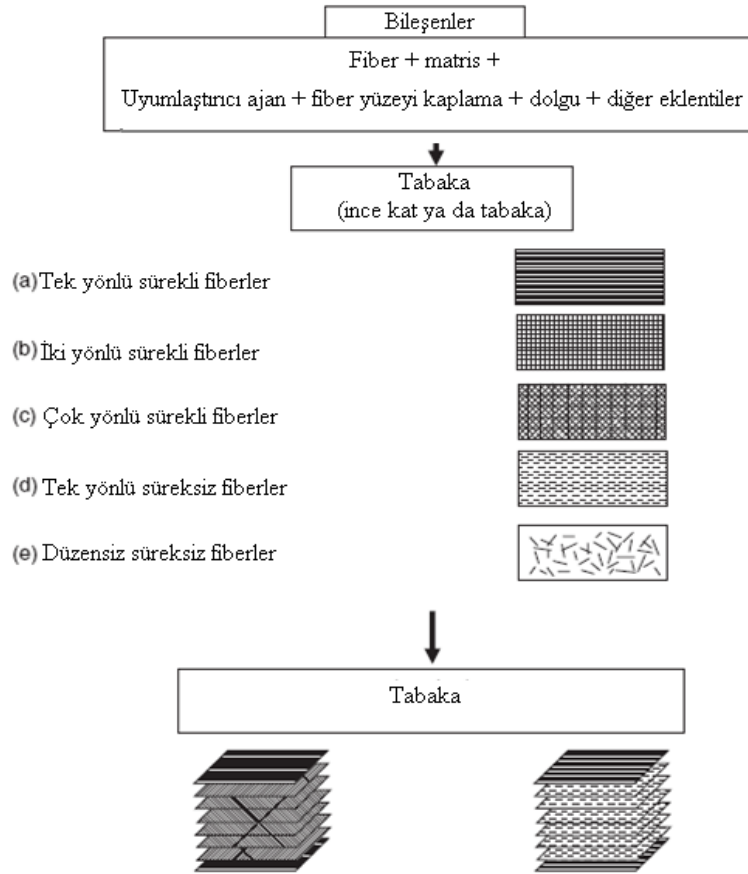
Çizelge 2.3. Tamamlanmamış Termoplastik Reçinelerin Özellikleri (Mazumdar, 2002).

Reçine Malzemesi	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Modülü GPa (10 <sup>6</sup> psi)	Çekme Kuvveti MPa (10 <sup>3</sup> psi)
Naylon	1,1	1,3 – 3,5 (0,2 – 0,5)	55 – 90 (8 -13)
PEEK	1,3 – 1,35	3,5 – 4,4 (0,5 – 0,6)	100 (14,5)
PPS	1,3 – 1,4	3,4 (0,49)	80 (11,6)
Polyester	1,3 – 1,4	2,1 – 2,8 (0,3 – 0,4)	55 – 60 (8 – 8,7)
Polikarbonat	1,2	2,1 – 2,8 (0,3 – 0,4)	55 – 60 (8 -8,7)
Asetal	1,4	3,5 (0,5)	70 (10)
Polietilen	0,9 – 1,0	0,7 – 1,4 (0,1 – 0,2)	20 – 35 (2,9 – 5)
Teflon	2,1 – 2,3	-	10 – 35 (1.5 – 5.0)

## 2.5. Tabakalı Polimer Kompozit Üretim Yöntemleri

Bir kompozit yapının imalatı, bir tabaka (plak, levha, lamina) oluşturmak için çok sayıda fiberin matrisin içerisine katılması ile başlar. Tabaka kalınlığı çoğunlukla 0.1-1 mm arasındadır. Eğer sürekli (uzun) fiberler tabaka yapmak için kullanılırsa, fiberler Şekil 2.3a'da görüldüğü gibi tek yönlü oryantasyonda (fiberler bir yönde) düzenlenebilir. Şekil 2.3 b'de görüldüğü gibi fiberler iki yönlü oryantasyonda (iki yönde olan fiberler çoğunlukla birbirlerine dik açıdır) veya Şekil 2.3c'de görüldüğü gibi çok yönlü oryantasyondadır (fiberler iki yönden daha

fazla yöndedir). Tek yönlü fiberler içeren tabaka için, fiberlerin uzunlamasına (boylamsal) yönünde kompozit malzeme en yüksek mukavemete ve modüle sahiptir. Bununla birlikte, enlemesine (enine) yönünde, kompozitin mukavemeti ve modülü çok düşüktür. İki yönlü fiberler içeren tabaka için, mukavemet ve modül boyuna ve enine yönlerindeki fiber miktarına bağlı olarak değişir. Dengelenmiş bir tabaka için bu özellikler her yönde aynıdır. Bir tabaka süreksiz (kısa) fiberler ve matris malzeme kullanılarak ta yapılabilir. Süreksiz fiberler tek yönlü oryantasyonda (Şekil 2.3d) veya düzensiz, rasgele oryantasyonda (Şekil 2.3 e) düzenlenebilir. Süreksiz (kısa) fiber takviyeli kompozitler sürekli fiber takviyeli kompozitlere göre daha düşük mukavemete ve modüle sahiptir. Bununla birlikte, fiberler rasgele oryantasyonlu ise, tabakanın düzlemdeki tüm yönlerde mekanik ve fiziksel özelliklerini eşit elde etmek mümkün olabilir. Fiber takviyeli kompozit yapıda verilen çökmeyi korumak veya verilen yükü desteklemek için gerekli kalınlık birçok tabakanın belirlenen dizilişte istiflenmesi ile elde edilir ve böylece tabakalı kompozit yapısı elde edilir (Şekil 2.4) (Mallick, 2008).



Şekil 2.4. Fiber takviyeli kompozitlerin yapı taşları (Mallick, 2008).

### 3. TİTREŞİM

Titreşim mekanik bir sistem içinde salınım tanımlayan bir terimdir. Bu frekans ve genlik ile tanımlanır (Cyril M. Harris, 2002b). Titreşimin istenilebileceği zamanlarda yok değildir, örneğin bazen arzu edilir bir akort çatalının, üflemlerli çalgılarda veya mızıkada dilin, veya bir hoparlörde koninin hareketi v.b. gibi.

Daha sıklıkla, titreşim istenmeyen bir harekettir, çünkü boşa enerji harcar ve istenmeyen ses ve gürültü oluşturur. Örneğin, motorların, elektrik motorlarının ya da herhangi mekanik aracın çalışma esnasındaki hareketi istenmeyen titreşimler üretir. Böyle titreşimler motorlardaki dönen parçaların balanssızlığından, düzensiz sürtünmeden, dişli çarkların hareketinden kaynaklanabilir. Dikkatli tasarımlar genellikle istenmeyen titreşimleri minimize ederler .

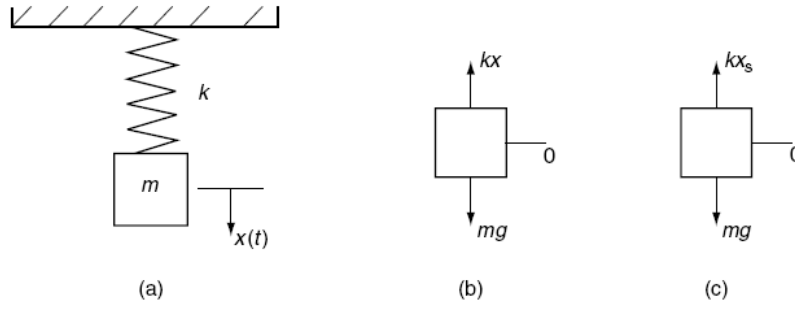
#### 3.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Titreşim teknolojisi her geçen gün büyümekte ve disiplinler arası bir yapı almaktadır. Bu da her türlü makine ve yapı türlerinin kriter ve tasarım özellikleriyle daha çok performans talebine neden olmuştur(Inman, 2006).

Bir sistemin titreşimi onun potansiyel ve kinetik formları arasında enerjinin transferini içerir(Cyril M. Harris, 2002a).

##### 3.1.1. Kütle – Yay sistemi

Basit harmonik hareket ya da titreşim elastik geri getirme kuvvetine sahip yapılar tarafından sergilenir. Bu tip sistemler bazı durumlar için Şekil 3.1 de olduğu gibi sergilenebilir. Bu yapının en basit titreşim modelini teşkil eder ve cihazların, makinelerin ve yapıların numaralarını tanımlamak için başarılı bir şekilde kullanılabilir (Inman, 2006).



Şekil 3.1. (a)Şematik Kütle – Yay, (b) Serbest cisim diyagramı ve (c) Statik kütle – yay sisteminin serbest cisim diyagramı.

$x=x(t)$  fonksiyonu olarak denge konumundan kütlesi  $m$  (kg) deplasman ( $m$ ) ise, bu sistem için hareket denklemi(Şekil 3.1b);

$$m\ddot{x} + k(x + x_s) - mg = 0 \quad (3.1)$$

burada  $k$ , yay katsayısı(N/m);  $x_s$  yer çekimi altında yayın statik yer değiştirmesi ( $m$ );  $g$  ise yerçekiminden kaynaklanan ivme ( $m/s^2$ ). Serbet cisim diyagramında kuvvetlerin toplamından (şekil 3.1 c);

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (3.2)$$

Bu son denklem tek serbestlik dereceli bir sisteminin hareket denklemidir(Inman, 2006).

Yukarıdaki (3.2) denkleminin çözümü (Cyril M. Harris, 2002a);

$$x = A \sin \sqrt{\frac{k}{m}} t + B \cos \sqrt{\frac{k}{m}} t \quad (3.3)$$

Burada  $\sqrt{k/m}$  ile tanımlanan açısal doğal frekans(Cyril M. Harris, 2002a);

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ rad/san} \quad (3.4)$$

Kütlenin sinüsoidal salınımı ve tam bir çevrim aralığı periyottur(Cyril M. Harris, 2002a);

$$T = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (3.5)$$

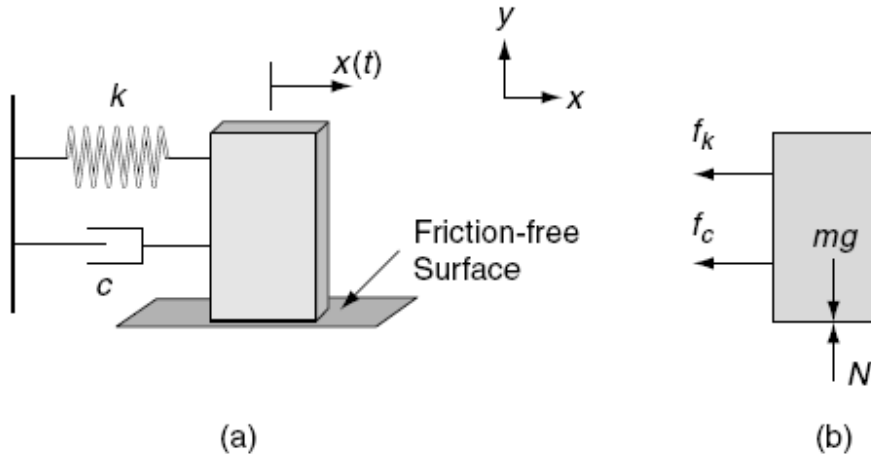
Periyotun karşılıklı doğal frekansı(Cyril M. Harris, 2002a);

$$f_n = \frac{1}{T} = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{kg}{W}} \quad (3.6)$$

### 3.1.2. Kütle – Yay – Damper Sistemi

Tipik olarak sistemde bir sönümleyici varsa periyodik hareket bir süre sonra sönümlenir. Bunu matematik olarak ifade etmenin en basit yöntemi hızı (3.1) denkleminde aşağıdaki gibi belirtmektir (Inman, 2006).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (3.7)$$



Şekil 3.2 (a) Kütle-Yay-Damper şematik gösterimi, (b) a'daki sistemin serbest cisim diyagramı(Inman, 2006).

Burada kritik sönümleme katsayısı  $c_c$  aşağıdaki gibi ifade edilir (Cyril M. Harris, 2002a).

$$c_c = 2\sqrt{km} = 2m\omega_n \quad (3.8)$$

Burada  $\zeta = c/c_c$  kritik sönümlemenin kesiri olarak tanımlanmış(Cyril M. Harris, 2002a).



Sistemin sönümlenme değeri kritik değerden az  $0 < \zeta < 1$  ise denklem (3.7);

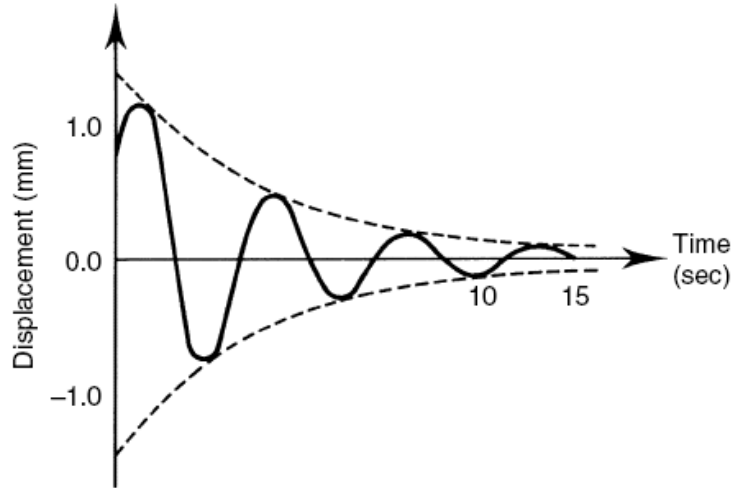
$$x = e^{-\frac{\zeta t}{2m}} (A \sin \omega_d t + B \cos \omega_d t) = C e^{-\frac{\zeta t}{2m}} \sin(\omega_d t + \theta) \quad (3.9)$$

şeklini alır. Burada  $C = \sqrt{A^2 + B^2}$  ve  $\theta = \tan^{-1}(B/A)$ . Burada  $\theta$  faz açısı olarak adlandırılır (Cyril M. Harris, 2002a).

Sönümlü doğal frekansla sönümsüz doğal frekans denklem (3.4) ile ilişkisi;

$$\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 (1 - \zeta^2)} \text{ rad/sec} \quad (3.10)$$

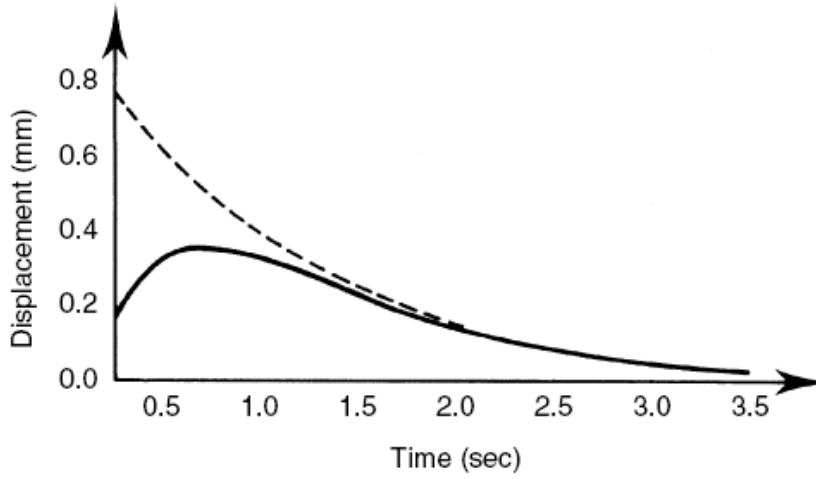
olarak verilir.



Şekil 3.3. Sönümsüz bir sistemin cevabı(Inman, 2006).

**Kritik Üstü Sönümlü:** Eger  $\zeta > 1$  ise(Inman, 2006);

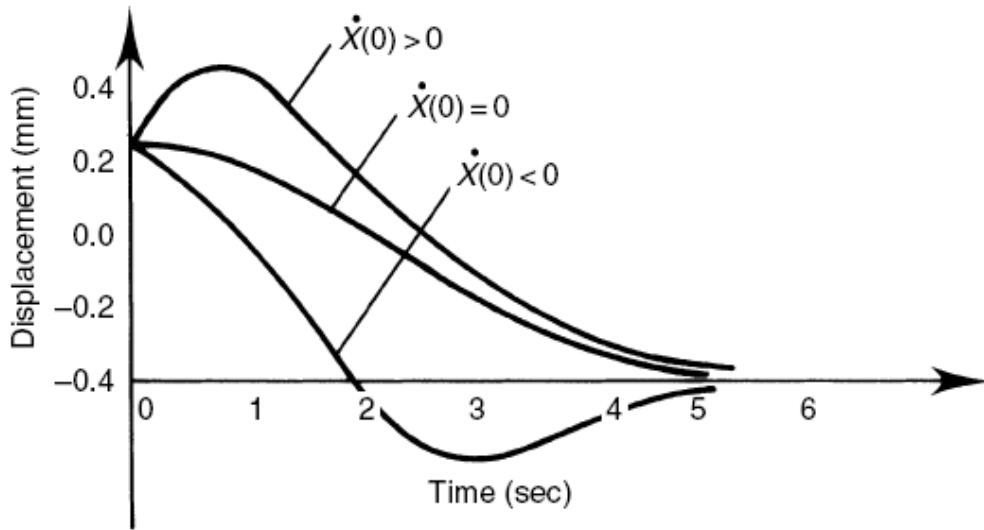
$$x(t) = A e^{(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t} + B e^{(-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t} \quad (3.11)$$



Şekil 3.4.Kritik üstü sönümlü sistemin cevabı(Inman, 2006).

**Kritik Sönümlü** : Eğer  $\zeta = 1$  ise;

$$x(t) = e^{-\omega_n t} [(v_0 + \omega_n x_0)t + x_0] \quad (3.12)$$



Şekil 3.5.Kritik sönümlü sistemin cevabı(Inman, 2006).

### 3.2. Titreşim Sönümlenme

Sönümlenme, mekanik enerjinin dinamik sistemlerde (genellikle ısı enerjisiye dönüşümü ile) dağıtılması olgusudur. Bir dinamik sistemde sönümlenmenin düzey bilgisi sistemin kullanımında, analizinde ve test edilmesinde önemlidir. Örneğin

düşük sönümlenmeye sahip ve sismik alan (33 Hz'den az olan) içerisinde doğal frekansa sahip bir cihaz. Bu örnek kurucu cihazlar, bileşenler ve destek yapılarında sönümlenmenin bilinmesi karmaşık mekanik sistemlerin tasarım ve işlemlerinde önemli olduğunu göstermiştir. Sönümlenme bileşenlerinin doğası ve seviyesi sistemin ve çevresinin dinamik bir modelini geliştirmek için bilinmesi gerekir. Bir sistemde sönümlenme bilgisi hizmet koşulları altında sistemde dinamik çevresel sınırlamalar ayrıca önemlidir. Üstelik, sistemin sönümlenmesinin bilinmesi bir sistemde tasarım değişiklikleri yapmak için kullanılabilir(Silva, 2007).

Ancak, test girdisinin geliştirilmesi için bir test nesnesinde bilinen sönüm seviyesinin önemi genellikle vurgulanan olgudur. Dinamik bir sistemde sönümlenme karakterizasyonu önemlidir, ilk olarak sistemde mekanik enerji dağılımıyla ilgili mekanizmaları anlamak önemlidir.

### **3.2.1. Sönümlenme tipleri**

Her mekanik sistemde mekanik enerji dağılımının bazı tipleri vardır. Sistemlerin modellenmesinde eğer sistemdeki başlangıç toplam mekanik enerjisiyle karşılaştırıldığında, ilgili zaman süresi esnasında yok edilen mekanik enerji küçük ise sönümlenme ihmal edilebilir. Sönümlenmenin birkaç türü mekanik sistemde doğal olarak mevcuttur. Titreşim seviyesi bu şekilde mevcut olan sistemin işleyişi için yeterli değilse dış sönümlenme cihazları özgün tasarım sırasında veya sistemin sonraki tasarım değişiklikleri sırasında da eklenebilir. Sönümlenmenin temel üç mekanizması mekanik sistemin çalışmasında önemlidir. Bunlar:

1. İç sönümlenme (malzeme)
2. Yapısal sönümlenme ( eklem ve arayüzlerde)
3. Akışkan sönümlenme (sıvı ile yapı etkileşimi)

İç sönümlenme çeşitli mikroskopik ve makroskopik işlemler nedeniyle malzeme içinde mekanik enerjiden kaynaklanır. Yapısal sönüm mekanik yapıda bileşenler arasında bağıl hareketlerin sonucunda mekanik enerji dağılımından kaynaklanır. Akışkan sönümlenme bir mekanik sistem ya da onun bir akışkandaki

hareket bileşenlerinde sürtünme kuvveti ve dinamik etkileşimlerin birleşmesi sonucu mekanik enerji dağılımından doğar. Dış sönülmeyicilerin genel iki tipi kendi enerji karakteristiklerini geliştirmek için bir mekanik sisteme eklenebilirler.

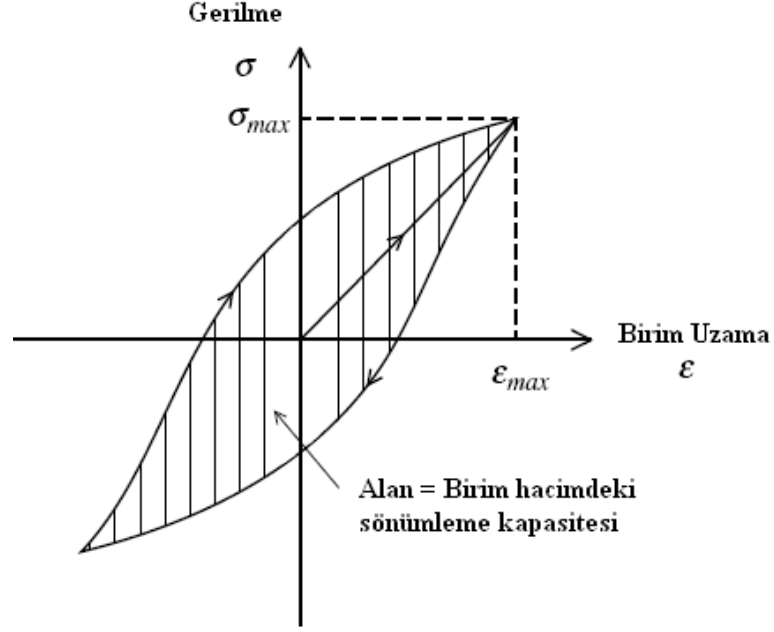
Bunlar:

1. Pasif sönümleyici.
2. Aktif sönümleyici.

Pasif sönümleyiciler harici güç kaynağına ve ya aktüatöre ihtiyaç duymadan bazı tip hareketler vasıtasıyla enerji yayan cihazlardır. Aktif sönümleyiciler gücü dış kaynaktan sağlayan aktüatörlere sahiptirler. Onlar aktif olarak sönümleme ihtiyaçlarını sistemin hareketini kontrol ederek çalışırlar. Sönümleyiciler titreşim denetleyicisi olarak düşünülebilirler.

### **İç Sönümleme**

Malzemenin iç sönümlemesi mikroyapı hatası ile ilişkili enerji dağılımından kaynaklanırlar; termoelastik etki kırışlardaki titreşim, ferromanyetik malzemelerde girdap akımı etkisi, metallerdeki diskolasyon hareketi ve polimerlerdeki zincir hareketi gibi düzgün olmayan gerilmeler sonucu ortaya çıkan yerel sıcaklık gradyanlarından meydana gelir. Değişik modeller iç sönümlemeye neden olan enerji dağılımını simgelemek için belirlenmişlerdir. Bu sönümleme tipini tanımlayan bir çok matematiksel model oluşturulmuştur. Bunun sebebi, tek bir modelin bu sönümleme tipi arkasındaki karmaşık fiziksel olayları açıklamaya yetmemesidir. Malzemedeki kaynaklanan sönümleme temelde ikiye ayrılabilir. Bunlar; Viskoelastik sönümleme ve Histerik sönümlemedir. Aslında bütün sönümleme olaylarının arkasında bir histeresis eğrisi vardır (şekil 3.6). Bu sebeple histerik sönümlemeyi diğer sönümle olayları arkasındaki histeresis eğrisi ile karıştırmamaya dikkat etmek gerekir.



Şekil 3.6.Mekanik Sönümlemedeki Histeresis eğrisi (Silva, 2007).

Histeresis eğrisinin kapsadığı alan malzemenin birim hacim başına sönüm miktarını verir. Bu alan aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$d = \oint \sigma ds \quad (3.13)$$

(3.13) numaralı eşitlik, birim hacimde sönüm kuvvetine karşı yapılan işi, yani sönümleme olayı sırasında mekanik sistemin tüm enerjisinden alınan enerjiyi verir.

Viskoelastik sönümlemenin sisteme kattığı sönümleme miktarı frekansa bağlı olarak değişir. Histerik sönümleme ise frekanstan bağımsız bir karakteristik gösterir

### Viskoelastik Sönümleme

Lineer bir viskoelastik malzeme için gerilme - birim uzama ilişkisi sabit katsayılı zamana göre doğrusal bir diferansiyel denklem ile verilir. Yaygın ilişki;

$$\sigma = E_e + E^* \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.14)$$

ile verilir. Bu Kelvin – Voigt model olarak bilinir. denklemin (3.14) E Young modül ve  $E^*$  bağımsız zaman olduğu varsayılan viskoelastik parametre. Dolayısıyla Kelvin-Voigt modeli için birim hacimdeki sönümlenme modeli;

$$d_v = E^* \oint \frac{ds}{dt} ds \pi \quad (3.15)$$

ile verilir. Kararlı halde harmonik bir uyarıya tabi bir malzeme için;

$$s = s_{max} \cos \omega t \quad (3.16)$$

Denklemin (3.16) denklemin (3.15) yerine konulursa;

$$d_v = \pi \omega E^* s_{max}^2 \quad (3.17)$$

denlemi elde edilir. Denklemin (3.16) da  $t=0$ 'da  $s = s_{max}$ . Denklemin (3.14)'e göre ilgili gerilme  $\sigma_{max} = E s_{max}$  aşağıdaki gibi,

$$d_v = \frac{\pi \omega E^* \sigma_{max}^2}{E^2} \quad (3.18)$$

$d_v$  için bu ifadeler  $\omega$  uyarı frekansına bağlıdır. Kelvin – Voigt modelinden ayrı, viskoelastik sönümlenmenin iki ayrı modeli yaygın olarak kullanıldı. Verilen Maxwell modeli,

$$\sigma + c_s \frac{d\sigma}{dt} = E^* \frac{ds}{dt} \quad (3.19)$$

ve verilen standart lineer katı model,

$$\sigma + c_s \frac{d\sigma}{dt} = E_2 + E^* \frac{ds}{dt} \quad (3.20)$$

ile verilmektedir. Standart lineer katı model Kelvin-Voigt ve Maxwell modelin birleşimini temsil eder. Ama en pratik amaçlar için Kelvin-Voigt modeli yeterlidir (Silva, 2007).

### **Histeretik Sönümlenme**

Bir viskoelastik sönümlenme malzemenin gerilme ve iç sönümlenme kuvvetinden dolayı gerilmenin (ve dolayısıyla hareket frekansı) çeşitli

frekanslarına bağlı olduğu yukarıda belirtilmişti. Malzemenin bazı türleri için sönümlenme kuvvetinin gerilimin (ya da harmonik hareketin frekansının) önemli ölçüde salınım frekansına bağlı olmadığı gözlenmiştir. İç sönümlenmenin bu tipti histeretik sönümlenme olarak bilinir. Histeretik sönümlenme için birim hacim başına  $d_h$  sönümlenme kapasitesi hareket frekansından bağımsız olarak temsil edilebilir.

$$d_h = J \sigma_{max}^n \quad (3.21)$$

$n=2$  durumunda denklem 3.21 için basit bir model aşağıdaki gibi verilir.

$$\sigma = E' \epsilon + \frac{E''}{\omega} \frac{d\epsilon}{dt} \quad (3.22)$$

Bu bir viskoelastik parametre kullanmak için eşdeğerdir,  $E^*$ , denklem 3.14'ye göre  $E^* = E' + jE''/\omega$  hareket frekansına dayanır.  $\omega$  frekansını harmonik hareket durumunda ele alalım, verilen malzeme gerilimi;

$$\epsilon = \epsilon_0 \cos \omega t \quad (3.23)$$

olarak verilebilir. Daha sonra denklem 3.22 aşağıdaki hale gelir;

$$\sigma = E' \epsilon_0 \cos \omega t - E'' \epsilon_0 \sin \omega t = E' \epsilon_0 \cos \omega t + E'' \epsilon_0 \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.24)$$

Malzeme gerilmesinin denklem 3.24'nin sağ tarafında verilen iki bileşene dikkat edilmelidir. İki bileşen malzemenin lineer elastik davranışına uygundur ve birim şekil değiştirme bölgesindedir. Histeretik sönümlenmeye uygun olan gerilimin ikinci kısmı bölgenin dışında  $90^\circ$  dir. Genellikle cevaba uygun kompleks formun kullanımı ile uygun matematiksel gösterim mümkündür.

$$\epsilon = \epsilon_0 e^{j\omega t} \quad (3.25)$$

Denklem 3.24 aşağıdaki hale gelir;

$$\sigma = (E' + jE'') \epsilon \quad (3.26)$$

Denklem 3.14 ve 3.22 birleştirildiğinde, birleştirilmiş viskoelastik ve histeretik sönümlenme için basit bir model verilebilir.

$$\sigma = E_a + \left( E^* + \frac{\dot{E}}{\omega} \right) \frac{d\sigma}{dt} \quad (3.27)$$

Zaman etki alanında operatör ile basit bir şekilde E'nin yerine konulmasıyla hareketin sade elastik denkleminde denklemin 3.27 ile gösterilen sönümlenen bir sistem için hareket denkleminin ortaya çıkar (Silva, 2007).

$$E + \left( E^* + \frac{\dot{E}}{\omega} \right) \frac{\partial}{\partial t} \quad (3.18)$$



#### 4. MODAL ANALİZ

Modal analiz makina yapısının doğal ve rezonans frekanslarını belirlemek için kullanılan bir tekniktir. Esas itibariyle bir tasarım fonksiyonu olan modal analiz tekniği bir makinanın belirli bir frekansta neden aşırı titreşim yaptığını anlamak için kullanılır. Çoğu kez bu titreşimlerin nedeni tahrik frekansının doğal frekanslardan biriyle çakışmasıdır. Böyle bir olayla karşılaşınca çözüm olarak titreşim nedenini ortadan kaldırmak yerine rezonansı yaratan doğal titreşim frekansını değiştirme yoluna gidilir. Modal analiz tekniği kullanılarak ne gibi yapısal değişikliklerin, doğal frekansları nasıl değiştireceği anlaşılır (Fu, 2001).

Deneysel modal analiz, lineer ve zamandan bağımsız bir sistemin modal parametrelerinin (frekanslar, sönüm katsayıları, modal vektörleri ve ölçeklendirilmesi) belirlenmesinde kullanılan bir işlemdir. Modal parametreleri, sonlu elemanlar analizi gibi analitik yollar ile de belirlenebilir. Deneysel modal analizinin tercih edilmesindeki temel neden, analitik uygulamanın sonuçlarını doğrulamak ve düzeltmektir. Modal analizi tek başına tüm problemi çözmede yeterli olmasa da genelde işlemin en önemli parçalarından biridir(Bill).

Modal analiz doğal frekanslar, sönümlenme faktörleri ve mod şekillerinin formunda bir sistemin doğal dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi işlemidir ve onun dinamik davranışı için bir matematiksel model hazırlamak için kullanılır. Formüle edilen matematiksel model sistemin modal modeli olarak kullanılır ve onun modal verisi olarak bilinir (Fu, 2001).

Deneysel modal analiz tarihi 1940'larda bir uçağın modal parametrelerinin belirlenmesine dayanır ve bunun sonucunda da titreşim problemin doğru bir şekilde tahmin edildiği görüldü. İlk zamanlarda dinamik gücü ölçmeye yarayan çevirici sistemlerin ilkeliği ve uygulamanın uzun süreler alması nedeni ile bu yöntem pratik değildi. Modal analiz modern çağı 1960'larda dijital mini bilgisayarların ve Fast Fourier Transform (FFT)' in bulunmasıyla başlamış oldu. Bugün; deneysel modal analiz, sinyal iyileştirme ve elektrik mühendisliğinin bilgisayar etkileşimi, makine teorisi, titreşimler, akustikler, makina

mühendisliğinden kontrol teorisi ve uygulanmış matematikten parametre kestirme gibi birkaç bilim dalını bir araya getirir(Randall D, 1999).

Deneysel verilerden modal parametrelerinin belirlenmesi işlemi birkaç evre içerir. Bunlar Modal Analiz Teorisi, Deneysel Modal Analiz Yöntemleri, ölçülen sayılar ile matris diferansiyel denklemleri ile gösterilen klasik titreşim teorisi arasındaki teorik ilişkiyi içerir; Modal Veri Elde Edilmesi, modal parametre kestirme safhasında kullanılacak olan girdi verisinin bulunmasının temel yöntemlerini içerir. Modal parametrelerini kestirme safhasında elde edilen sayısal algoritmanın gerektirdikleri ile teorinin gereksinimlerinin eşleşmesinden emin olunmalıdır. Modal Parametre Kestirmesi, modal parametrelerinin tahmininin uygulamadaki problemiyle ilgilidir. Ölçülen değerden bir deneysel modal analizi yardımıyla belirlenen matematik modelin seçimi üzerine kurulmuştur. Bu evrede meydana gelen hatalar, genellikle önceki evrelerde yapılan kabullerin ihlalden dolayı kaynaklanır. Modal Veri Sunumu/Doğrulaması, modal parametrelerinin fiziksel görünüşlerinin elde edildiği ya da yorumunun yapıldığı evredir. Örneğin bu basit olarak; ölçülen serbestlik derecelerinin geometrileri boyunca ilişkilendirilmiş frekans, sönüm ve modal vektörlerinin sayısal çizelgeleri olabilir (Randall D, 1999).

Bir yapının dinamikleri fiziksel olarak frekans ve konum tarafından ayrıştırılır. Bu kirişler ve yaylar gibi sürekli sistemlerin kısmi diferansiyel denklemlerinin analitik çözümleriyle açıkça kanıtlanmıştır (Fu, 2001). *Modal analiz teorisi*, teorik olarak lineer sistemlerin doğal frekansların var oluşu, sönüm katsayıları ve mod şekilleri ile açıklanan klasik titreşim tanımına dayanır. Bu teori, kümelenmiş veya ayrık parametreleri ve devamlı modaller kadar iyi olan modalleri içerir. Bu teori ayrıca titreşimin modal parametreleri için mümkün olan kompleks modları kadar iyi olan gerçek normal modları içerir. Titreşim teorisine olan dönüşümler arasındaki ilişki, modern deneysel analizin anlaşılması için çok önemlidir(Randall D, 1999). Modal analiz doğrusal zamanla değişmeyen dinamik bir sistemin titreşim cevabı basit harmonik hareketin bir dizi doğal kombinasyonu olarak ifade edilebileceği titreşimin doğal modları olarak adlandırılan gerçeğe dayanır. Bu kavram karmaşık bir dalgayı temsil etmek için sinüs ve kosinüs dalgalarına benzer bir Fourier kombinasyonu kullanılmasıdır. Titreşimin doğal

modları dinamik bir sistemin doğasındandır ve tamamen onun fiziksel özelliklerinden (kütle, katılık ve sönümlenme) ve uzaysal konumundan belirlenir. Her mod onun modal parametreleri açısından açıklanmıştır: doğal frekans, modal sönümlenme faktörü ve karakteristik yer değiştirme modeli yani mod şekli. Mod şekli basit ya da kompleks olabilir. Tüm titreşimde her bir doğal modun derecesi hem kaynak tahriklerinin özelliklerinden hem de sistemin mod şekillerinden belirlenir.

Modal analiz hem deneysel hem de teorik deneyleri kapsar. Modal analiz kuramı onun kütle, katılık ve sönümlenme özelliklerinden oluşan dinamik bir sistemin fiziksel bir modeline dayanır. Bu özellikler kısmi diferansiyel denklemler şeklinde verilebilir. Örneğin onun kütle dağılımı ve elastikiyet özelliklerinden belirlenen bir dizi aynı titreşimin dalga denklemidir. Denklemin çözümü dizinin doğal frekansların ve mod şekillerini ve onun zorlanmış titreşim cevabını sağlar. Ancak, daha gerçekçi bir fiziksel model genellikle onların uzaydaki dağılımları açısından kütle, katılık ve sönümlenme özelliklerini yani kütle, katılık ve sönümlenme matrisini oluşturabilir. Bu matrisler hareketin normal diferansiyel denklem seti içine dahil edilmiştir. Doğrusal bir dinamik sistemin süperpozisyon ilkesi bize denklemleri tipik bir öz değer problemine dönüştürmek için imkan sağlar. Çözüm sistemin modal verilerini sağlar.

#### **4.1. Modal Analiz Yöntemleri- Frekans Cinsi**

Frekans yanıt fonksiyonu (FRF), mekanik bir yapının dinamik özelliklerini ortaya koyan temel bir ölçüm yöntemidir. Deneysel modal parametreleri (frekans, sönüm, mod şekilleri), bir dizi FRF ölçümünden sonra elde edilir. FRF, yapı üzerindeki iki nokta arasındaki ilişkinin frekansın fonksiyonu olarak elde edilmesini sağlar. Kuvvet ve hareket vektörel büyüklükler olduğundan belirli bir yöne sahiptirler(Richardson, 1999). Modal analiz ölçülen titreşim verilerinden (doğal frekans, sönüm kaybı faktörü ve modal sabitleri) modal parametreleri ayıklayan bir işlemdir. Ölçülen veri ya frekans cevap fonksiyonunun ya da impuls cevabının formunda olabildiği için frekans domain modal analizi ve zaman domain modal analizi vardır (Fu, 2001).

FRF ölçümü, belirli serbestlik derecesine sahip girdi kuvveti başına; yanıtın sahip olduğu yer değiştirme, hız ve ivme değerlerinin eldesini sağlar.

Yanıt fonksiyonunun yer değiştirme, hız veya ivmeye bağlı olarak çözülmesine göre farklı kavramlar ortaya çıkar:

**Kompliyans:** Yer değiştirme / Kuvvet

**Hareketlilik:** Hız / Kuvvet

**Inertance veya Receptance:** İvme / Kuvvet

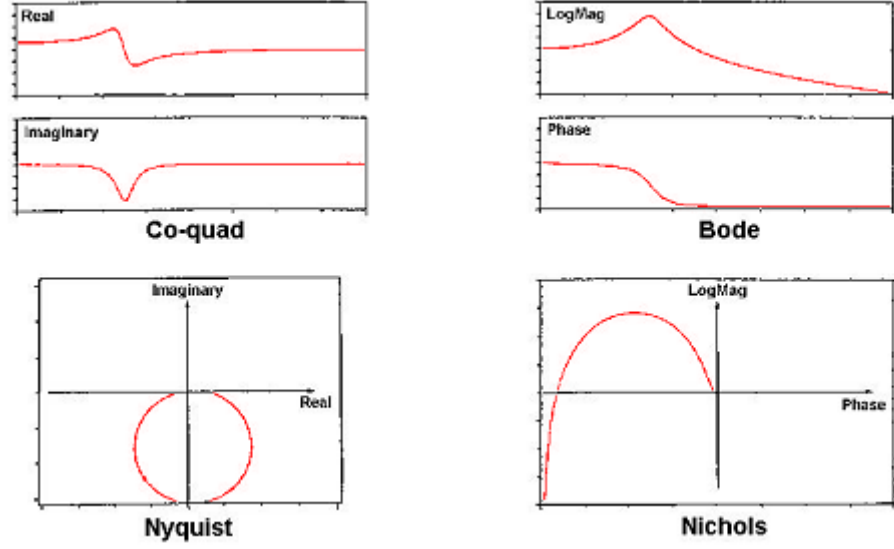
**Dinamik Sertlik:** 1 / Kompliyans

**Empedans:** 1 / Hareketlilik

**Dinamik Kütle:** 1 / Inertance

FRF, Şekil 4.1' de farklı şekillerde gösterildiği gibi karmaşık değerli bir frekans fonksiyonudur.

Ölçülen frekans fonksiyon cevabının verisi kullanılarak modal analizin temeli ölçülen yapının önceden tanımlanmış bir matematik modeli kullanılarak uygun olarak çizimdir. bu model yapının Serbestlik Derecesi sayısını, sönümleme tipini ve mümkün olduğunca ölçülen frekans aralığındaki titreşim modlarının sayısını tahmin eder, bu varsayımlar ölçümden her bir FRF eğrisinin matematiksel ifadesini dikkate almalıdır. Sonuç olarak sonraki iş bir FRF'nin matematiksel formülündeki tüm modal parametrelerini elde etmek için eğri uydurma işlemi denemesi olacaktır.



Şekil 4.1. FRF' in alternatif şekilleri(Richardson, 1999).

Modal analizin doğruluğu ölçülen bir FRF eğrisinin matematiksel olarak nasıl uygun olduğu basit bir problem değildir. Matematikte bir eğri uydurma cabasının doğruluğu ya da başarısı genellikle hata fonksiyonu tarafından tanımlamaya ya da minimize etmeyi amaçlayabilmesidir. Bu yaklaşım sadece uydurulan eğride matematiksel model doğru olduğunda geçerlidir. Ancak yanlış bir matematiksel model kullanıldığında uydurulan eğri sonucu kötü olmasa bile başarısızlığa mahkumdur.

Frekans domain modal analizi için, matematiksel modeli bir frekans cevap fonksiyonunun analitik ifadesidir, bu gerçekten FRF veri ölçümünü temsil etmektedir. Bu birkaç soruyu akıllara getirir. İlki, bir yapı sonsuz sayıda serbestlik derecesine sahiptir. Sistemin bir analitik FRF ifadesi:

$$\alpha_{ij}(\omega) = \sum_{r=1}^W \frac{r A_{ij}}{a_r^2 - \omega^2 + a_r^2 \eta_r j} \quad (4.1)$$

Yalnızca ilk m modu ölçümün frekans aralığında düşer (frekans sıfırdan başlar) ve

$$\alpha_{ij}(\omega) = \sum_{r=1}^m \frac{r A_{ij}}{a_r^2 - \omega^2 + a_r^2 \eta_r j} \quad (4.2)$$

Denklemiyle belirtilir. Bu modlar ölçülemediği için, burada analiz edilecek herhangi bir veri yoktur. Bir çözüm yüksek frekans tarafından temsil edilen görünmez modları seçmek için  $R_{ij}(\omega)$ :

$$\alpha_{ij}(\omega) = \sum_{r=1}^m \frac{r A_{ij}}{\omega_r^2 - \omega^2 + \omega_r^2 \eta_{r,j}} + R_{ij}(\omega) \quad (4.3)$$

ile hesaplanır.

Nümerik analizde herhangi bir eğri uydurma gibi hata fonksiyonu genellikle tanımlanan titreşim modelleri ve ölçülen FRF verilerinden hesaplanan FRF arasındaki fark olarak

$$e_{ij}(\omega) = \hat{\alpha}_{ij}(\omega) - \alpha_{ij}(\omega) \quad (4.4)$$

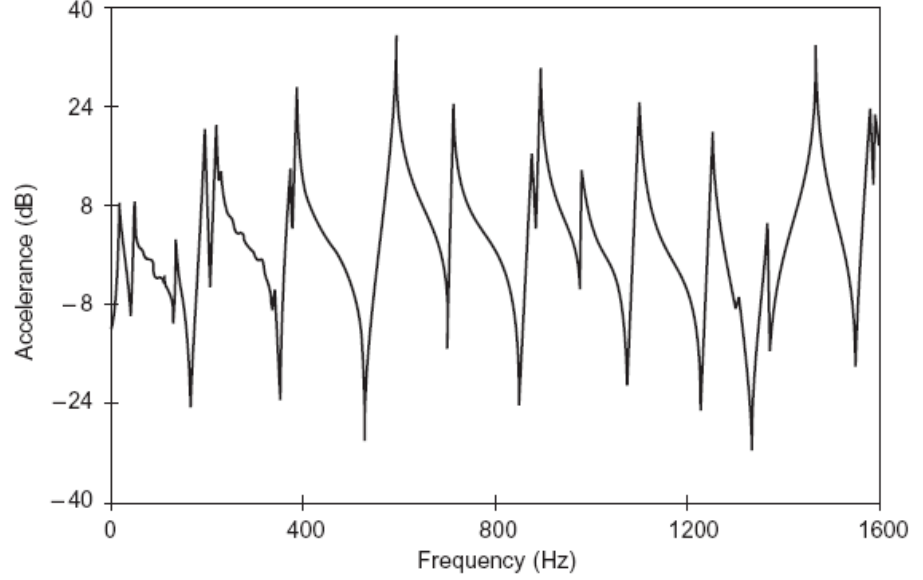
tanımlanır.

#### 4.2. Ölçülen FRF Verilerinden Titreşim Modlarının Bulunması

Frekans yanıt fonksiyonu (FRF), mekanik bir yapının dinamik özelliklerini ortaya koyan temel bir ölçüm yöntemidir. Deneysel modal parametreleri (frekans, sönüm, mod şekilleri), bir dizi FRF ölçümünden sonra elde edilir. FRF, yapı üzerindeki iki nokta arasındaki ilişkinin frekansın fonksiyonu olarak elde edilmesini sağlar. Kuvvet ve hareket vektörel büyüklükler olduğundan belirli bir yöne sahiptirler.

Modların kesin sayısı eğer uygun analiz tamamlanırsa açık hale gelir fakat doğru bir analiz, mevcut modellerin kesin sayısını tam olarak bilmeden çoğu zaman mümkün değildir. Başka bir sonuç bizim anlamlı ve yararlı analiz sonuçları elde etmek için seçilen frekans aralığında kesin numarasını bilmemiz gerekir. Biz bir FRF'nin farklı formlarında bir dizi sunabileceğini biliyoruz. Bunlardan bazıları bir titreşim modunu tanımlayabilmek için çok yararlıdır. FRF'nin ne formda olduğunun analizlerde bunları kullanarak titreşim modellerini belirlemek için elverişli olduğu aynı derecede anlamak için yararlıdır. Bir FRF'nin frekans grafiği vs modülü bazen bu rezonans pikleri gösterir gibi titreşim modellerini tanımlamak için önemli grafik olarak algılandı. Bu mantıksızlık iki senaryo ile uyumlu değildi:

(1) her mod her ölçülen FRF üzerinde görülmeyebilir, (2) bir FRF'nin her tepe gerçek bir mod değildir. Örneğin; şekil 4.2' de gösterildiği ölçülen FRF kirişlerden oluşan bir yapı değildir. Bu gürültü nedeniyle birkaç pik içerir ve aynı zamanda frekans aralığında bazı görünmez modeller vardır.



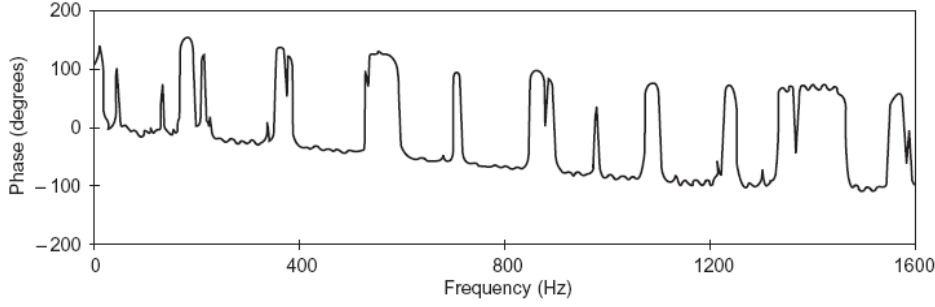
Şekil 4.2. Bir kiriş yapıdan ölçülen bir FRF noktasının modülü(Fu, 2001). (Jimin He and Zhi-Fang Fu 2001)

Analizin önceki titreşim modellerinin tanımlanması için birkaç FRF eğrisine dayanması gerekir. Uygun bir çözüm birlikte dB ölçeğinde tüm FRF eğrilerine eklenmektedir. Bu titreşim modellerinin toplam FRF çizgilerinde daha belirgin hale gelecektir.

Bir FRF faz grafiğini çizmek ek yardım sağlayabilir. Teorik olarak biz bir titreşim modunun 180 derece faz değişimine neden olacağını kabul ediyoruz. Sönümlenmenin varlığı ile, faz değişimi daha azdır. Gerçek bir ölçüm için faz grafiği gürültüye duyarlıdır. Bu bazen burada bir rezonanstan diğer rezonansa doğru pek çok faz değişimi olabileceği anlamına gelir. Bu durumda faz grafiği tanımlanan titreşim modelleri için faydalı bir bilgi kaynağı değildir.

Burada SDV tabanlı yöntemler mevcuttur. Olası tüm yöntemler, yakın mode durumunda başarısız olabilir. İki mode gerçekten yakın ise, onlara bir mode söylemek zor olacaktır. Bu durum genel düşünceden daha sık olur çünkü bir çok

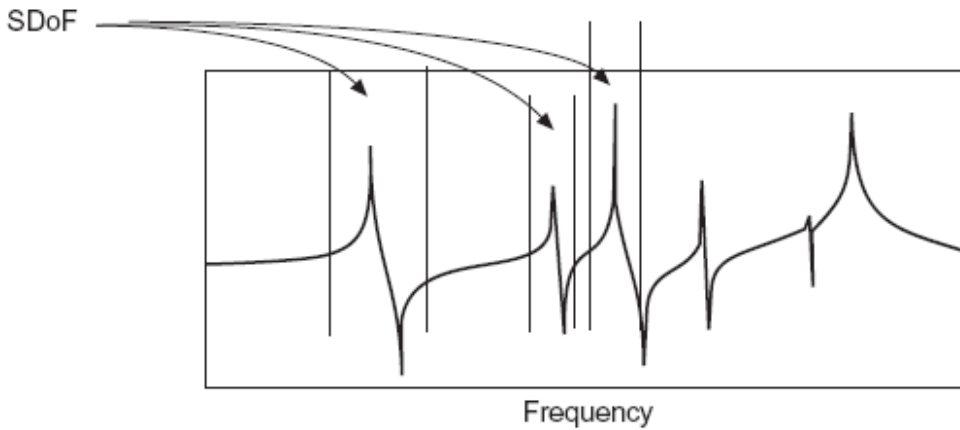
gerçek yapılar bazı coğrafi simetri şekli gösterir. Bu simetrimin varlığı özdeş modellerinin çiftine teorik olarak öncülük yapabilir. Ancak yapısal kusurlardan ya da ölçüm hataları nedeniyle aynı modellerin bu çiftleri yakın modellerle çift olurlar. Ölçülü bir FRF eğrisinde her çift bir modelu olarak görülmektedir. Gerçek bir mode Nyquist grafiğinde bir daire belirtisi göstermesi gerekir. Yanlış bir rezonans tepesi Nyquist düzlem üzerine düz bir hat çıkışı izleyebilecektir.



Şekil 4.3. FRF noktasının fazı(Fu, 2001) (Jimin He and Zhi-Fang Fu 2001)

#### 4.3. SDoF Yönteminde FRF Verilerinden Modal Veri Türetme

Tüm SDoF modal analiz yöntemi SDoF tahminlerine dayanır: bir rezonans çevresinde FRF bu titreşim moduna hakimdir ve diğer titreşim modellerinin katkıları ihmal edilebilir. Bu varsayım tutarsa bir MDoF sistemi ya da gerçek bir yapıdan sonra FRF anlık bir SDoF sisteminden FRF olarak düzenlenebilir. Bir SDoF sisteminin matematiksel modelinin sadeliği daha sonra mode mode modal parametreleri bir eğri boyunca türetmek için kullanılabilir.



Şekil 4.4. Bir MDoF'un FRF üzerinde SDoF varsayımı(Fu, 2001). (Jimin He and Zhi-Fang Fu 2001)



Bu SDoF yaklaşımı aslında uzatılabilir. Bu katkılar katkılar karmaşık bir sabit olarak düşünüldüğü için yerine çevresindeki tüm diğer modelar tarafından yapılan katkıları ihmal edilir. Bu modeların iyi bir şekilde ayrıldığı durumlarda geçerlidir. Bu genişletilmiş SDoF varsayım tutarsa, bazı modal analiz yöntemleri başarılı bir şekilde uygulanabilir.

#### 4.3.1. Peak-Picking yöntemi

Peak-picking yöntemi modal analiz için basit bir SDoF yöntemidir. Ayrıca yarı güç yöntemi olarak adlandırılır. SDoF varsayımı katı uygulamalara dayanır. Yöntem SDoF sisteminden veri olarak bir rezonans çevresinde FRF verisi gibi davranır. Kullanılan Peak-picking yöntemi:

- (a) Doğal frekans tahmini,

Analiz için seçilen r'ninci modeun doğal frekansı FRF'nin peak değerinden tanımlanır.  $|\alpha_r(\omega)|_{\max}$  olarak  $\omega_r = \omega_{peak}$

- (b) Sönümlenme tahmini;

Sönümlenme tahmini için  $\omega_a$  ve  $\omega_b$  'de yarı güç noktası  $\frac{\alpha_{max}}{\sqrt{2}}$  genliği ile belirlenen her iki bölümden ilki bulunmaktadır. Sönümlenme kayıp faktörü ya da sönümlenme oranından sonra rezonans tepe genişliği tahmin edilebilir, yani:

$$\eta_r = \frac{\omega_b^2 - \omega_a^2}{2\omega_r^2} \approx \frac{\omega_b - \omega_a}{\omega_r} \quad (4.5)$$

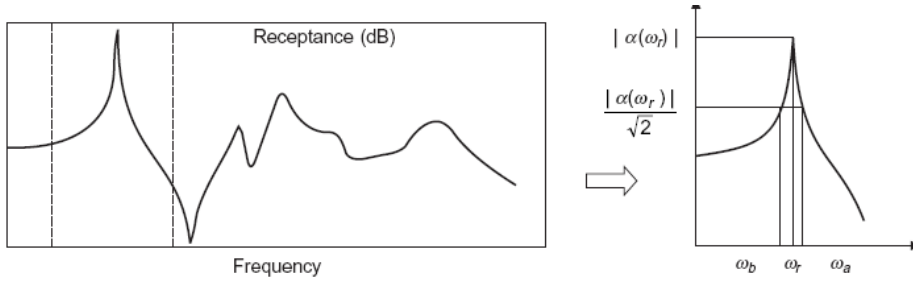
$$\zeta_r = \frac{\omega_b^2 - \omega_a^2}{4\omega_r^2} \approx \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_r} \quad (4.6)$$

- (c) Modal sabitlerinin tahmini;

SDoF modelinden peaktaki FRF,  $\alpha_{max} = \frac{A_r}{\eta_r \omega_r^2}$  olarak bilinir. modal sabiti  $A_r$ ,  $A_r = \alpha_{max} \eta_r \omega_r^2$  formülünden tahmin edilebilir. Viskoz sönümlenme modeli için  $A_r$ ,

$A_p = 2\alpha_{max}\zeta_p\omega_p^2$  formülü kullanılır.

Dikkate değer basitliği nedeniyle peak-picking yönteminden hızlı bir şekilde analiz sonuçları elde edilebilir (Şekil 4.6). Ancak, bu doğru modal veri üretme yeteneğine sahip değildir. Peak FRF değerine dayanan bu yöntem, doğal frekans ve modal sabitleri tahmin etmek için doğru bir şekilde ölçmek çok zordur. Sönümlenme sadece yarı güç noktasından tahmin edilebilir. Bundan başka FRF veri noktaları kullanılır. Yarı güç noktaları enterpolasyonlu olmak zorundadır.

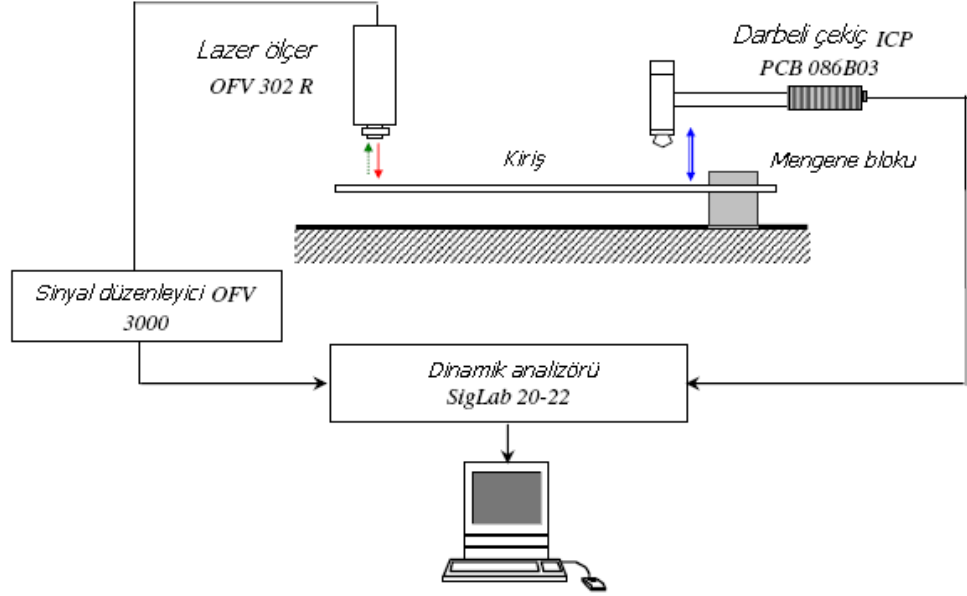


Şekil 4.5. Peak-picking yöntemi (Fu, 2001).

Bu yöntem için FRF veri ölçümünde gürültü ile ilgili mekanizma olmadığı açıktır. Peak-picking yöntemi sadece iyi ayrılmış modeller ve iyi frekans çözünürlüğü ile ilgili kolay sönümlenen FRF verisi için uygundur.

#### 4.4. Vuruş Etki Testi

FRF ölçümlerinin, Hızlı Fourier dönüşümü (FFT) analizleri ile dijital ortamda kontrol edilebilmesi ile 1970'lerin sonlarında geliştirildi ve günümüzde çok sık kullanılan bir teknik haline gelmiştir. Bu teknik pratikliği, taşınabilir olması ve uygun maliyeti ile makine yapıların titreşim analizlerinde sıkça kullanılır (Richardson, 1999).



Şekil 4.6. Vuruş testi(Berthelot et al., 2008)

Çekiçle test etme farklı koşullar altında iyi sonuçlar verebilen düzgün gelişmiş bir metottur (Şekil 4.6). Bu test tekniği mekanik bir yapıda, Dirac titreşimi denilen etkinin oluşması durumunda uygulanır. Bu durumda mekanik yapı bu etkiye kendi öz değerleriyle cevap verir (doğal frekans, sönümlenme gibi). Piyanoya kısa bir süreliğine vurulduğunda tepki göstermesi, bu etki için örnek gösterilebilir. Bu sırada piyano tuşlarına basıldığında, her piyano tuşu düzgün bir şekilde titreşecektir (Bill).

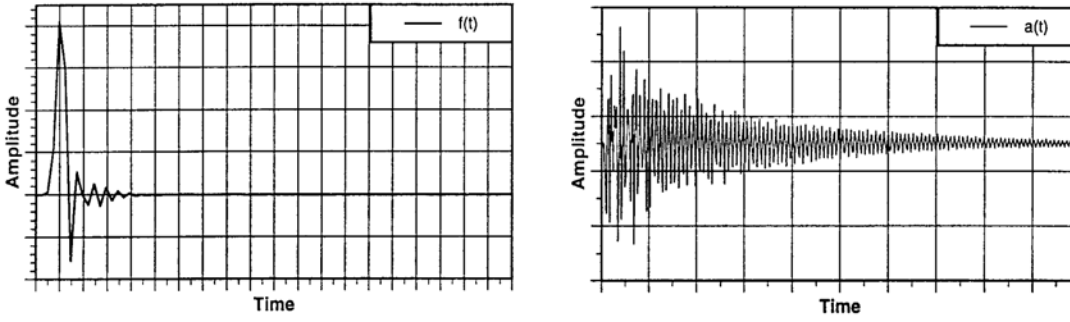
Pratikte, gerçek Dirac titreşiminin teorik sürekliliği sıfır olduğunda titreşim var olmaz. Genel olarak etki süresi arttıkça oluşan frekansların aralığı azalır. Üzerine uç yerleştirilmiş etki çekici farklı malzemelerden oluşabilir (çelik, plastik, kauçuk gibi). Her malzemenin uyarı sürekliliği ve frekans boyutu farklıdır. Yapıların frekanslarının incelendiği testlerde, çekiçlere kendilerine özgü etki uçları takılır (Bill).

Uyarı için etki çekici kullanılması sırasında en önemli konu çekicinin kütesinin seçimi ve uç sertliğinin seçimidir. Bu parametreler etki süresini belirler. Bu da girdinin frekans içeriğini belirler. Tipik etki çekiçlerinin çeşitli setleri vardır. Bütün bu çekiçler ek kütleler içerirler. Etki süresinin kontrolünü sağlamak için çeşitli malzeme uçları (kauçuk, plastik ve çelik gibi) ve ek çekiç kütesi takılabilmelidir(2006).

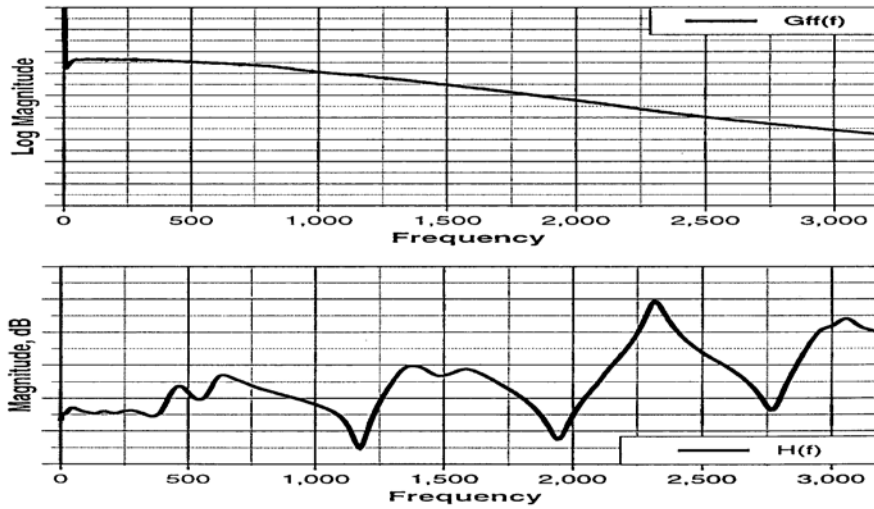
Şekil 4.5’de vuruş testinin şematik bir gösterimi mevcuttur. Sırada bu testi uygulamak gelir.

- Girdi kuvvetinin ölçülebilmesi için uç kısmında yük hücresi bulunan bir vuruş çekici
- Sabit bir noktadaki ivmeyi ölçmek için bir ivmeölçer
- FRF verilerini ölçmek için bir FFT analiz grubu
- Modal parametrelerini belirlemek ve mod şekillerini görüntülemek için bir yazılım-donanım.

Birçok makina ve yapı vuruş testi ile analiz edilebilir. Yapının büyüklüğüne göre gereken impuls girdi kuvvetinin değişmesiyle vuruş çekicinin de boyutunun değişmesi kaçınılmazdır. Şekil 4.7 ve 4.8’de tipik bir vuruş testinden elde edilen sinyaller verilmiştir.



Şekil 4.7. Girdi Kuvveti ve Yanıt Sinyal(Richardson, 1999)



Şekil 4.8. Vuruş APS’si ve FRF (Richardson, 1999)

#### 4.4.1. Logaritmik azalma yöntemiyle sönüm oranının bulunması

Logaritmik azalma yöntemi, zamana bağlı olarak sönüm altındaki bir sistemin sönüm oranını bulmak için kullanılır. Logaritmik azalma ( $\delta$ ), seçilen 2 tepe noktasının genliklerinin oranının doğal logaritması alınarak bulunur;

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left( \frac{x(t)}{x(t+nT)} \right) \quad (4.5)$$

Burada,

$x(t)$  : t zamanındaki genlik,

$x(t+nT)$  : n periyot ötedeki genlik,

$n$  : pozitif yönde seçilen tepe noktası,

olarak gösterilmiştir.

Bu eşitlikten yola çıkarak sönüm katsayısına geçiş yapılır;

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi n}{\delta}\right)^2}} \quad (4.6)$$

Bulunan bu sönüm oranı, titreşim halindeki sönümlü sistemin frekansı  $\omega_d$ 'nin bulunmasını sağlayarak, sistemin sönümsüz haldeki doğal frekansı  $\omega_n$ 'ye geçiş imkanı sağlar.

$$\omega_d = \frac{2\pi}{T} \quad (4.7)$$

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (4.8)$$

Bu eşitlikteki T, iki genlik tepe noktası arasındaki geçen zaman, yani iki dalga boyu arasındaki periyottur.

## 4.5. Girdap Akımları

Literatürde “*Eddy Current, Fuko akımı*” olarak da bilinen girdap akımları, değişken bir manyetik alan uygulanan iletkenin içinde oluşan elektrik akımıdır. Bu akımlar, iletkenin direnci sebebiyle ısı enerjisine dönüşerek sistemden atılır. Bu olay sisteme hareket yönüne zıt yönde etkiyen ve hıza bağlı olarak değişen bir kuvvet şeklinde etki eder.

Mühendislik uygulamalarında girdap akımının geniş bir kullanım alanı vardır. Bunlara örnek olarak, indüksiyon ocaklarında ısı üretme özelliğinden yararlanmak suretiyle oluşturulan girdap akımları, akım çizgilerini inceleyerek hata tespiti, elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi ve manyetik frenleme ve sönmüleme sistemleri verilebilir.

### 4.5.1. Girdap akımının hesaplanması

Girdap akımından oluşan güç dağılımı

$$P = \frac{\pi^2 B_p^2 d^2 f}{6k\rho D} \quad (4.9)$$

formülüyle hesaplanır. Burada;

$k$  : İnce tabakalar için “1”, kalın tabakalar için “2” seçilir

$P$  : Güç dağılımı (W/kg)

$B_p$  : Maksimum akı yoğunluğu (T)

$d$  : Tabaka et kalınlığı veya tel çapı(m)

$f$  : Frekans (Hz)

$\rho$  : Direngenlik ( $\Omega\text{m}$ )

$D$  : Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )

olarak belirtilmiştir.

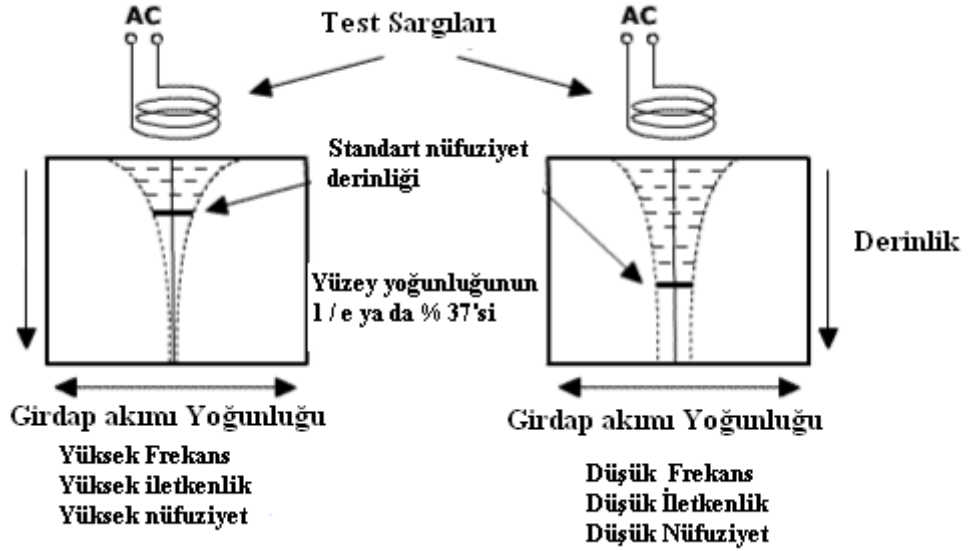
Çok hızlı değişen manyetik alanlarda, yüzey etkisine bağlı olarak, yukarıda verilen eşitlik geçerliliğini yitirir. Çünkü bu tür alanlarda yüzeyde iletkenlik maksimum değere ulaşırken, nüfuziyet derinliği azalma eğilimi gösterir, malzeme üzerindeki homojen dağılıma özelliğini yitirir. Bununla birlikte aynı manyetik alan

üzerindeki frekans artarsa, girdap akımları da artar. Homojen olmayan yüzey derinliği girdap akımlarının artışı engelmez (Fiorillo).

Manyetik alanın nüfuziyet (penetrasyon) derinliği (Şekil 4.10) aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir;

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4.10)$$

Burada;  $\delta$ , nüfuziyet derinliği (m),  $f$ , frekans (Hz),  $\mu$ , manyetik geçirgenlik (H/m),  $\sigma$ , elektriksel iletkenlik (S/m) olarak gösterilmiştir.



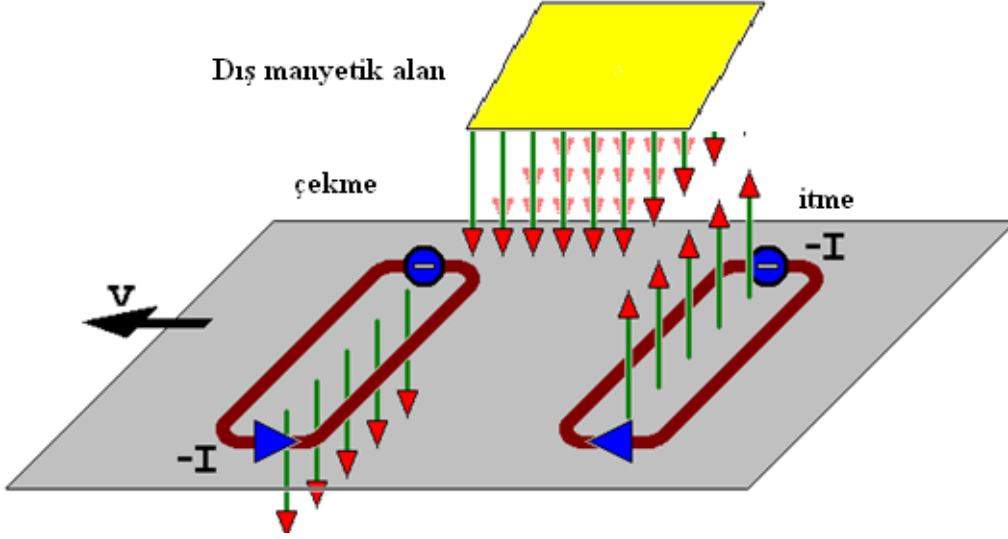
Şekil 4.9.Girdap akımı nüfuziyet derinliği(Seong-Soo Cho).

#### 4.5.2. Girdap akımları ile sönümlenme

İletken bir tabaka üzerinde elektromıknatis yardımıyla, elektromanyetik alan yaratarak girdap akımları oluşmasını sağlayarak, harekete, diğer bir deyişle bu tezin konusu olan titreşime zıt yönde bir kuvvet oluşturarak titreşimin sönümlenmesini tanımlar.

Girdap akımları ile sönümlenmenin, diğer sönümlenme yöntemlerine göre birçok avantajı vardır. Bunlardan en göze çarpanı, tamamen temassız bir şekilde sönümlenme kuvvetinin oluşturulmasıdır. Diğer sönümlenme çeşitlerinde olduğu

gibi sönümlenme elemanının sisteme entegrasyonu sırasında karşılaşılan güçlükler girdap akımları yardımıyla sönümlenme yönteminde ortadan kalkmaktadır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Manyetik alanın, plaka ile bağıl hızına göre değişen etkisi

([http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/91/Eddy\\_currents\\_en.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/91/Eddy_currents_en.png))



## 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma aşağıdaki aşamaları içermektedir.

1. Cam, karbon ve keklar takviye malzemeleri (Bir adet bakır folyo tabaka merkezinde) kullanılarak polyester matrisli tabakalı kompozit kirişlerin üretilmesi,
2. Kompozit kirişlerin deney tertibatına bir ucu ankastre olmak koşuluyla bağlanıp impulse çekici ile girdi verilerek titreşimlerin oluşturulması ve elektriksel olarak iletken tabaka üzerinde girdap akımları yaratılarak elektromanyetik mıknatıs aracılığıyla da bu titreşimin kontrol altına alınıp sönümlenmesi
3. Kirişlerin mekanik özelliklerinin tespiti
4. Sönümlemenin bilgisayar ortamında analiz edilmesi

### 5.1. Deneyde Kullanılacak Kirişlerin Üretilmesi

Örgü tipi cam ( $600\text{gr/m}^2$ ), karbon ve keklar ( $250\text{gr/m}^2$ ) elyaf kumaşlar takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak “doymamış polyester reçine” kullanılmıştır. Ortoflatik polyester reçine (CE 92 N8) Cam Elyaf Sanayi A.Ş. firmasından temin edilmiştir. 100 gr reçineye  $25^{\circ}\text{C}$ 'de % 1,5 oranında Kobalt Naftanat ve % 1,5 oranında Metil Etil Keton Peroksit ilave edilmiştir. Kullanılan polyester reçine, oda sıcaklığında kür olma özelliğine sahiptir. Tabakalı kompozit kirişler el yaturma tekniği ile üretilmiştir.

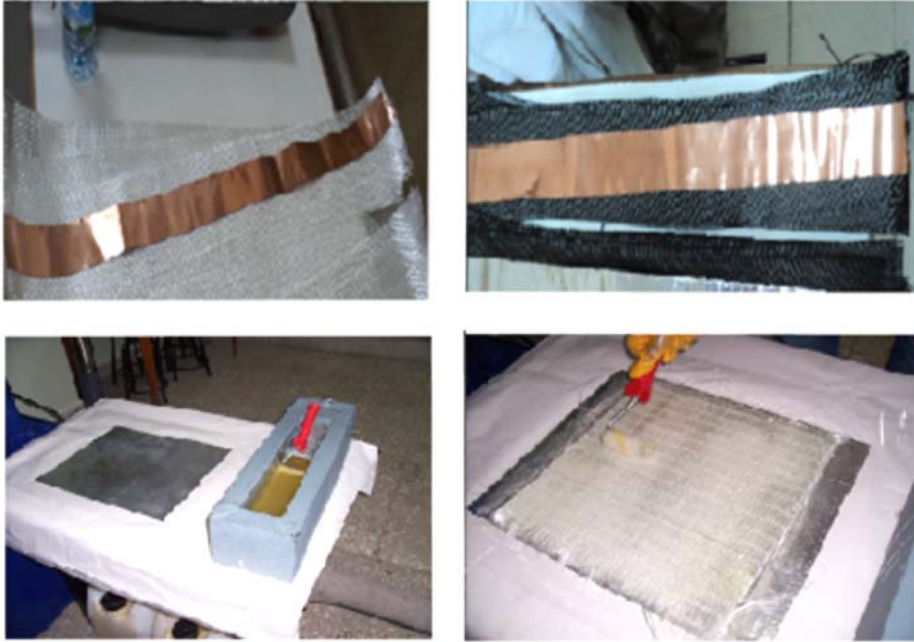


Şekil 5.1.Kompozit üretimi için kumaşların kesilmesi



Şekil 5.2. Kullanılan kumaşlar soldan-sağa (a) Aramid elyaf, (b) Karbon elyaf, (c) Cam elyaf.

Her bir kirişte toplamda 5 adet tabakadan oluşmaktadır. İlk iki tabaka aynı cins kumaş elyaf, orta tabakada bakır folyo, son iki tabaka da yine ilk iki tabakayla aynı cins kumaş elyaf kullanılmıştır. Üretim sırasında tabakalar arasına 0.125mm kalınlığında ve 10 cm x 60 cm ölçülerinde 1 adet bakır folyo konulmuştur. Daha sonra polyester emdirilmiş elyaf kumaşlar bir pres içerisinde kalıba konularak oda sıcaklığında 120 bar basınç uygulanmıştır. Uygulanan presleme süresi 120 dakikadır. Üretim aşamaları Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3. Kompozit üretim aşaması.

## 5.2. Modal Analiz Deneyinin Yapılışı

Hazırlanan kompozit kirişlerin titreşim sönümlenmesi kalıcı mıknatıs yardımıyla elektromanyetik alan altında girdap akımı oluşturularak sağlanmıştır.

Üretilen kirişler, bir ucu sabit olacak şekilde deney düzeneğine bağlanmıştır. Serbest uca elektromıknatıs, 15"er mm boşluk bırakılarak konumlandırılmıştır. Güç kaynağından elektromıknatısa kademe kademe arttırılmak kaydıyla akım verilerek kiriş üzerindeki iletken bakır tabakanın üzerinde bir girdap akımı yaratılmıştır. Girdap akımlarının, kirişin titreşimini sönümleyip sönümlemediğini ölçmek için, serbest uçtan kirişe impuls çekici ile girdi verilmiş ve bu etki noktasının yakınına, kirişi dikey olarak ortalayacak şekilde ivme ölçer yerleştirilmiştir. Alınan veriler, bilgisayar ortamına aktarılarak incelenmiştir (Şekil 5.4).



**Deney Düzeneği**



**Güç kaynağı ve Sinyal koşullandırıcı**



**İvme ölçer**

**Şekil 5.4. Deney düzeneği**

Girdap akımının sönümlenme oranına etkisi 'Peak-Picking Yöntemi' ile incelenmiş olup kirişin ilk iki mod değerleri Comsol Paket Programında hesaplanmıştır. Üretilen kompozit kirişlere 0, 1, 3 ve 5 gibi farklı akım değerinde

konum sinyalleri alınmıştır. Alınan konum sinyallerinin Matlab Paket programında Hızlı Fourier Dönüşümü yapılmış ve frekans spektrumları karşılaştırılmıştır.

### **5.3. Çekme Deneyi**

Çekme deneyleri ASTM D-3039 standardı esas alınarak, Shimadzu marka AUTOGRAPH AG-IS serisi universal çekme makinasında yapılmıştır. Çekme hızı 5 mm/dak olarak alınmıştır. Test anında numunelerdeki birim şekil değiştirme video ekstansometre (SHIMADZU Non-contact Video Extensometer DVE-101/201) ile ölçülmüştür.

### **5.4. Eğilme Deneyi**

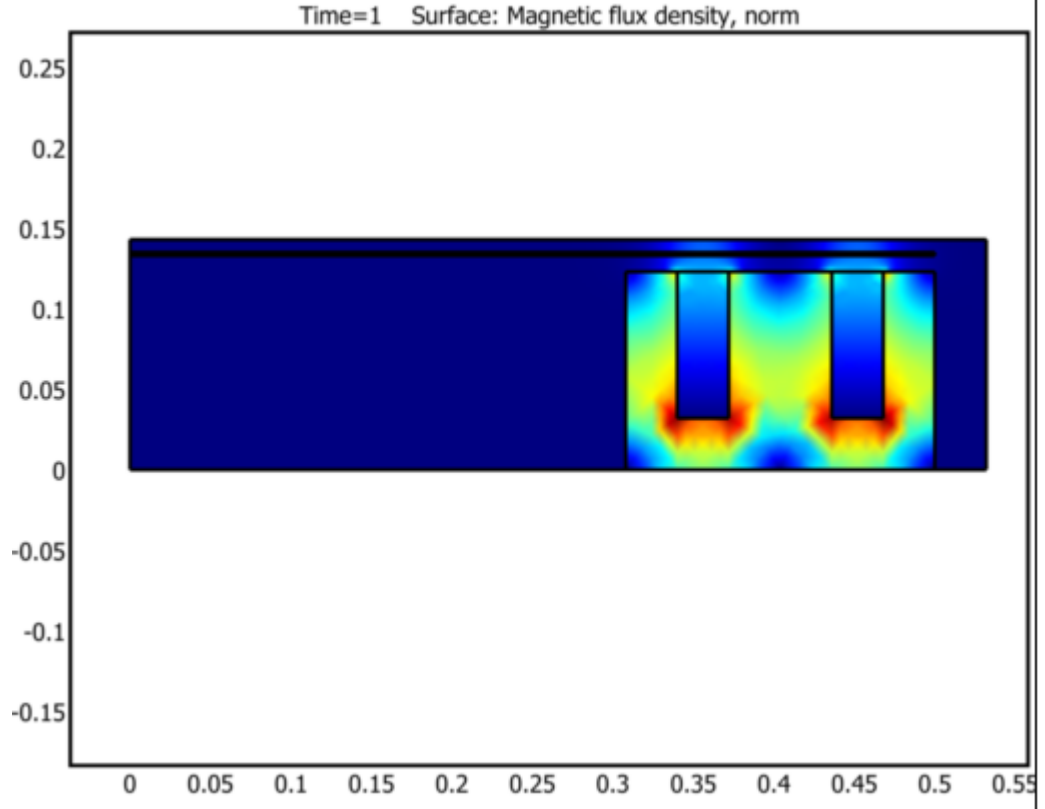
Üç noktalı eğilme deneyleri, ASTM D-790 standardına göre, Shimadzu marka AUTOGRAPH AG-IS serisi universal çekme makinasında eğilme aparatı kullanılarak yapılmıştır. Destek açıklığı 50 mm, bası hızı ise 1.3 mm/dak olarak seçilmiştir.

### **5.5. Kısa Kiriş Kayma Testi**

Kısa kiriş kayma deneyleri, ASTM D-2344 standardına göre universal çekme makinasında eğilme aparatı kullanılarak yapılmıştır. Deney numunesinin genişliği 6,4mm, boyu ise 26,3 mm olarak alınmıştır. Destek açıklığı/kalınlık oranı ise 5 tir.

### **5.6. Sonlu Elemanlar Analizi**

Girdap akımı sönümleyicisinin nümerik analizinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sistemin sonlu elemanlar modeli COMSOL paket programında oluşturulmuş ve çözdürülmüştür. Donanım imkanlarının kısıtlı olması nedeniyle model 2 boyutlu olarak kurulmuştur. Şekil 5.5'te COMSOL ortamında oluşturulan sonlu elemanlar modeli görülmektedir.



Şekil 5.5. Sonlu elemanlar modeli

Mekanik analiz bölümü için, z eksenindeki düzlem gerilmelerinin sıfır kabul edildiği “*plane stres*” modu, manyetik analiz bölümü için ise “*magnetostatic*” modu seçilmiştir. Kirişin titreşim süresi boyunca yaptığı yer değişimleri çok küçük olarak kabul edildiği için hareketli ağ opsiyonu kapalı tutulmuştur.

## 6. SONUÇLAR

### 6.1. Deney Sonuçları

Girdap akımının sönümlenme oranına etkisi “Logaritmik azalma” yöntemiyle incelenmiş olup, yerdeğiştirme – zaman grafiğinde 1. ve 5. saniyelerdeki genliklerin tepe noktaları ele alınmıştır. İlk olarak sönümsüz ölçüm, sonrasında da elektromıknatısa bakır üzerinde girdap akımı yaratabilmesi amacıyla, sırayla 1 amper, 3 amper ve 5 amper verilerek sönüm oranları ölçümü yapılmıştır. Her numune için aynı değerlerdeki ölçümlerden üçer örnek alınıp ortalaması hesaplanmıştır.

Çizelge 6.1. Aramid elyaf için yapılan deney sonuçları

Akım (Amper)	x(1)	x(5)	Logaritmik Azalma	Sönümlenme Oranı	Ortalama
	3,395	1,124	0,09601469	0,015279429	
0	3,24	1,106	0,09335798	0,014856744	<b>0,015068</b>
	3,22	1,02	0,09985114	0,015889796	
1	3,316	1,154	0,09168174	0,014590049	<b>0,01524</b>
	2,646	0,6932	0,11634626	0,018513908	
3	2,772	0,7135	0,11787985	0,01875786	<b>0,018636</b>
	2,866	0,6184	0,13320134	0,02119489	
5	3,16	0,7174	0,12878514	0,020492488	<b>0,020844</b>

Çizelge 6.2. Cam elyaf için yapılan deney sonuçları

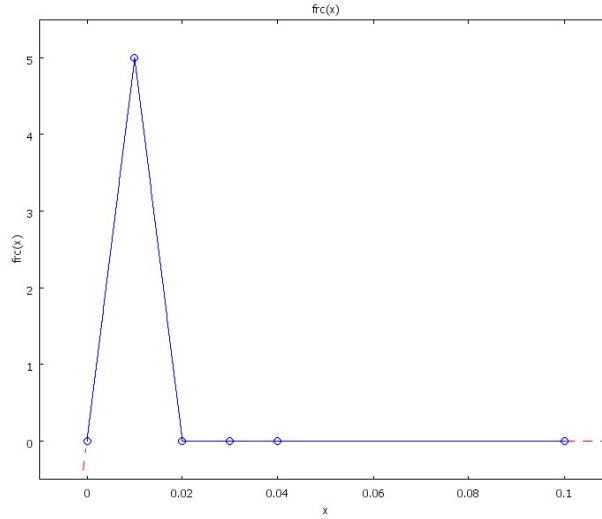
Akım (Amper)	x(1)	x(5)	Logaritmik Azalma	Sönümlenme Oranı	Ortalama
	-1,827	-0,4974	0,18834426	0,029962461	
0	-1,951	-0,5283	0,18912555	0,03008664	<b>0,030025</b>
	-1,775	-0,4238	0,2073458	0,032982155	
1	-1,87	-0,3884	0,2275208	0,036187342	<b>0,034585</b>
	-1,965	-0,2916	0,27619168	0,043914864	
3	-2,046	-0,3149	0,27091099	0,043076801	<b>0,043496</b>
	-1,845	-0,1617	0,35242878	0,056002755	
5	-1,941	-0,186	0,3395042	0,053955064	<b>0,054979</b>

Çizelge 6.3. Karbon elyaf için yapılan deney sonuçları

Akım (Amper)	x(1)	x(5)	Logaritmik Azalma ( $\delta$ )	Sönümleme Oranı ( $\zeta$ )	Ortalama
	3,525	0,3581	0,2482887	0,039485557	
0	-5,209	-0,5187	0,25045953	0,03983024	<b>0,039658</b>
	-4,633	-0,3925	0,26800566	0,042615676	
1	3,491	0,2759	0,27554954	0,043812959	<b>0,043214</b>
	-4,009	-0,272	0,29211679	0,046441666	
3	3,353	0,2387	0,28689528	0,045613278	<b>0,046027</b>
	-3,769	-0,2078	0,31464515	0,050014658	
5	-4,119	-0,2015	0,32762919	0,05207306	<b>0,051044</b>

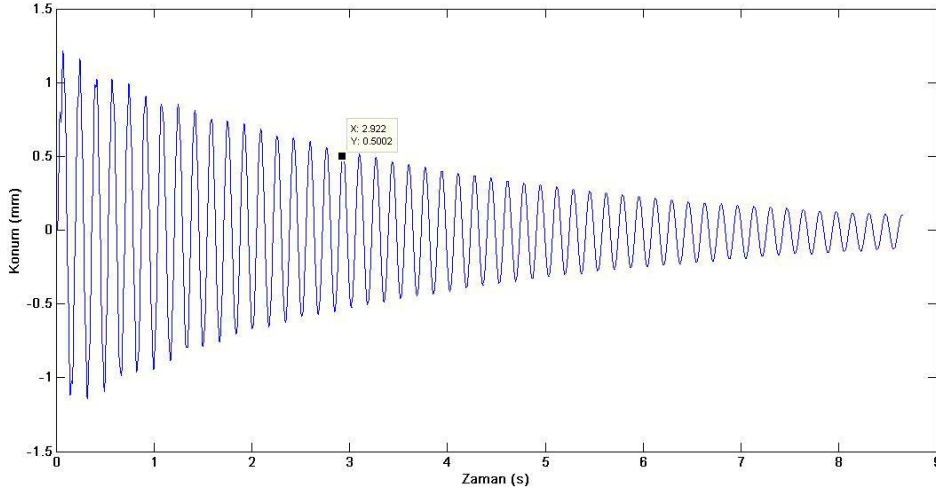
Şekilde görüldüğü gibi sönüm katsayıları, iletken bakır levha üzerinde oluşan girdap akımları sayesinde artış göstermiştir. Cam elyaf en fazla olmak üzere, sönüm oranları artışı kullanılan fiber içeriğine göre farklılık göstermektedir.

Deney sırasında uygulanan impuls girdinin grafiği şekil 6.1’de verilmiştir.

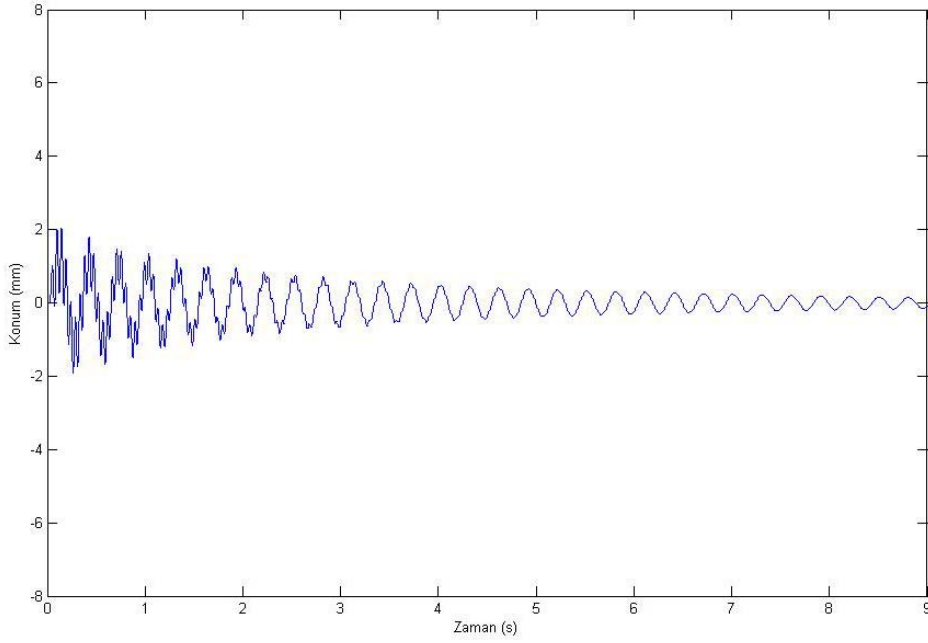


Şekil 6.1. İmpuls girdinin grafiği

Elektromıknatıs üzerinden akım geçirilmeden yapılan vuruş testi sonucunda elde edilen konum-zaman sonuçları sırasıyla karbon ve cam fiber için Şekil 6.2, 6.3'te verilmiştir.



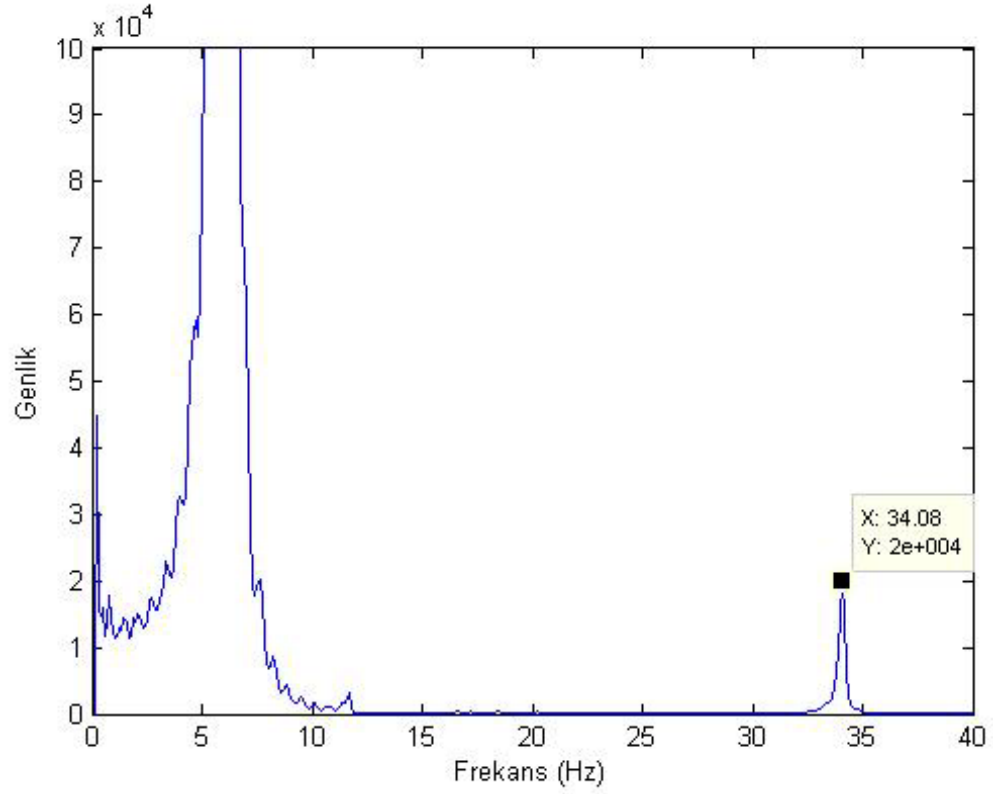
Şekil 6.2. 0 Amper Konum – Zaman Grafiği (karbon)



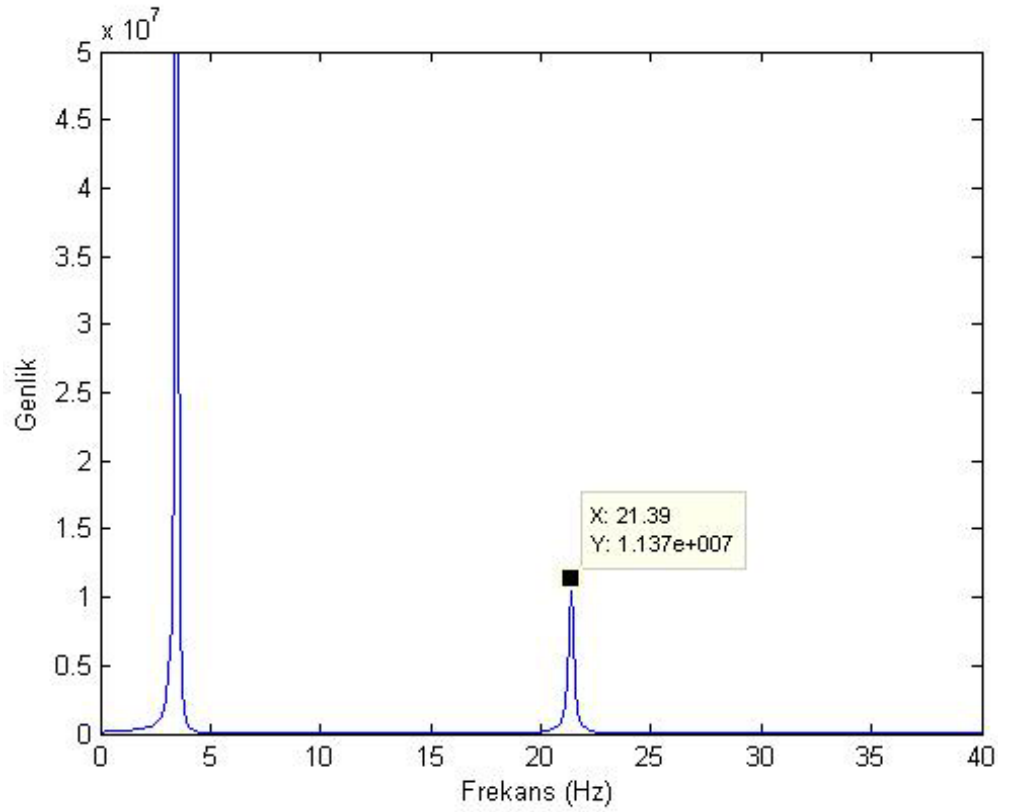
Şekil 6.3. 0 Amper konum zaman grafiği (cam).

Bu sonuçların FFT leri alındığında frekansa bağlı olarak Şekil 6.5 ve 6.6 sonuçları elde edilmiştir.

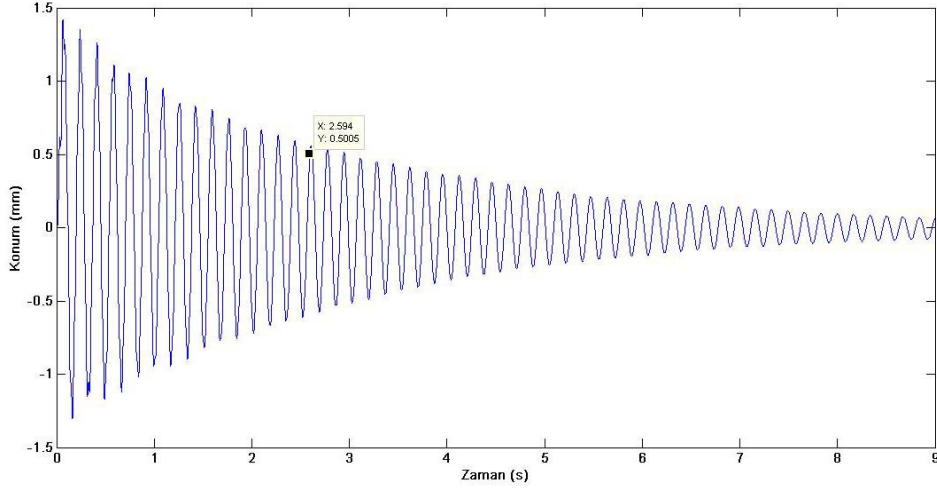




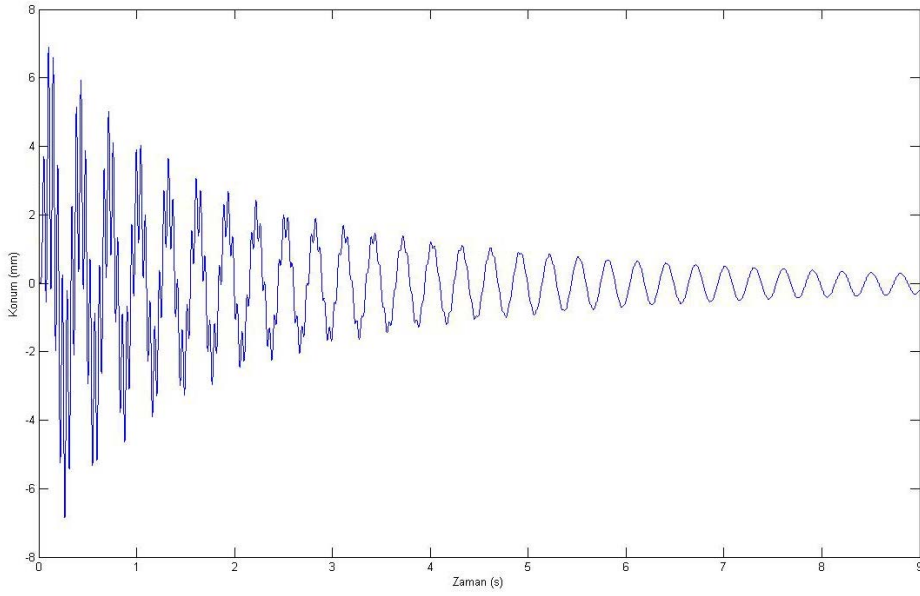
Şekil 6.4. 0 Amper koşulunda frekans sinyali (karbon)



Şekil 6.5. 0 Amper koşulunda frekans sinyali (cam)

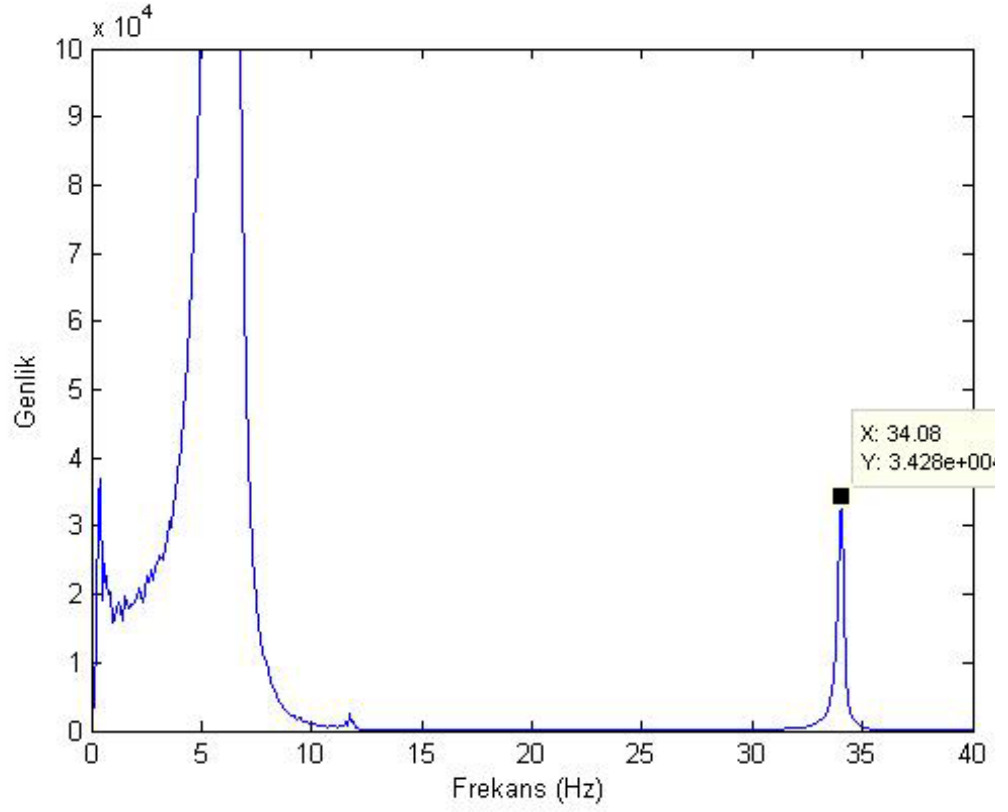


Şekil 6.6. 1 Amper Konum – Zaman Grafiği (karbon)

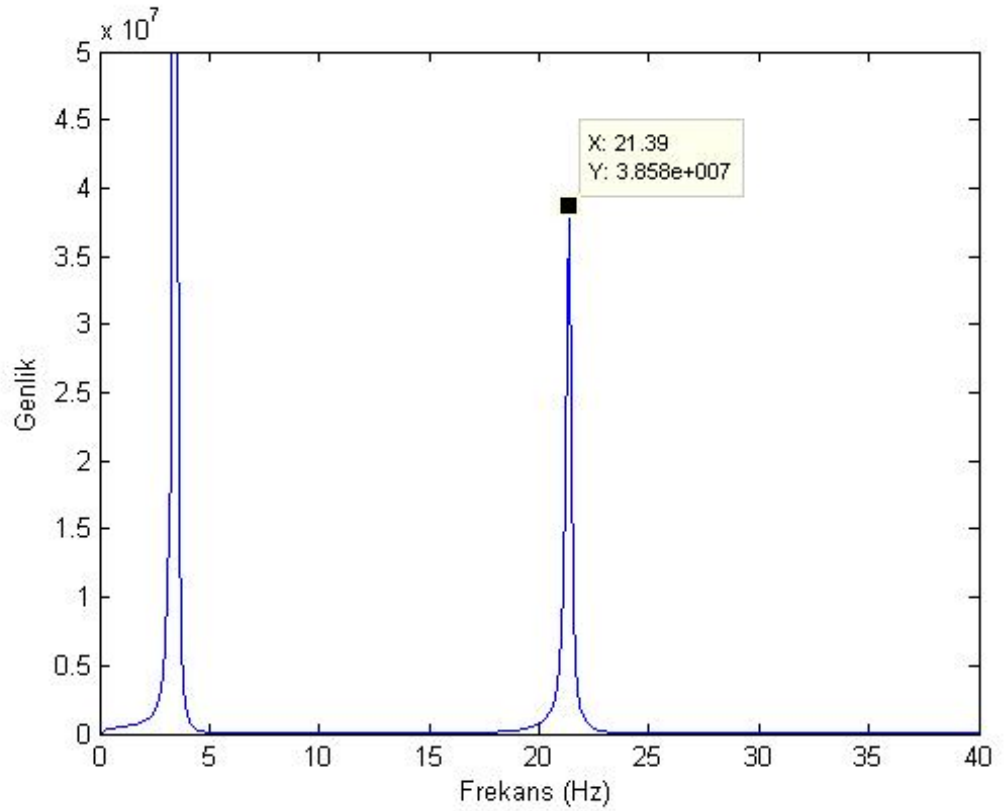


Şekil 6.7. 1 Amper Konum – Zaman Grafiği (cam)

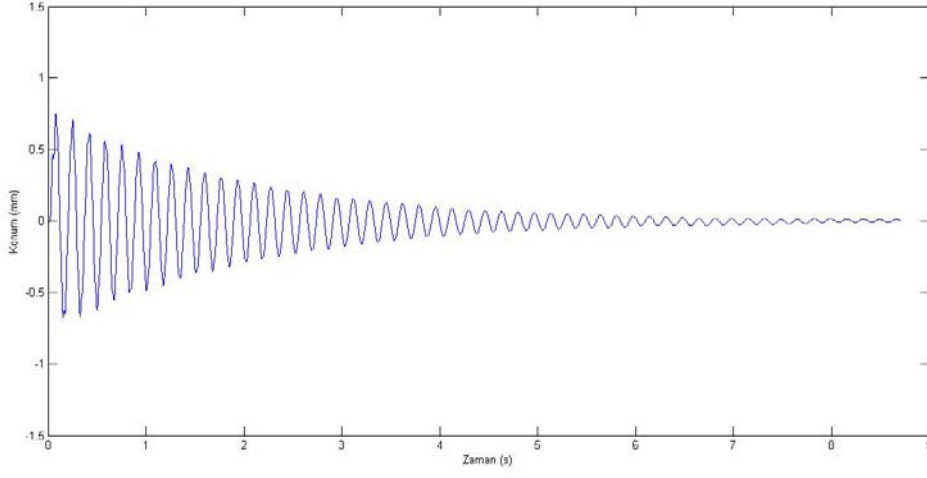
Elektro mıknatis üzerinde akımlar arttırıldığında vuruş testi sırasında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.



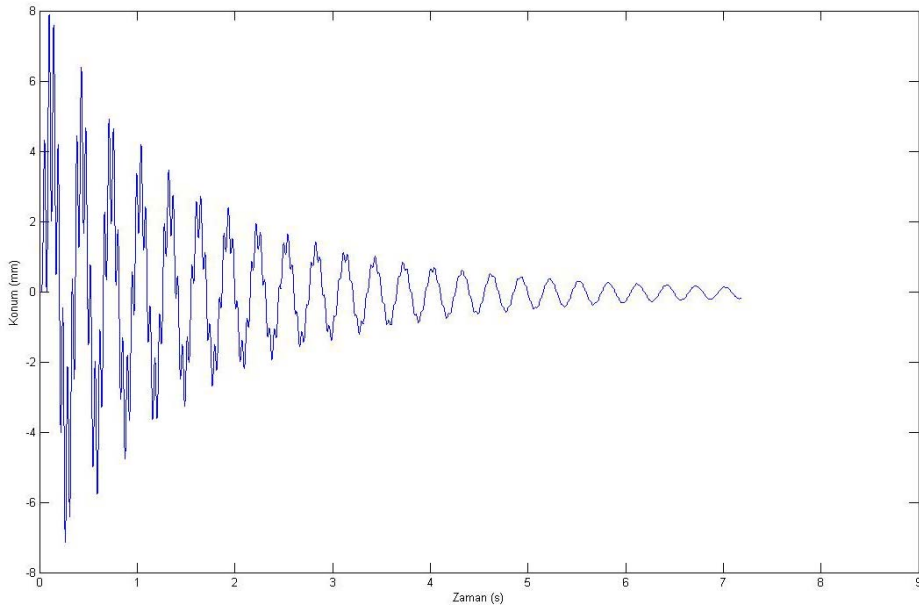
Şekil 6.8. 1 Amper koşulunda frekans sinyali (karbon)



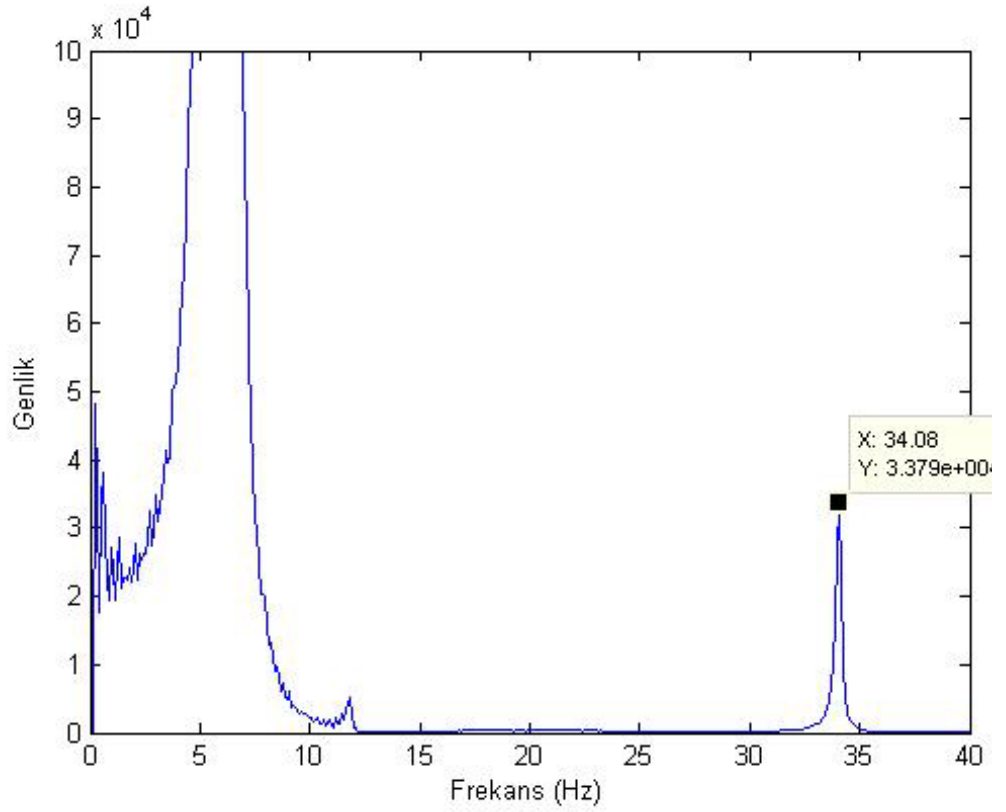
Şekil 6.9. 1 Amper koşulunda frekans sinyali (cam)



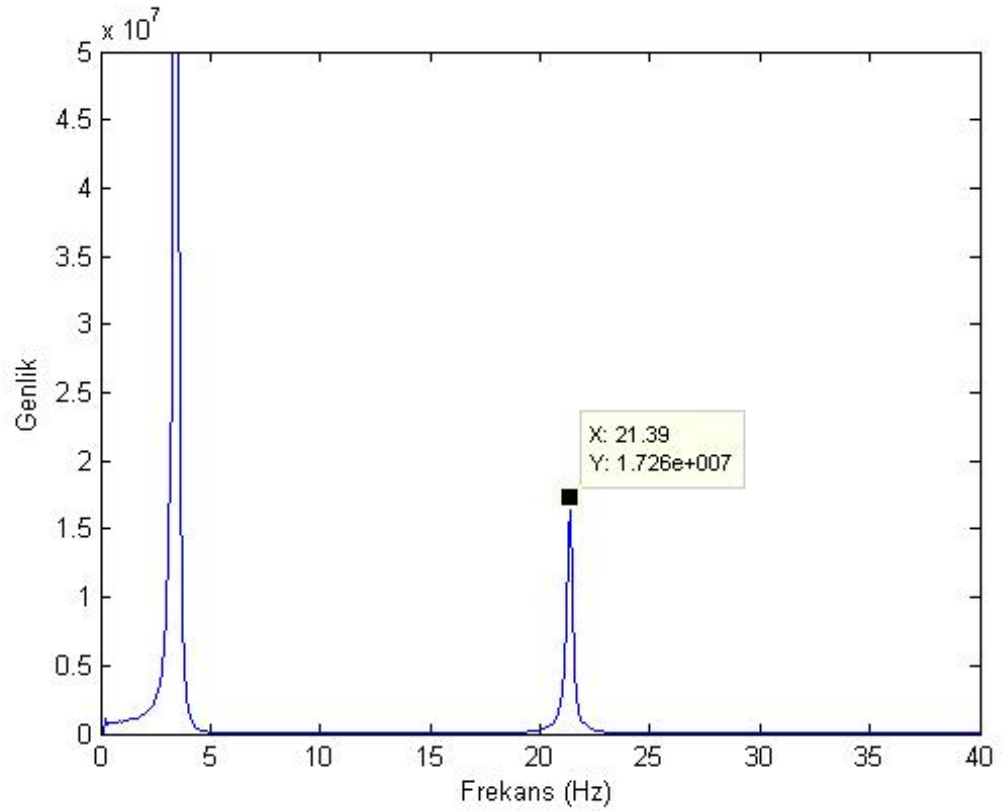
Şekil 6.10. 3 Amper Konum – Zaman Grafiği (karbon)



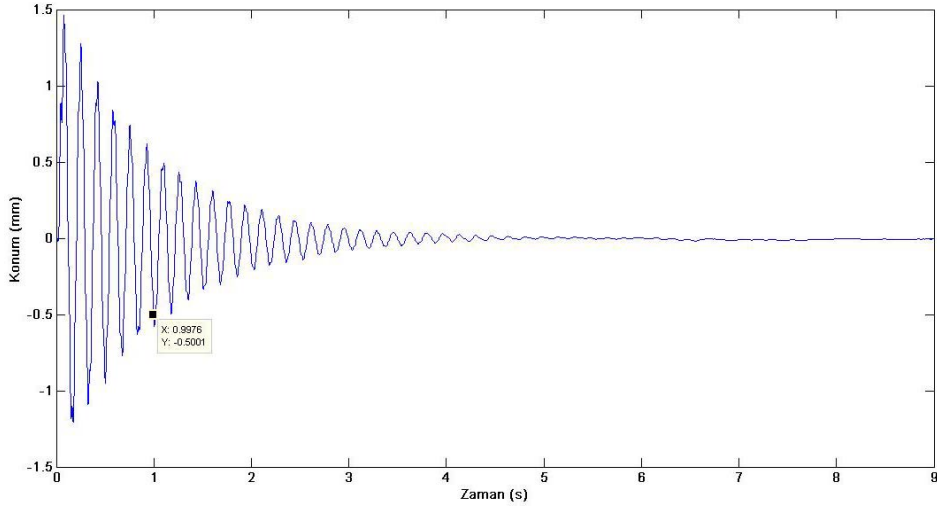
Şekil 6.11. 3 Amper Konum – Zaman Grafiği (cam)



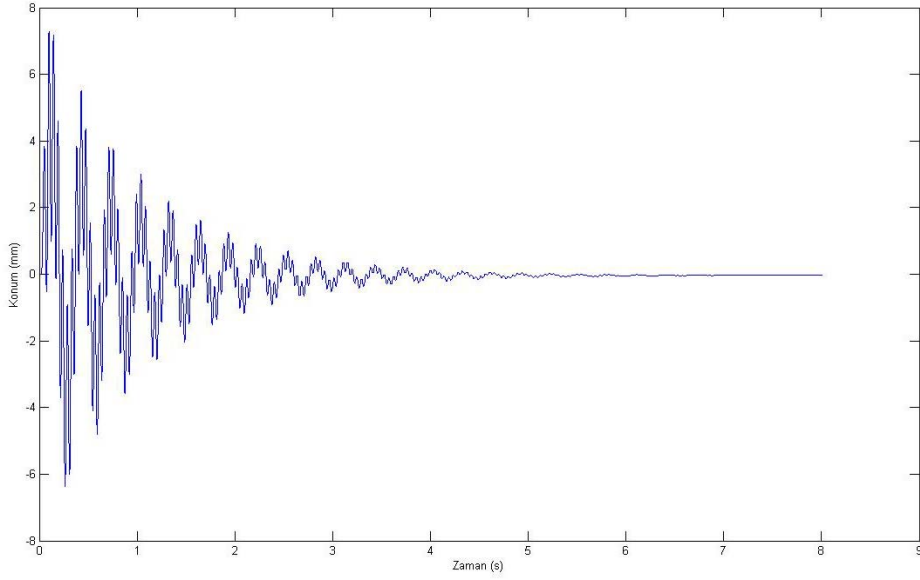
Şekil 6.12. 3 Amper koşulunda frekans sinyali (karbon)



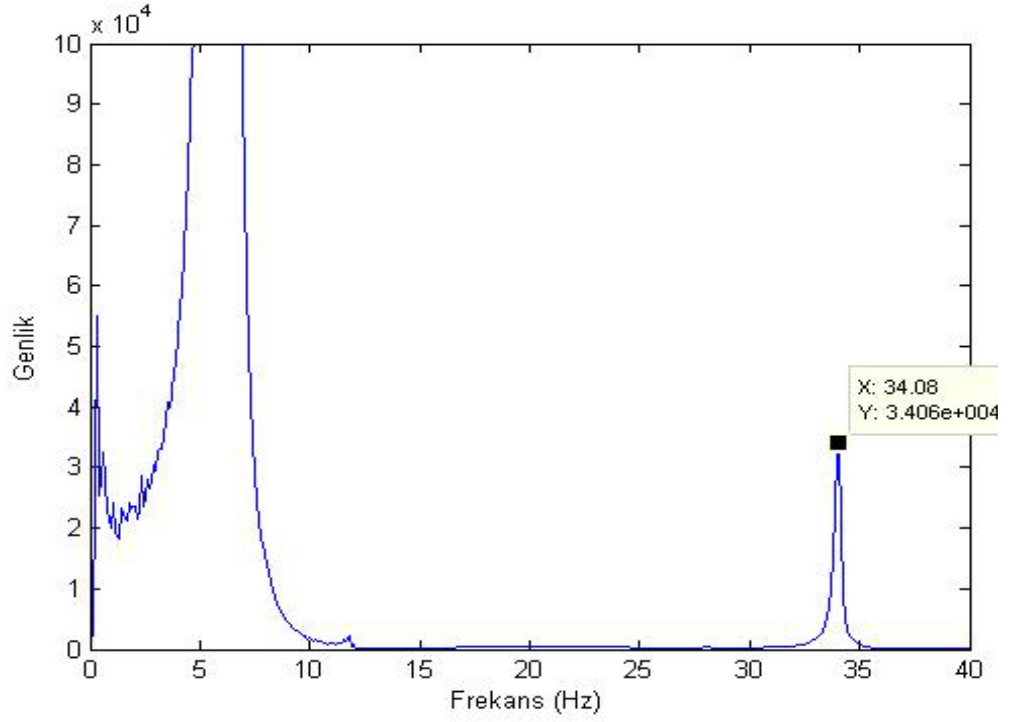
Şekil 6.13. 3 Amper koşulunda frekans sinyali (cam)



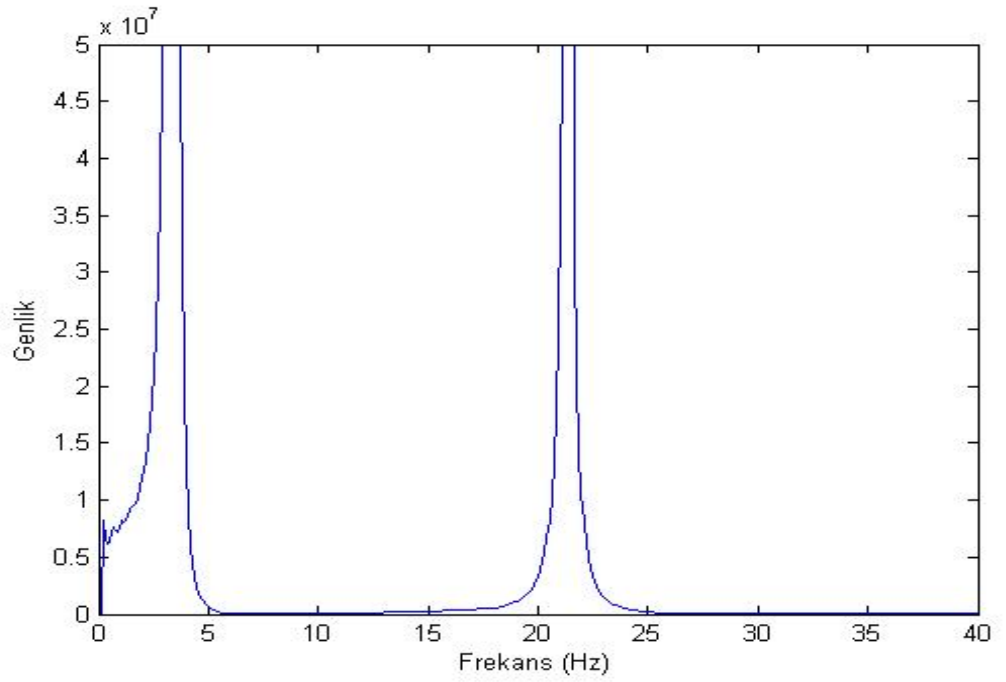
Şekil 6.14. 5 Amper Konum – Zaman Grafiği (karbon)



Şekil 6.15. 5 Amper Konum – Zaman Grafiği (cam)



Şekil 6.16. 5 Amper koşulunda frekans sinyali (karbon)

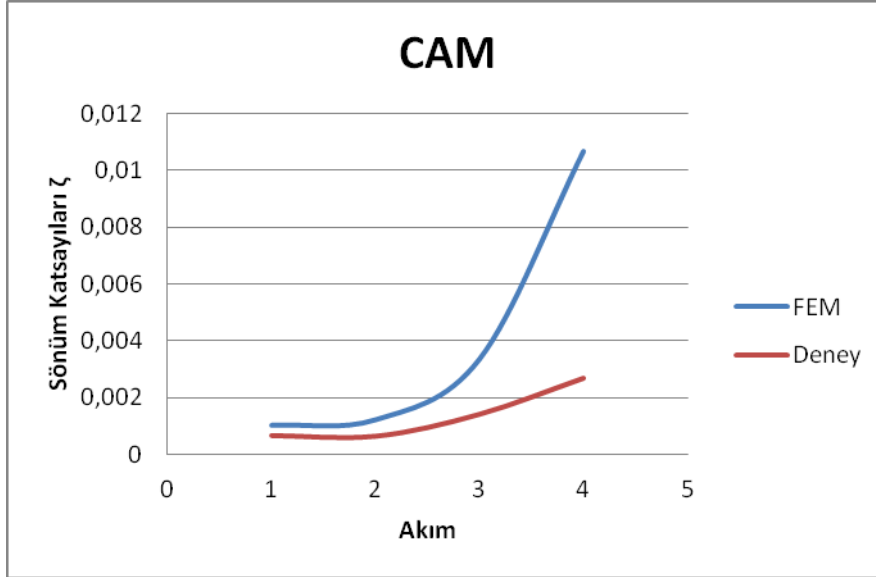


Şekil 6.17. 5 Amper koşulunda frekans sinyali (cam)

Yukarıdaki değerlerden görüldüğü üzere elektromıknatis yardımıyla üretilen elektromanyetik alan sonucunda, iletken bir levhanın üzerinde oluşan girdap akımlarının sönümlemeyi arttırdığı görülmüştür.

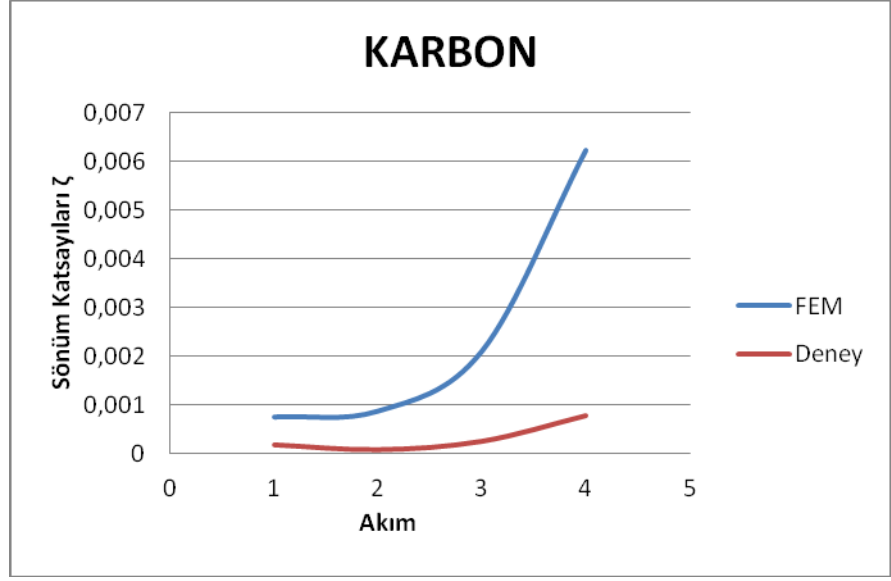
## 6.2. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Şekil 6.19 ve şekil 6.20’de COMSOL’da yapılan analizler ile deneylerden elde edilen sönüm katsayısı eğrileri gösterilmiştir. 1 Amper ile 2 Amper arasında eğriler arasındaki benzerlik yakındır. Akım miktarı arttırıldıkça eğriler birbirinden farklılaşmaktadır. Bunun en büyük sebebi elektromıknatısın yapıldığı silisli çeliğin COMSOL’da doğrusal bir malzeme olarak tanımlanmasıdır. Gerçekte bu malzemede oluşturulan manyetik alan yoğunluğu (B) ile uygulanan manyetik alan şiddeti (H) arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Uygulanan amper miktarı arttıkça malzeme elektromanyetik doyuma doğru yaklaşmaktadır.



Şekil 6.18. Cam elyaf takviyeli kiriş için deney ve analiz sonuç karşılaştırması.





Şekil 6.19.Karbon elyaf takviyeli kiriş için deney ve analiz sonuç karşılaştırması.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Bae, J.S., Kwak, M.K., Inman, D.J.** 2005. Vibration suppression of a cantilever beam using eddy current damper. *Journal of Sound and Vibration*, 284(3-5), 805-824.
- Benchechou, B., Coni, M., Howarth, H.V.C., White, R.G.** 1998. Some aspects of vibration damping improvement in composite materials. *Composites Part B-Engineering*, 29(6), 809-817.
- Berthelot, J.M., El Mahi, A., Assarar, M., Sefrani, Y.** 2008. Damping analysis of orthotropic composite materials and laminates. *Composites Part B-Engineering*, 39(7-8), 1069-1076.
- Bill, B.** Basic Theory of The Hammer Test Method. *Kistler Instrumente AG, Winterthur, Switzerland.*
- Botelho, E.C., Campos, A.N., de Barros, E., Pardini, L.C., Rezende, M.C.** 2006. Damping behavior of continuous fiber/metal composite materials by the free vibration method. *Composites Part B-Engineering*, 37(2-3), 255-263.
- Carne TG And Stasiunas EC.,** 2006. *Lessons Learned in Modal Testing-Part3.*
- Cyril M. Harris, A.G.P.** 2002a. *Harris' Shock and Vibration Handbook.* The McGraw-Hill Companies, New York Chicago.
- Cyril M. Harris, A.G.P.** 2002b. *Harris' Shock and Vibration Handbook.* McGraw-Hill Companies, New York Chicago.
- Ebrahimi, B., Khamesee, M.B., Golnaraghi, F.** 2009. A novel eddy current damper: theory and experiment. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 42(7), -.
- Fiorillo, F.** Measurement and characterisation of magnetic materials. *Elsevier Academic Press*, 2004 ISBN 0-12-257251-3, sayfa. 31.
- Fu, J.H.a.Z.-F.** 2001. *Modal Analysis.* A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd, Oxford Auckland Boston Johannesburg Melbourne New Delhi.
- Hocheng, H., Puw, H.Y., Yao, K.C.** 1992. Experimental Aspects of Drilling of Some Fiber-Reinforced Plastics. *Machining of Composite Materials*, 127-138

**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Inman, D.J.** 2006. *Vibration with Control*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Lesobre, A., Ben Ahmed, A.H., Drecq, D.** 2001. An analytical dynamic model of eddy-current brakes. *Iemdc 2001: Ieee International Electric Machines and Drives Conference*, 122-125.
- Mallick, P.K.** 2008. *Fiber-reinforced composites : materials, manufacturing, and design*. Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton.
- Mazumdar, S.K.** 2002. *Composites manufacturing : materials, product, and process engineering*. CRC Press LLC, Boca Raton.
- Ramulu, M., Faridnia, M., Garbini, J.L., Jorgensen, J.E.** 1991. Machining of Graphite Epoxy Composite-Materials with Polycrystalline Diamond (Pcd) Tools. *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the Asme*, 113(4), 430-436.
- Randall D, A.J.** 1999. *Vibrations: Experimental Modal Analysis*. Cincinnati, Ohio.
- Richardson, B.J.S.M.H.** 1999. CSI Reliability Week. *FL, Orlando*.
- Seong-Soo Cho, S.-B.K., Joon-Young Soh, Sang-Ok Han.** Effect of Tension Coating on Iron Loss at Frequencies Below 1 kHz in Thin-Gauged 3% Si-Fe Sheets, *IEEE Transactions on Magnetics*. 45(No. 10), p. 4165-4168.
- Serkan GÜLLE,** Yaklaşım Anahtarlarının Çalışması Ve Montaj İlkeleri, [http://www.emo.org.tr/ekler/d7b5623befd766b\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/d7b5623befd766b_ek.pdf).
- Sheikh-Ahmad, J.Y.** 2009. *Machining of Polymer Composites*. Springer Science+Business Media, LLC, New York.
- Silva, C.W.D.** 2007. *Vibration Damping, Control, and Design*. Taylor & Francis Group, LLC, British Columbia.
- Sodano, H.A., Bae, J.S., Inman, D.J., Belvin, W.K.** 2005. Concept and model of eddy current damper for vibration suppression of a beam. *Journal of Sound and Vibration*, 288(4-5), 1177-1196.
- Staab, G.H.** 1999. *Laminar composites*. Butterworth-Heinemann, Madras, India.
- Tonoli, A.** 2007. Dynamic characteristics of eddy current dampers and couplers. *Journal of Sound and Vibration*, 301(3-5), 576-591.

**KAYNAKLAR DİZİNİ**

**Zheng, X.J., Zhou, Y.H., Miya, K.** 2001. An analysis of variable magnetic damping of a cantilever beam-plate with end coils in transverse magnetic fields. *Fusion Engineering and Design*, 55 (4), 457-465.

[http://tr.wikipedia.org/wiki/Elektromanyetik\\_kuvvet](http://tr.wikipedia.org/wiki/Elektromanyetik_kuvvet).

[http://tr.wikipedia.org/wiki/Faraday-Lenz\\_yasas%C4%B1](http://tr.wikipedia.org/wiki/Faraday-Lenz_yasas%C4%B1).

[http://tr.wikipedia.org/wiki/Lorentz\\_kuvveti](http://tr.wikipedia.org/wiki/Lorentz_kuvveti).

<http://tr.wikipedia.org/wiki/Titre%C5%9Fim>.

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/91/Eddy\\_currents\\_en.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/91/Eddy_currents_en.png).

## ÖZGEÇMİŞ

Yazar 1982 yılında Kırıkkale’de dünyaya gelmiştir. Lise eğitimini İzmir Gaziemir Süper Lisesi’nde tamamlamış daha sonra 2000 yılında yüksek öğrenim hayatına Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde başlamıştır. 2004 yılı ağustos ayında bu bölümden mezun olduktan sonra, 2009 yılda Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Makine Teorisi Ve Dinamiği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. İlgi duyduğu araştırma konuları kompozit malzemelerde titreşim özellikleridir.

### AKADEMİK ÇALIŞMALAR

#### Bilimsel Etkinliklerde Sunulmuş Bildirileri:

1. Kutlay Sever , Mehmet Sarıkanat, Yoldaş Seki, İsmail H.Tavman, **Kader Sever**, "Isıl Çevrimin Jüt Fiber/Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE) Kompozitlerin Tabakalararası Kayma Dayanımına Etkisi", 6 th International Advanced Technologies Symposium, Mayıs 2011, Elazığ,
2. B. Oğuz Gürses, **Kader Sever**, Mehmet Sarıkanat, Aysun Baltacı, “Polimerik Kompozit Yapılarda Fiber Oryantasyonun Titreşim Davranışına Etkisinin Nümerik Yöntemlerle İncelenmesi”, II. Uluslararası Katılımlı Polimerik Kompozitler Sempozyum-Sergi ve Proje Pazarı, 26-28 Kasım 2010, İzmir
3. B. Oğuz Gürses, **Kader Sever**, Mehmet Sarıkanat, Yoldaş Seki, Ömer Mermer, “İyonik-Polimer Metal Kompozitlerin Üretimi Karakterizasyonu ve Biyomimetik Aktuatör Uygulamalarında Kullanılması”, II. Uluslararası Katılımlı Polimerik Kompozitler Sempozyum-Sergi ve Proje Pazarı, 26-28 Kasım 2010, İzmir.
4. **Kader Sever**, Kasım Canatan, Mehmet Sarıkanat, Barış Oğuz Gürses, Hasan Yıldız, “Cam Fiber Takviyeli Polimerik Kompozitlerde Fiber Oryantasyonun Kayma Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, II. Uluslararası Katılımlı Polimerik Kompozitler Sempozyum-Sergi Ve Proje Pazarı, 26-28 Kasım 2010, İzmir